

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Comunicações

Interferência Cocanal
e
Técnicas de Encaminhamento Alternativo.

Autora: Nelcy Felisbino Keffer
Orientador: Michel Daoud Yacoub

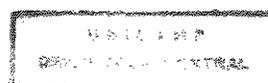
Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por NELCY FELISBINO KEFFER
e aprovada pela Comissão
Julgada em 22 / 08 / 97
Michel Daoud Yacoub
Orientador

Tese submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP para preenchimento dos pré-requisitos parciais para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Agosto 1997

1979
K259i

32073/BC



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	K259i
V. Ex.	
T. MOBO BC/	32073
PROC.	2.8.197
C <input type="checkbox"/>	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	15/11/97
N.º CPD	

CM-00102679-6

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

K259i

Keffer, Nelcy Felisbino

Interferência cocanal e técnicas de encaminhamento alternativo / Nelcy Felisbino Keffer.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientador: Michel Daoud Yacoub.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Telecomunicações. 2. Sistemas de comunicação móvel. 3. Rádio celular. 4. Rádio - Interferência. I. Yacoub, Michel Daoud. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Agradecimentos

Minha especial gratidão ao meu orientador Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub, pelos seus valiosos ensinamentos, elogios e críticas. Seus ensinamentos me transformaram de engenheira em pesquisadora. Quanto aos elogios e as críticas, agradeço especialmente pelas críticas. Elogios nos alegram, críticas nos fazem evoluir.

Meu reconhecimento a todos os professores do curso de Doutorado em Engenharia Elétrica pelos conhecimentos e incentivos recebidos.

Aos colegas, pela convivência.

Às funcionárias do convênio TELEBRÁS, pela atenção recebida.

Aos funcionários da FEEC, pela colaboração e boa vontade.

À UNICAMP, pelos recursos disponíveis que tornaram possível este trabalho de tese.

À CAPES, pelo apoio a esta pesquisa.

À TELEBRÁS, pelo apoio parcial a esta pesquisa.

Meu agradecimento especial ao meu querido esposo Antônio pelo companheirismo; pelas alegrias e sofrimentos divididos; pela dedicação, compreensão, amor e carinho que nunca faltaram.

Para
Antônio,
com amor.

Resumo

O uso das técnicas de encaminhamento alternativo implica melhoria da capacidade de tráfego e alterações da interferência cocanal. Este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito do uso destas técnicas na interferência cocanal. Neste trabalho é feita ampla análise da modelagem do ambiente de rádio móvel. Esta modelagem compreende as modelagens da envoltória e da relação sinal/ruído. São propostas modelagens originais para a envoltória do sinal. O cálculo de todas as médias e variâncias não disponíveis na literatura é feito. Além disso, é feita uma exaustiva análise da probabilidade de interferência cocanal que inclui a proposta muitos métodos originais de avaliação. Ainda, são avaliados os parâmetros do sistema que são modificados quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo e que exercem influência sobre a interferência cocanal. Dentre estes parâmetros, destaca-se a geometria da célula. Duas formas para avaliação da influência do uso das técnicas de encaminhamento alternativo na interferência cocanal são propostas: a) A avaliação é feita considerando-se que o rádio móvel situa-se nos pontos de “pior caso” e que o encaminhamento alternativo da chamada está sendo efetivamente feito. Nesta avaliação, sugere-se uma aproximação possível para a forma geométrica da célula para sistemas móveis que fazem uso das técnicas de encaminhamento alternativo. b) A avaliação é feita considerando-se que o rádio móvel situa-se na borda da célula e que a chamada considerada é encaminhada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo. Nesta avaliação, sugerem-se aproximações possíveis para as distâncias entre o rádio móvel e as estações rádio base de primeira opção e de segunda opção.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura desta Tese	2
1.4	Contribuições	4
2	Densidades do Sinal de Rádio Móvel	7
2.1	Introdução	7
2.2	Densidades da Envoltória do Sinal de Rádio Móvel	11
2.2.1	Ambiente Rayleigh	11
2.2.2	Ambiente Nakagami	12
2.2.3	Ambiente Rice	13
2.2.4	Ambiente Log-normal	16
2.2.5	Ambiente Suzuki	20
2.2.6	Ambiente Nakagami Sombreado	29
2.2.7	Ambiente Rice Sombreado	35
2.3	Densidades da Relação Sinal/Ruído	47
2.3.1	Ambiente Rayleigh	49
2.3.2	Ambiente Nakagami	49
2.3.3	Ambiente Rice	51
2.3.4	Ambiente Log-normal	52
2.3.5	Ambiente Suzuki	55
2.3.6	Ambiente Nakagami Sombreado	63
2.3.7	Ambiente Rice Sombreado	71
2.4	Comparações entre os Diversos Modelos Estatísticos do Sinal de Rádio Móvel	80
2.4.1	Comparação entre os Modelos Nakagami e Rice	80

2.4.2	Comparação entre o Modelo Suzuki e os Modelos Rayleigh e Log-normal	83
2.4.3	Comparação entre o Modelo Nakagami Sombreado e os Modelos Nakagami e Log-normal	86
2.4.4	Comparação entre o Modelo Rice Sombreado e os Modelos Rice e Log-normal	90
2.4.5	Comparação entre os Modelos Nakagami Sombreado e Rice Sombreado .	94
2.5	Conclusão	96
3	Interferência Cocanal	98
3.1	Introdução	98
3.2	Probabilidade de Interferência Cocanal	100
3.2.1	Sistemas de Adição Linear	101
3.2.2	Sistemas de Adição Quadrática	102
3.2.3	Definição de Interferência Cocanal	102
3.2.4	Probabilidade de Interferência Cocanal Total	103
3.2.5	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Sistemas de Adição Linear.	105
3.2.6	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Sistemas de Adição Quadrática	108
3.3	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rayleigh/Rayleigh	111
3.3.1	Método A	113
3.3.2	Método B	119
3.3.3	Método C	121
3.3.4	Método D	122
3.3.5	Método E	125
3.3.6	Comentários e Conclusões	127
3.4	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Nakagami/Nakagami	132
3.4.1	Método F	134
3.4.2	Método G	142
3.4.3	Comentários e Conclusões	145

3.5	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rice/Rayleigh	150
3.5.1	Método H	151
3.5.2	Método I	153
3.5.3	Método J	156
3.5.4	Comentários e Conclusões	159
3.6	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rice/Rice	164
3.6.1	Método K	165
3.6.2	Comentários e Conclusões	168
3.7	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Log-normal/Log-normal	171
3.7.1	Método L	172
3.7.2	Comentários e Conclusões	175
3.8	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rayleigh/Suzuki	178
3.8.1	Método M	178
3.8.2	Método N	180
3.8.3	Comentários e Conclusões	183
3.9	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Nakagami/Suzuki	186
3.9.1	Método O	186
3.9.2	Comentários e Conclusões	190
3.10	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rice/Suzuki	192
3.10.1	Método P	193
3.10.2	Método Q	195
3.10.3	Comentários e Conclusões	200
3.11	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Suzuki/Suzuki	205
3.11.1	Método R	206
3.11.2	Método S	209
3.11.3	Método T	213

3.11.4	Comentários e Conclusões	218
3.12	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki	224
3.12.1	Método U	225
3.12.2	Comentários e Conclusões	227
3.13	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rice Sombreado/Suzuki	232
3.13.1	Método V	233
3.13.2	Método W	237
3.13.3	Comentários e Conclusões	243
3.14	Probabilidade de Interferência Cocanal Total e o Ambiente de Rádio Móvel	251
3.14.1	Probabilidade de Interferência Cocanal Total em Ambiente Nakagami/Nakagami	251
3.14.2	Probabilidade de Interferência Cocanal Total em Ambiente Nakagami/Rayleigh	252
3.14.3	Probabilidade de Interferência Cocanal Total em Ambiente Rayleigh/Rayleigh	253
3.14.4	Comentários e Conclusões	254
3.15	Conclusão	255
4	Técnicas de Encaminhamento Alternativo	257
4.1	Introdução	257
4.2	Modelagem de um Sistema Móvel com Duas Células com Dependência Mútua de Tráfego	261
4.3	Desempenho de um Sistema Móvel com Duas Células com Dependência Mútua de Tráfego	267
4.3.1	Medidas de Desempenho	267
4.3.2	Alguns Resultados	268
4.4	Conclusão	272
5	Interferência Cocanal e Técnicas da Encaminhamento Alternativo	274
5.1	Introdução	274
5.2	Parâmetro Margem e Geometria do Sistema Móvel	275
5.3	Geometria do Sistema de Rádio Móvel e Técnicas de Encaminhamento Alternativo	276

5.3.1	Forma Geométrica da Célula	276
5.3.2	Uma Aproximação Proposta para a Forma Geométrica da Célula Quando do Uso das Técnicas de Encaminhamento Alternativo.	280
5.4	Parâmetro Margem e Técnicas de Encaminhamento Alternativo	284
5.5	Probabilidade de Interferência Cocanal e Técnicas de Encaminhamento Alternativo - Considerações Gerais.	285
5.6	Probabilidade de Interferência Cocanal e Técnicas de Encaminhamento Alternativo	286
5.7	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Técnicas de Encaminhamento Alternativo	287
5.7.1	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Nakagami/Nakagami	288
5.7.2	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Nakagami/Rayleigh	288
5.7.3	Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Rayleigh/Rayleigh	290
5.7.4	Comentários e Conclusões	291
5.8	Probabilidade de Interferência Cocanal Total e Técnicas de Encaminhamento Alternativo	294
5.8.1	Probabilidade de Interferência Cocanal Total e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Nakagami/Nakagami	294
5.8.2	Probabilidade de Interferência Cocanal Total e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Nakagami/Rayleigh	296
5.8.3	Probabilidade de Interferência Cocanal Total e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Rayleigh/Rayleigh	296
5.8.4	Comentários e Conclusões	297
5.9	Interferência Cocanal, Técnicas de Encaminhamento Alternativo e as Duas Opções de Encaminhamento	299
5.10	Probabilidade de Decisão de Roteamento Alternativo	300

5.11 Geometria do Sistema de Rádio Móvel, Técnicas de Encaminhamento Alternativo e as Duas Opções de Encaminhamento	302
5.12 Parâmetro Margem, Técnicas de Encaminhamento Alternativo e as Duas Opções de Encaminhamento	307
5.13 Probabilidade de Interferência Cocanal, Técnicas de Encaminhamento Alternativo e as Duas Opções de Encaminhamento - Considerações Gerais.	307
5.14 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes, Técnicas de Encaminhamento Alternativo e as Duas Opções de Encaminhamento	309
5.14.1 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Alternativo da Chamada em Ambiente Nakagami/Nakagami	310
5.14.2 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Alternativo da Chamada em Ambiente Nakagami/Rayleigh	311
5.14.3 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Alternativo da Chamada em Ambiente Rayleigh/Rayleigh	311
5.14.4 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Normal da Chamada em Ambiente Nakagami/Nakagami	312
5.14.5 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Normal da Chamada em Ambiente Nakagami/Rayleigh	312
5.14.6 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Normal da Chamada em Ambiente Rayleigh/Rayleigh	313
5.14.7 Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Nakagami/Nakagami	315
5.14.8 Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Nakagami/Rayleigh	316

5.14.9	Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Co- canal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Am- biente Rayleigh/Rayleigh	318
5.14.10	Comentários e Conclusões	321
5.15	Probabilidade de Interferência Cocanal Total, Técnicas de Encaminhamento Al- ternativo e as Duas Opções de Encaminhamento	323
5.15.1	Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Co- canal Total em Ambiente Nakagami/Nakagami	324
5.15.2	Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Co- canal Total em Ambiente Nakagami/Rayleigh	325
5.15.3	Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Co- canal Total em Ambiente Rayleigh/Rayleigh	327
5.15.4	Comentários e Conclusões	327
5.16	Conclusão	328
6	Conclusão	331
6.1	Considerações Finais	331
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	336

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Gerais

Um marco na evolução dos serviços de telecomunicações é a utilização de enlaces de rádio para comunicações móveis.

A difusão dos serviços de comunicações sem fio se deve à evolução do conceito celular. Segundo o conceito celular, a área de serviço é dividida em regiões chamadas células, cada uma com seu próprio equipamento de rádio - estação rádio base [1]. Como decorrência da arquitetura celular surge o reuso de frequências, isto é, o uso de canais de rádio de mesma frequência de portadora para cobrir diferentes áreas [2]. Estes canais de rádio de mesma frequência de portadora utilizados para cobrir diferentes áreas - diferentes células - são chamados cocanais. As diferentes células que fazem uso de canais de rádio de mesma frequência de portadora - que fazem uso de cocanais - são chamadas cocélulas. O reuso de frequências implica uma degradação do sinal de rádio móvel. A ocorrência de uma inadequada recepção do sinal de rádio móvel que surge devido ao uso simultâneo de canais de rádio de mesma frequência de portadora em diferentes células é conhecida por interferência cocanal.

A análise da interferência cocanal é de extrema importância porquanto ela impõe restrições ao reuso de frequências e, portanto, é um fator limitante da capacidade de tráfego dos sistemas de rádio móvel. Para analisar a interferência cocanal é necessário caracterizar o canal de rádio móvel. A caracterização do canal de rádio móvel necessita ser feita por métodos estatísticos, devido à variabilidade do ambiente, e engloba a predição do valor médio da potência do sinal recebido e da variabilidade do sinal em torno desta média.

Com o objetivo de melhorar o desempenho dos sistemas de rádio móvel foram desenvolvidas técnicas que procuram encaminhar (ou rotear) as chamadas pertencentes a uma

determinada célula de forma alternativa, de acordo com critérios pré-determinados, a uma célula vizinha com a qual existe comunicação adequada. Por causa desta característica estas técnicas são chamadas de técnicas de encaminhamento (ou roteamento) alternativo.

Se, por um lado, as técnicas de encaminhamento alternativo proporcionam um ganho de tráfego considerável, por outro lado, elas implicam o aumento da interferência porquanto os canais estarão sendo utilizados fora do padrão de reuso inicialmente adotado na concepção do sistema. Em particular, a interferência cocanal constitui um parâmetro de extrema importância a ser avaliado nestas condições. Esta é a grande motivação deste trabalho de tese.

1.2 Objetivos

São três os principais objetivos do desenvolvimento deste trabalho:

- Modelar de maneira ampla o sinal no ambiente sem fio tendo em vista o fato de que esta modelagem é essencial para o estudo das comunicações móveis, e a análise deste assunto apresenta, na literatura existente, muitas lacunas ainda por serem exploradas.
- Analisar a interferência cocanal para diversos ambientes de rádio móvel. Na literatura, são encontrados métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal em alguns ambientes sem fio. Entretanto, para vários outros ambientes, a análise da interferência cocanal não está disponível. Para outros ainda, esta análise não é feita em função de parâmetros necessários para se incluir nela a influência do uso das técnicas de encaminhamento alternativo.
- Investigar a interferência cocanal quando do uso de técnicas de encaminhamento alternativo. O uso técnicas de encaminhamento alternativo implica alteração da probabilidade de bloqueio e também da geometria do sistema de rádio móvel. Estas alterações exercem influência sobre a interferência cocanal e a avaliação destes efeitos é importante para validar e otimizar o uso das técnicas de encaminhamento alternativo.

1.3 Estrutura desta Tese

Tendo em vista os objetivos citados, o corpo desta tese é dividido em seis capítulos, a saber:

- Capítulo 1: Introdução.
- Capítulo 2: Densidades do Sinal de Rádio Móvel - Neste capítulo é feita uma ampla análise da modelagem do sinal de rádio móvel, no que diz respeito à sua variabilidade em torno da média de potência. A modelagem, para cada ambiente considerado, é feita através da estatística da envoltória do sinal desejado e da estatística da relação sinal/ruído. Os ambientes considerados são: Rayleigh, Nakagami, Rice, Log-normal, Suzuki, Nakagami Sombreado e Rice Sombreado. A modelagem do sinal de rádio móvel inclui o cálculo de todas as médias e variâncias não disponíveis na literatura.
- Capítulo 3: Interferência Cocanal - Neste capítulo é feita uma exaustiva análise da interferência cocanal. Obtém-se o equacionamento da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes e da probabilidade de interferência cocanal total. São descritos, em diversos ambientes de rádio móvel, os métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes. Os ambientes são modelados na forma ambiente-do-sinal-desejado/ambiente-dos-sinais-interferentes. Para esta modelagem são consideradas as combinações: Rayleigh/Rayleigh, Nakagami/Rayleigh, Nakagami/Nakagami, Rice/Rayleigh, Rice/Rice, Log-normal/Log-normal, Rayleigh/Suzuki, Nakagami/Suzuki, Rice/Suzuki, Suzuki/Suzuki, Nakagami Sombreado/Suzuki e Rice Sombreado/Suzuki. Em geral, mais de um método de cálculo é descrito para cada ambiente. Finalmente, avalia-se, a título de exemplo, a probabilidade de interferência cocanal total para os ambientes Rayleigh/Rayleigh, Nakagami/Rayleigh e Nakagami/Nakagami.
- Capítulo 4: Técnicas de Encaminhamento Alternativo - Neste capítulo é feita a descrição das técnicas de encaminhamento alternativo. Também é feita uma avaliação de desempenho de um sistema móvel de duas células quando do uso destas técnicas.
- Capítulo 5: Interferência Cocanal e Técnicas de Encaminhamento Alternativo - Neste capítulo são identificados e descritos os parâmetros do sistema móvel que sofrem modificação com o uso das técnicas de encaminhamento alternativo e que implicam alteração da interferência cocanal. Dentre estes parâmetros, destaca-se a geometria da célula. Alguns outros parâmetros são avaliados a partir do sistema de duas células descrito no Capítulo 4. A análise da interferência cocanal quando o uso das técnicas de encaminhamento alternativo é feita levando-se em consideração estas alterações. Duas formas de

análise são propostas. A título de exemplo, consideram-se os ambientes Rayleigh/Rayleigh, Nakagami/Rayleigh e Nakagami/Nakagami. Todos os demais ambientes descritos no Capítulo 3 podem ser considerados para análise, seguindo-se a mesma modelagem proposta neste capítulo.

- Capítulo 6: Conclusão - Neste capítulo são feitas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

1.4 Contribuições

Muitas são as contribuições contidas nesta tese, a saber:

- No Capítulo 2:
 - A obtenção de todas as densidades de probabilidade da envoltória em função de um parâmetro único.
 - O cálculo da média e da variância da densidade composta Rayleigh/Normal.
 - O cálculo da média e da variância da densidade composta Rayleigh/Log-normal.
 - A proposta de uma modelagem para a envoltória do sinal em ambiente Nakagami Sombreado - a densidade composta Nakagami/Normal.
 - O cálculo da média e da variância da densidade composta Nakagami/Normal.
 - A proposta de uma outra modelagem para a envoltória do sinal em ambiente Nakagami Sombreado - a densidade composta Nakagami/Log-normal.
 - O cálculo da média e da variância da densidade composta Nakagami/Log-normal.
 - A proposta de uma modelagem para a envoltória do sinal em ambiente Rice Sombreado - a densidade composta Rice/Normal.
 - O cálculo da média e da variância da densidade composta Rice/Normal.
 - A proposta de uma outra modelagem para a envoltória do sinal em ambiente Rice Sombreado - a densidade composta Rice/Log-normal.
 - O cálculo da média e da variância da densidade composta Rice/Log-normal.
 - A obtenção de todas as densidades de probabilidade da relação sinal/ruído em função de um parâmetro único.

- O cálculo da média e da variância da densidade composta Exponencial/Normal.
 - O cálculo da média e da variância da densidade composta Exponencial/Log-normal.
 - O cálculo da média e da variância da densidade composta Gama/Normal.
 - O cálculo da média e da variância da densidade composta Gama/Log-normal.
 - O cálculo da média e da variância da densidade composta Chi-quadrada não Central/Normal.
 - O cálculo da média e da variância da densidade composta Chi-quadrada não Central/Log-normal.
- No Capítulo 3:
 - A obtenção de todos os resultados para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes e para a probabilidade de interferência cocanal total em função de um parâmetro único.
 - O Método B - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rayleigh/Rayleigh.
 - O Método D - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rayleigh/Rayleigh.
 - O Método I - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rice/Rayleigh.
 - O Método J - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rice/Rayleigh.
 - O Método K - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rice/Rice.
 - O Método M - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rayleigh/Suzuki.
 - O Método N - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rayleigh/Suzuki.

- O Método O - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Nakagami/Suzuki.
 - O Método P - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rice/Suzuki.
 - O Método R - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Suzuki/Suzuki.
 - O Método U - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki.
 - O Método V - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rice Sombreado/Suzuki.
- No Capítulo 5:
 - Uma aproximação proposta para a forma da célula expandida pelo uso das técnicas de encaminhamento alternativo.
 - Aproximações sugeridas para as distâncias do rádio móvel às estações rádio base para as quais sua chamada pode ser encaminhada.
 - Proposta de duas modelagens em que se combinam as técnicas de encaminhamento alternativo e a interferência cocanal.
 - Análise da interferência cocanal quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para as duas modelagens sugeridas.

Capítulo 2

Densidades do Sinal de Rádio Móvel

2.1 Introdução

A caracterização do canal de rádio móvel engloba a predição do valor médio da potência do sinal recebido e da variabilidade do sinal em torno desta média. Para caracterizar o valor médio da potência do sinal diversos modelos de propagação têm sido utilizados [3]. Os modelos de propagação dividem-se em determinísticos e empíricos. Os modelos determinísticos, em geral, são simples, têm aplicação a situações específicas e não servem para caracterizar ambientes de rádio móvel reais. Os métodos empíricos originam-se dos métodos determinísticos acrescidos de fatores de correção que adaptam o modelo a situações reais e que são obtidos de medidas de campo.

Nos modelos de propagação, em geral, procura-se caracterizar a razão de transmissão de potência, dada por w_r/w_t , onde w_r e w_t são, respectivamente, as potências recebida e transmitida.

Dentre os modelos de propagação, destaca-se a fórmula simplificada para a transmissão de potência [4]

$$\frac{w_r}{w_t} = c G_t G_r \left(\frac{h_t^2 h_r^a}{d^\alpha f^b} \right) \quad (2.1)$$

onde c é uma constante para um dado ambiente; G_t e G_r são, respectivamente, os ganhos das antenas transmissora e receptora; h_t e h_r são, respectivamente, as alturas das antenas transmissora e receptora; f é a frequência; d é a distância entre as antenas; $2 \leq \alpha \leq 6$; $2 \leq b \leq 3$; $a = 1$ para $h_r < 3$ m e $a = 2$ para $3 \text{ m} \leq h_r \leq 10 \text{ m}$.

Assim, obtém-se a potência média, \bar{w} , considerando uma distância fixa, d , entre as antenas, dada por

$$\bar{w} = c w_t G_t G_r \left(\frac{h_t^2 h_r^a}{d^\alpha f^b} \right) \quad (2.2)$$

Supondo que a potência transmitida, a frequência, os ganhos e as alturas das antenas sejam constantes, obtém-se

$$\bar{w} = \bar{w}_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-\alpha} \quad (2.3)$$

onde \bar{w} é a potência média à distância, d , e \bar{w}_0 é a potência média à distância, d_0 .

Portanto, a região descrita por uma distância fixa entre as antenas está associada a um valor médio de potência. A avaliação da variabilidade do sinal de rádio móvel em torno da média da potência necessita ser feita por métodos estatísticos. As flutuações aleatórias do sinal em torno da média de potência, que ocorrem tanto ao longo da área quanto ao longo do tempo, devem-se à variabilidade, tanto ao longo da área quanto ao longo do tempo, do ambiente.

No ambiente de rádio móvel, podem ocorrer obstruções entre as antenas, ou seja, pode ocorrer o sombreamento do sinal. Variações gradativas destas obstruções podem ocorrer tanto ao longo da área quanto ao longo do tempo. Estas variações gradativas das obstruções entre as antenas implicam lentas variações no sinal de rádio móvel em torno da média de potência. Por serem lentas, estas flutuações são conhecidas como desvanecimento lento.

No ambiente de rádio móvel, podem ocorrer diversos caminhos indiretos de propagação, ou seja, podem ocorrer multipercursos. Em um ambiente com propagação multipercurso, as diferentes componentes do sinal chegam à antena receptora com atenuações e fases aleatórias. Desta forma, estas componentes podem compôr-se construtiva ou destrutivamente, dependendo da geometria do ambiente considerado. Pequenas alterações nesta geometria, tanto ao longo da área quanto ao longo do tempo, causam grandes variações no sinal resultante. Estas flutuações são rápidas, e portanto, denominadas desvanecimento rápido.

A partir deste ponto serão consideradas apenas as flutuações aleatórias do sinal ao longo da área e por este motivo serão utilizados os termos:

- média local - referindo-se à média nas proximidades do local considerado.
- média na área - referindo-se à média em toda a região considerada.

Entretanto, caso seja necessário considerar as flutuações aleatórias do sinal ao longo do tempo, a análise será análoga, devendo-se apenas interpretar média local como sendo a média em um

período de tempo restrito e média na área como sendo a média ao longo de um período de tempo suficientemente grande.

É interessante ressaltar que, no ambiente de rádio móvel, pode ocorrer a presença de um caminho direto de propagação, isto é, pode existir linha de visada.¹ A presença de linha de visada é rara nas comunicações móveis macrocelulares, porém, é uma característica importante das comunicações móveis via satélite, em interior de edifícios e em ambientes microcelulares.

O ambiente de rádio móvel pode ser modelado como sendo um ambiente:

- com propagação multipercurso - Neste ambiente o sinal (composto apenas por componentes indiretas) sofre flutuações rápidas em torno da média.
- com propagação multipercurso associada à presença de linha de visada - Neste ambiente a componente indireta do sinal sofre flutuações rápidas em torno da média do sinal indireto e a componente direta permanece constante.
- com sombreamento - Neste ambiente o sinal (composto apenas por uma componente direta) sofre flutuações lentas em torno da média.
- com propagação multipercurso e sombreamento combinados - Neste ambiente o sinal (composto apenas por componentes indiretas) sofre localmente flutuações rápidas em torno da média local e a média local sofre flutuações lentas ao longo da área.
- com propagação multipercurso, sombreamento e presença de linha de visada (ou de componente direta sombreada) - Neste ambiente a componente indireta sofre localmente flutuações rápidas em torno da média local do sinal indireto, a componente direta permanece localmente constante e a média local (soma da média local indireta e da potência local direta) sofre flutuações lentas ao longo da área.

Para caracterizar a variabilidade do sinal de rádio móvel são utilizados diversos modelos estatísticos:

- Modelo Rayleigh - utilizado para descrever ambientes com propagação multipercurso.
- Modelo Rice - utilizado para descrever ambientes com propagação multipercurso² e ambientes com propagação multipercurso associada à presença de linha de visada.

¹A média da potência do sinal de visada é constante à determinada distância e é avaliada através do estudo da perda de percurso em espaço livre.

²Ou seja, inclui o modelo Rayleigh.

- Modelo Log-normal - utilizado para descrever ambientes com sombreamento.
- Modelo Nakagami - mais versátil que os anteriores [5], pode ser utilizado para descrever ambientes com diferentes tipos de desvanecimento, faz uso de expressões mais simples e se ajusta melhor a resultados experimentais obtidos [6] e descreve [7] ambientes com sombreamento com valores pequenos de desvio padrão, ambientes com propagação multipercurso,² e ambientes com propagação multipercurso associada à presença de linha de visada.
- Modelo Suzuki - é a combinação dos modelos Rayleigh e Log-normal e é utilizado para descrever ambientes com propagação multipercurso e sombreamento combinados.
- Modelo Rice Sombreado - é a combinação dos modelos Rice e Log-normal e é utilizado para descrever ambientes com propagação multipercurso e sombreamento combinados,³ ou ainda, ambientes com propagação multipercurso, sombreamento e presença de linha de visada (ou de componente direta sombreada).
- Modelo Nakagami Sombreado - é a combinação dos modelos Nakagami e Log-normal e é utilizado para descrever ambientes com propagação multipercurso e sombreamento combinados,³ ou ainda, ambientes com propagação multipercurso, sombreamento e presença de linha de visada (ou de componente direta sombreada).

Os modelos que consideram a existência de um sinal de visada podem ser utilizados quando da existência de uma reflexão multipercurso dominante. Ainda, os modelos Nakagami e Nakagami Sombreado podem aproximar, respectivamente, os modelos Rice e Rice Sombreado. Os nomes dos modelos citados anteriormente são também utilizados para denominar tanto os ambientes quanto os tipos de desvanecimento por eles descritos.

A modelagem da variabilidade do sinal de rádio móvel em torno da média de potência, para cada um dos modelos citados, compreende:

- a modelagem estatística da envoltória do sinal.
- a modelagem estatística da relação sinal/ruído.⁴

³Ou seja, inclui o modelo Suzuki.

⁴Opcionalmente pode compreender o modelagem estatística da potência do sinal que é análoga à modelagem estatística da relação sinal/ruído.

2.2 Densidades da Envoltória do Sinal de Rádio Móvel

2.2.1 Ambiente Rayleigh

A envoltória, \mathbf{r} ,⁵ do sinal de rádio móvel pode ser modelada pela densidade de Rayleigh [4]. O ambiente assim modelado é chamado de ambiente Rayleigh e a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , é expressa por [4]

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad r \geq 0 \quad (2.4)$$

onde

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_r \quad (2.5)$$

e

$$\text{var}(\mathbf{r}) = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \sigma_r^2 \quad (2.6)$$

são, respectivamente, a média e a variância da envoltória, \mathbf{r} [4].

A potência, \mathbf{w} , do sinal de rádio móvel é expressa por

$$\mathbf{w} \triangleq \frac{\mathbf{r}^2}{2} \quad (2.7)$$

Portanto, da Equação 2.7, obtém-se a média, \bar{w} , da potência, \mathbf{w} , expressa por⁶

$$\bar{w} \triangleq \frac{E[\mathbf{r}^2]}{2} \quad (2.8)$$

Das Equações 2.5 e 2.6, tem-se

$$E[\mathbf{r}^2] = 2\sigma_r^2 \quad (2.9)$$

Logo, das Equações 2.8 e 2.9, obtém-se

$$\bar{w} = \sigma_r^2 \quad (2.10)$$

E, das Equações 2.5 e 2.10, obtém-se

$$\bar{w} = \frac{2}{\pi} (\bar{r})^2 \quad (2.11)$$

⁵As variáveis aleatórias serão representadas por letras em negrito.

⁶É interessante observar que o valor rms, r_{rms} , da envoltória, é dado por $r_{rms} = \sqrt{E[\mathbf{r}^2]}$, ou ainda, da Equação 2.8, tem-se $r_{rms} = \sqrt{2\bar{w}}$.

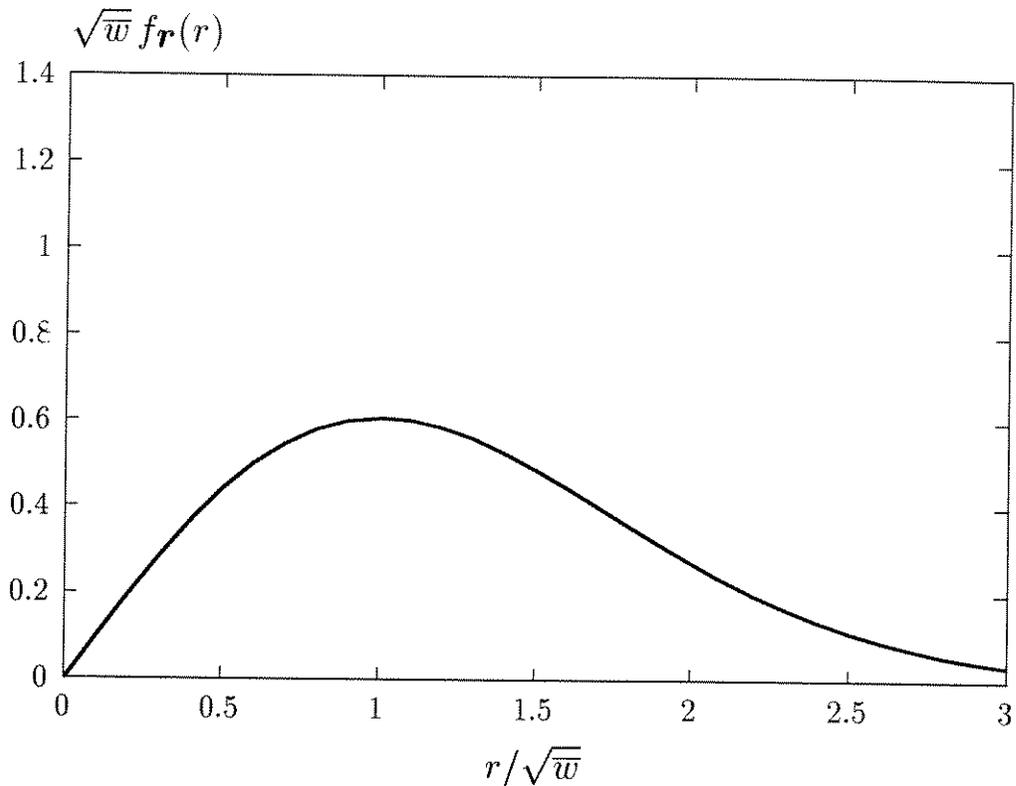


Figura 2.1: Função densidade de probabilidade da envoltória no ambiente Rayleigh.

Alternativamente, obtém-se

$$var(\mathbf{r}) = \left(\frac{4}{\pi} - 1\right) (\bar{r})^2 \quad (2.12)$$

Das Equações 2.4 e 2.10, obtém-se, portanto,

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{r}{w} \exp\left(-\frac{r^2}{2w}\right) \quad r \geq 0 \quad (2.13)$$

A Figura 2.1 mostra a função densidade de probabilidade da envoltória descrita pela Equação 2.13.

2.2.2 Ambiente Nakagami

A envoltória, \mathbf{r} , do sinal de rádio móvel pode ser modelada pela densidade de Nakagami [5]. O ambiente assim modelado é chamado de ambiente Nakagami e a função densidade

de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , é expressa por [6, ξ]

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{2m^m r^{2m-1}}{\Gamma(m) 2^m (\bar{w})^m} \exp\left(-\frac{m r^2}{2\bar{w}}\right) \quad r \geq 0 \quad (2.14)$$

onde \bar{w} é a média da potência, \mathbf{w} [6];

$$\bar{r} = \frac{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)}{\Gamma(m)} \left(\frac{2\bar{w}}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

é a média da envoltória, \mathbf{r} [ξ];

$$m = \frac{(2\bar{w})^2}{\text{var}(\mathbf{r}^2)} \geq 1/2 \quad (2.16)$$

é o parâmetro de desvanecimento do sinal (ou grau de desvanecimento do sinal) [6, ξ] e $\Gamma(\alpha)$ é a função Gama, dada por [9]

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} \exp(-t) dt \quad (2.17)$$

Ainda, da Equação 2.15, obtém-se

$$\bar{w} = \frac{m}{2} \left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)} \right]^2 (\bar{r})^2 \quad (2.18)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\mathbf{r}) = \left[m \left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)} \right]^2 - 1 \right] (\bar{r})^2 \quad (2.19)$$

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade de Nakagami, dada pela Equação 2.14, degenera-se para a densidade dada pela Equação 2.13, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh. Para $m = 1/2$, tem-se a densidade Gaussiana unilateral.

A Figura 2.2 mostra a função densidade de probabilidade da envoltória descrita pela Equação 2.14, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m , do sinal.

2.2.3 Ambiente Rice

A envoltória, \mathbf{r} , do sinal de rádio móvel pode ser modelada pela densidade de Rice [4]. O ambiente assim modelado é chamado de ambiente Rice e a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , é expressa por [10]

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2 + a^2}{2\sigma_r^2}\right) I_0\left(\frac{r a}{\sigma_r^2}\right) \quad r \geq 0 \quad (2.20)$$

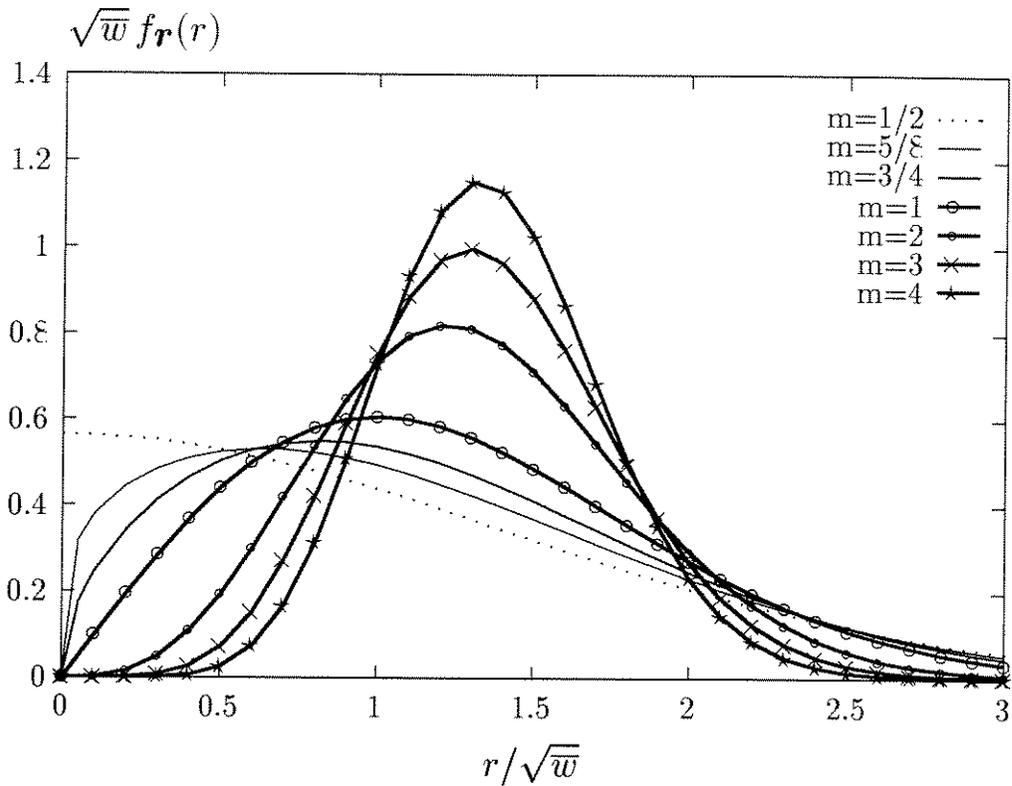


Figura 2.2: Função densidade de probabilidade da envoltória no ambiente Nakagami.

onde σ_r^2 é a média da potência da componente difusa [10, 11]; $a^2/2$ é a média da potência da componente direta [4];

$$\bar{w} = \sigma_r^2 + \frac{a^2}{2} \quad (2.21)$$

é a média da potência, w [10];

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_r \exp\left(-\frac{a^2}{4\sigma_r^2}\right) \left[I_0\left(\frac{a^2}{4\sigma_r^2}\right) \left(1 + \frac{a^2}{2\sigma_r^2}\right) + I_1\left(\frac{a^2}{4\sigma_r^2}\right) \frac{a^2}{2\sigma_r^2} \right] \quad (2.22)$$

é a média da envoltória, r [10]; $I_0(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero, que é dada por [12]

$$I_0(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp[\alpha \cos(\theta)] d\theta \quad (2.23)$$

e $I_1(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem um, que é dada por [12]

$$I_1(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp[\alpha \cos(\theta)] \cos\theta d\theta \quad (2.24)$$

Para o caso particular em que se tem obstrução da linha de visada, isto é, para $a = 0$, a densidade de Rice, dada pela Equação 2.20, degenera-se para a densidade de Rayleigh, dada pela Equação 2.4, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh.

Das Equações 2.21 e 2.22, obtém-se

$$\bar{w} = \frac{\frac{2}{\pi} \left(1 + \frac{a^2}{2\sigma_r^2}\right) (\bar{r})^2}{\exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_r^2}\right) \left[I_0\left(\frac{a^2}{4\sigma_r^2}\right) \left(1 + \frac{a^2}{2\sigma_r^2}\right) + I_1\left(\frac{a^2}{4\sigma_r^2}\right) \frac{a^2}{2\sigma_r^2} \right]^2} \quad (2.25)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\mathbf{r}) = \left[\frac{\frac{4}{\pi} \left(1 + \frac{a^2}{2\sigma_r^2}\right)}{\exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_r^2}\right) \left[I_0\left(\frac{a^2}{4\sigma_r^2}\right) \left(1 + \frac{a^2}{2\sigma_r^2}\right) + I_1\left(\frac{a^2}{4\sigma_r^2}\right) \frac{a^2}{2\sigma_r^2} \right]^2} - 1 \right] (\bar{r})^2 \quad (2.26)$$

A razão, k , potência do sinal direto/potência dos sinais indiretos, também chamada de fator de Rice [11], é dada por

$$k = \frac{a^2}{2\sigma_r^2} \quad (2.27)$$

Substituindo-se a Equação 2.27 na Equação 2.20, obtém-se a função densidade de probabilidade da envoltória do sinal expressa por

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \exp(-k) I_0\left(\frac{r}{\sigma_r} \sqrt{2k}\right) \quad r \geq 0 \quad (2.28)$$

onde, das Equações 2.21 e 2.27, obtém-se a média, \bar{w} , da potência, w , dada por

$$\bar{w} = \sigma_r^2 (1+k) \quad (2.29)$$

e, das Equações 2.22 e 2.27, obtém-se a média, \bar{r} , da envoltória, r , dada por

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_r \exp\left(-\frac{k}{2}\right) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right] \quad (2.30)$$

Das Equações 2.29 e 2.30, obtém-se

$$\bar{w} = \frac{2}{\pi} \frac{(1+k) \exp(k) (\bar{r})^2}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2} \quad (2.31)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\mathbf{r}) = \left[\frac{4}{\pi} \frac{(1+k) \exp(k)}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2} - 1 \right] (\bar{r})^2 \quad (2.32)$$

Das Equações 2.28 e 2.29, obtém-se

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{r(1+k)}{\bar{w}} \exp\left(-\frac{r^2(1+k)}{2\bar{w}}\right) \exp(-k) I_0\left[r\sqrt{\frac{2k(1+k)}{\bar{w}}}\right] \quad r \geq 0 \quad (2.33)$$

Para o caso particular em que se tem obstrução da linha de visada, isto é, para $k = 0$, a densidade de Rice, dada pela Equação 2.28, degenera-se para a densidade de Rayleigh, dada pela Equação 2.4, e a densidade dada pela Equação 2.33 degenera-se para a densidade dada pela Equação 2.13, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh.

Ainda,

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{r(1+10^{\frac{K}{10}})}{\bar{w}} \exp\left[-\frac{r^2(1+10^{\frac{K}{10}})}{2\bar{w}}\right] \exp\left(-10^{\frac{K}{10}}\right) \times I_0\left[r\sqrt{\frac{2 \times 10^{\frac{K}{10}}(1+10^{\frac{K}{10}})}{\bar{w}}}\right] \quad r \geq 0 \quad (2.34)$$

onde

$$K \triangleq 10 \log k \quad (2.35)$$

é o fator de Rice, dado em decibéis.

Para o caso particular em que se tem obstrução da linha de visada, isto é, para $K = -\infty$ dB, a densidade dada pela Equação 2.34 degenera-se para a densidade dada pela Equação 2.13, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh.

A Figura 2.3 mostra a função densidade de probabilidade da envoltória descrita pela Equação 2.34, tendo como parâmetro o fator de Rice, K , dado em decibéis.

2.2.4 Ambiente Log-normal

A envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis, do sinal de rádio móvel pode ser modelada pela densidade Normal [13, 14]. O ambiente assim modelado é chamado de ambiente Log-normal e a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{R}}(R)$, da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis, é expressa por [4, 14]

$$f_{\mathbf{R}}(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R - \tilde{R}}{\sigma_{dB}}\right)^2\right] \quad (2.36)$$

onde \tilde{R} é a média, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis,⁷ e $var(\mathbf{R}) = \sigma_{dB}^2$ é a variância da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis [15], e portanto, σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis.

⁷É importante diferenciar \tilde{R} que é a média, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis, de \bar{R} que é a média, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} . Na literatura, por vezes, estas médias são confundidas.

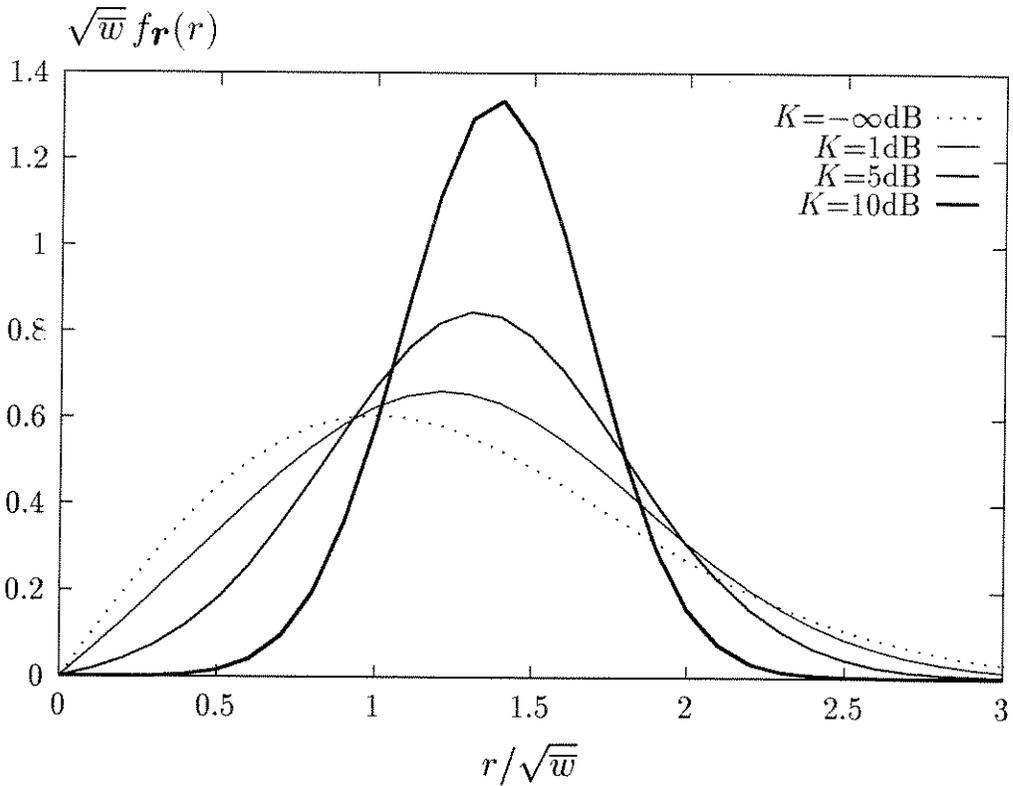


Figura 2.3: Função densidade de probabilidade da envoltória no ambiente Rice.

Da Equação 2.7, obtém-se a potência, \mathbf{W} , dada em decibéis, do sinal de rádio móvel expressa por

$$\mathbf{W} \triangleq \mathbf{R} - 10 \log 2 \quad (2.37)$$

Da Equação 2.37, obtém-se a média, $\widetilde{\mathbf{W}}$, dada em decibéis, da potência, \mathbf{W} , dada em decibéis,⁸ expressa por

$$\widetilde{\mathbf{W}} \triangleq \widetilde{\mathbf{R}} - 10 \log 2 \quad (2.38)$$

Pode-se obter a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , expressa em unidades naturais, a partir da Equação 2.36, pois

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \left. \frac{f_{\mathbf{R}}(R)}{\left| \frac{dr}{dR} \right|} \right|_{R=20 \log r} \quad (2.39)$$

⁸É importante diferenciar $\widetilde{\mathbf{W}}$ que é a média, dada em decibéis, da potência, \mathbf{W} , dada em decibéis, de $\overline{\mathbf{W}}$ que é a média, dada em decibéis, da potência, w . Na literatura, por vezes, estas médias são confundidas.

e, portanto,

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{(20/\ln 10) f_{\mathbf{R}}(R)}{10^{\frac{R}{20}}} \Big|_{R=20 \log r} \quad (2.40)$$

Das Equações 2.36 e 2.40, obtém-se

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{(20/\ln 10)}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB} r} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{dB}^2} \left[20 \log \left(\frac{r}{\tilde{r}} \right) \right]^2 \right] \quad r \geq 0 \quad (2.41)$$

onde

$$\tilde{r} \triangleq 10^{\frac{\bar{R}}{20}} \quad (2.42)$$

é a média, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis,⁹ e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis. Ou seja, \tilde{r} e σ_{dB} são, respectivamente, a média, expressa em unidades naturais, e o desvio padrão, dado em decibéis, da densidade Normal correspondente [16].

Assim, a envoltória, \mathbf{r} , do sinal de rádio móvel é modelada pela densidade Log-normal. O ambiente assim modelado é chamado ambiente Log-normal e a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , é expressa por

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma r} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left(\frac{r}{\bar{r}} \right) \right]^2 \right] \quad r \geq 0 \quad (2.43)$$

onde

$$\sigma = \frac{\sigma_{dB}}{(20/\ln 10)} \quad (2.44)$$

é o desvio padrão, dado em neper,¹⁰ da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis;

$$\bar{r} = \tilde{r} \exp \left(\frac{\sigma^2}{2} \right) \quad (2.45)$$

é a média da envoltória, \mathbf{r} [10];

$$var(\mathbf{r}) = (\tilde{r})^2 \exp(\sigma^2) [\exp(\sigma^2) - 1] \quad (2.46)$$

⁹Também é importante diferenciar \tilde{r} que é a média, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis, de \bar{r} que é a média, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} . Na literatura, por vezes, estas médias também são confundidas.

¹⁰O uso do neper (Np) em lugar do decibel (dB) tem por objetivo simplificar o equacionamento dos ambientes sombreados.

Conversão neper (Np) - decibel (dB):

$$1 \text{ Np} = \frac{20}{\ln 10} \text{ dB}$$

é a variância da envoltória, \mathbf{r} [10], e portanto,

$$\bar{w} = \frac{(\bar{r})^2}{2} \exp(2\sigma^2) \quad (2.47)$$

é a média da potência, \mathbf{w} .

Das Equações 2.43 e 2.45, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , dada por

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma r} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{r \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}{\bar{r}} \right] \right]^2 \right] \quad r \geq 0 \quad (2.48)$$

Das Equações 2.45 e 2.47, obtém-se

$$\bar{w} = \frac{(\bar{r})^2}{2} \exp(\sigma^2) \quad (2.49)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\mathbf{r}) = (\bar{r})^2 [\exp(\sigma^2) - 1] \quad (2.50)$$

Das Equações 2.48 e 2.49, tem-se ainda

$$E[\mathbf{r}^2] = (\bar{r})^2 \exp(\sigma^2) \quad (2.51)$$

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , pode ainda ser expressa por

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma r} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left(\frac{r}{\hat{r}} \right) \right]^2 \right] \quad r \geq 0 \quad (2.52)$$

onde

$$\hat{r} \triangleq \frac{\bar{r}}{\exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (2.53)$$

é a média normalizada da envoltória, \mathbf{r} .

Das Equações 2.45 e 2.53, obtém-se

$$\hat{r} = \tilde{r} \quad (2.54)$$

A média, \tilde{w} , expressa em unidades naturais, da potência, \mathbf{W} , dada em decibéis,¹¹ é expressa por

$$\tilde{w} \triangleq 10 \frac{\tilde{W}}{10} \quad (2.55)$$

¹¹Também é importante diferenciar \tilde{w} que é a média, expressa em unidades naturais, da potência, \mathbf{W} , dada em decibéis, de \bar{w} que é a média, expressa em unidades naturais, da potência, \mathbf{w} . Na literatura, por vezes, estas médias também são confundidas.

Das Equações 2.38, 2.42 e 2.55, obtém-se

$$\tilde{w} \triangleq \frac{(\tilde{r})^2}{2} \quad (2.56)$$

Como será visto adiante, na Equação 2.229, a média normalizada, \hat{w} , da potência, w , é expressa por

$$\hat{w} \triangleq \frac{\bar{w}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.57)$$

Portanto, das Equações 2.47, 2.56 e 2.57, obtém-se

$$\hat{w} = \tilde{w} \quad (2.58)$$

Das Equações 2.54, 2.56 e 2.58, obtém-se

$$\hat{w} = \frac{(\hat{r})^2}{2} \quad (2.59)$$

Assim, da Equações 2.52 e 2.59, obtém-se

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma r} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}\left[\ln\left(\frac{r}{\sqrt{2\hat{w}}}\right)\right]^2\right] \quad r \geq 0 \quad (2.60)$$

A Figura 2.4 mostra a função densidade de probabilidade da envoltória descrita pela Equação 2.60, tendo como parâmetro o desvio padrão, σ , dado em neper, da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis.

2.2.5 Ambiente Suzuki

A envoltória, \mathbf{r} , do sinal de rádio móvel pode ser modelada pela densidade composta Rayleigh/Normal. O ambiente assim modelado é chamado de ambiente Suzuki e a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , é expressa por

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{r}}(r) &= \sqrt{\frac{\pi}{\xi\sigma_{dB}^2}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r}{10^{\frac{R'}{10}}} \exp\left(-\frac{\pi}{4} \frac{r^2}{10^{\frac{R'}{10}}}\right) \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{R' - \bar{R} + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40}}{\sigma_{dB}}\right)^2\right] dR' \quad r \geq 0 \end{aligned} \quad (2.61)$$

onde R' é a média local, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} ; \bar{R} é a média na área, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} , e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

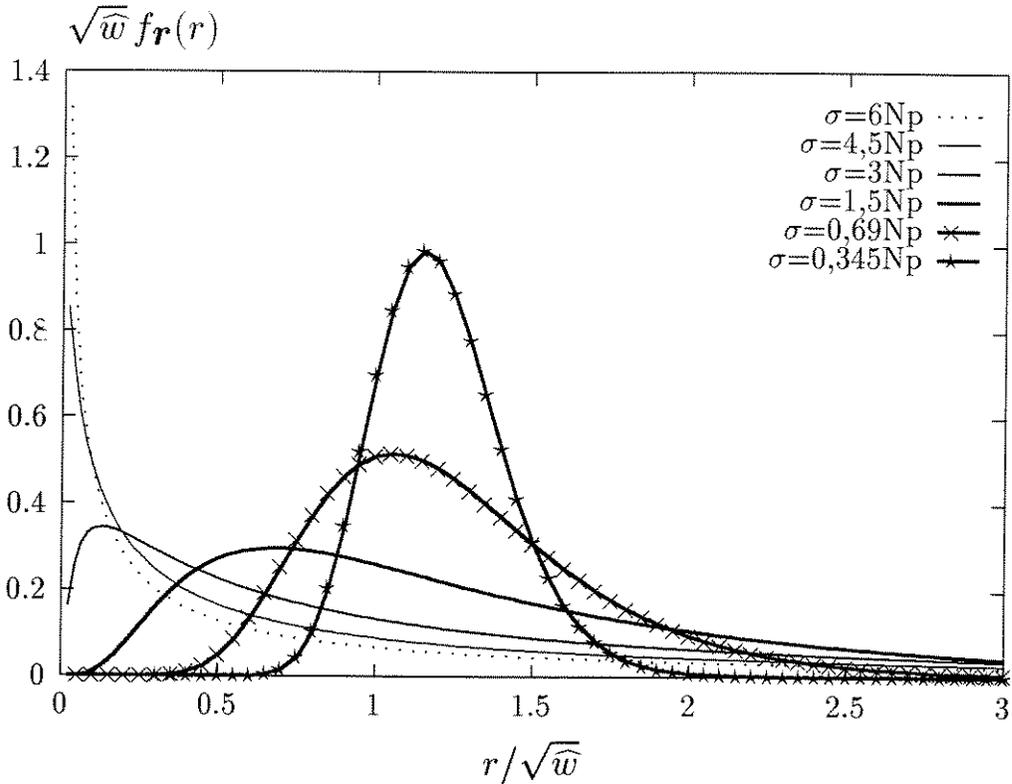


Figura 2.4: Função densidade de probabilidade da envoltória no ambiente Log-normal.

A densidade composta Rayleigh/Normal, dada pela Equação 2.61, é a combinação das densidades de Rayleigh, dada pela Equação 2.4, e Normal, dada pela Equação 2.36. Assim,

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R') f_{\mathbf{R}'}(R') dR' \quad (2.62)$$

onde $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R')$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis,¹² e $f_{\mathbf{R}'}(R')$ é a função densidade de probabilidade da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R')$, da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, é dada pela densidade de Rayleigh, ou seja, das Equações 2.4 e 2.5, tem-se

$$f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R') = \frac{\pi r}{2 \times 10^{\frac{R'}{10}}} \exp\left(-\frac{\pi r^2}{4 \times 10^{\frac{R'}{10}}}\right) \quad r \geq 0 \quad (2.63)$$

¹²As notações usualmente utilizadas na literatura para a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, são $f_{\mathbf{r}|\mathbf{R}'}(r|R')$, $f_{\mathbf{r}}(r|\mathbf{R}' = R')$ e $f_{\mathbf{r}}(r|R')$.

onde $R' \triangleq 20 \log r'$ é a média local, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} , e r' é a média local, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} .

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{R}'}(R')$, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, é dada pela densidade Normal, ou seja, da Equação 2.36, tem-se

$$f_{\mathbf{R}'}(R') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R' - \widetilde{R}'}{\sigma_{dB}} \right)^2 \right] \quad (2.64)$$

onde \widetilde{R}' é a média na área, dada em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

Das Equações 2.62-2.64, obtém-se

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \sqrt{\frac{\pi}{\xi \sigma_{dB}^2}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r}{10^{\frac{R'}{10}}} \exp \left(-\frac{\pi}{4} \frac{r^2}{10^{\frac{R'}{10}}} \right) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R' - \widetilde{R}'}{\sigma_{dB}} \right)^2 \right] dR' \quad r \geq 0 \quad (2.65)$$

onde R' é a média local, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} ; \widetilde{R}' é a média na área, dada em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis. A densidade composta Rayleigh/Normal, dada pela Equação 2.65, é conhecida como densidade de Suzuki [4].

O cálculo da média da densidade composta Rayleigh/Normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

A média na área, \bar{r} , da envoltória, \mathbf{r} , é dada por

$$\bar{r} \triangleq E[\mathbf{r}] \triangleq \int_0^{\infty} r f_{\mathbf{r}}(r) dr \quad (2.66)$$

Das Equações 2.62 e 2.66, obtém-se

$$\bar{r} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{\infty} r f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R') dr \right] f_{\mathbf{R}'}(R') dR' \quad (2.67)$$

Sabendo-se que

$$E[\mathbf{r} | \mathbf{R}' = R'] \triangleq \int_0^{\infty} r f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R') dr \quad (2.68)$$

é a média condicional¹³ e que

$$E[\mathbf{r} | \mathbf{R}' = R'] \triangleq 10^{\frac{R'}{20}} \quad (2.69)$$

¹³As Notações usualmente utilizadas na literatura para média da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, são $E[\mathbf{r} | \mathbf{R}' = R']$ e $E[\mathbf{r} | R']$. Ainda, é importante diferenciar $E[\mathbf{r} | \mathbf{R}' = R'] = E[\mathbf{r} | R']$ que é a média condicional não aleatória de $E[\mathbf{r} | \mathbf{R}']$ que é a média condicional aleatória [15].

tem-se

$$\bar{r} = \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{R'}{20}} f_{\mathbf{R}'}(R') dR' \quad (2.70)$$

Ainda,

$$f_{\mathbf{R}'}(R') = \left. \frac{f_{\mathbf{r}'}(r')}{\left| \frac{dR'}{dr'} \right|} \right|_{r'=10^{\frac{R'}{20}}} \quad (2.71)$$

e, portanto,

$$f_{\mathbf{R}'}(R') = \left. \frac{r' f_{\mathbf{r}'}(r')}{(20/\ln 10)} \right|_{r'=10^{\frac{R'}{20}}} \quad (2.72)$$

Das Equações 2.70 e 2.72, obtém-se

$$\bar{r} = \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{R'}{10}} \frac{f_{\mathbf{r}'}\left(10^{\frac{R'}{20}}\right)}{(20/\ln 10)} dR' \quad (2.73)$$

Substituindo $R' = 20 \log r'$ na Equação 2.73, tem-se

$$\bar{r} = \int_0^{\infty} r' f_{\mathbf{r}'}(r') dr' \quad (2.74)$$

Ou seja,

$$\bar{r} = E[\mathbf{r}'] = \bar{r}' \quad (2.75)$$

onde \bar{r}' é a média na área da média local, \mathbf{r}' .

Das Equações 2.42, 2.44, 2.45 e 2.75, tem-se

$$\bar{r} = 10^{\frac{\tilde{R}'}{20}} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] \quad (2.76)$$

ou ainda,

$$\bar{R} = \tilde{R}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40} \quad (2.77)$$

onde $\bar{R} \triangleq 20 \log \bar{r}$ é a média na área, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} .

Das Equações 2.65 e 2.77, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(\mathbf{r})$, da envoltória, \mathbf{r} , dada pela Equação 2.61.

O cálculo da variância da densidade composta Rayleigh/Normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

Da Equação 2.11, obtém-se a média local, \mathbf{w}' , expressa em unidades naturais, dada por

$$\mathbf{w}' = \frac{2}{\pi} (\mathbf{r}')^2 \quad (2.78)$$

Da Equação 2.78, obtém-se a média local, \mathbf{W}' , dada em decibéis, dada por

$$\mathbf{W}' = \mathbf{R}' + 10 \log \frac{2}{\pi} \quad (2.79)$$

Ainda, a média na área, $\widetilde{\mathbf{W}}'$, dada em decibéis, da média local, \mathbf{W}' , dada em decibéis, é expressa por

$$\widetilde{\mathbf{W}}' \triangleq E[\mathbf{W}'] \quad (2.80)$$

e a média na área, $\widetilde{\mathbf{R}}'$, dada em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, é expressa por

$$\widetilde{\mathbf{R}}' \triangleq E[\mathbf{R}'] \quad (2.81)$$

Da Equação 2.77, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$\bar{\mathbf{R}} = \widetilde{\mathbf{R}}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40} \quad (2.82)$$

e, como será visto adiante na Equação 2.252, tem-se

$$\bar{\mathbf{W}} = \widetilde{\mathbf{W}}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20} \quad (2.83)$$

Assim, das Equações 2.79-2.83, obtém-se

$$\bar{\mathbf{W}} = \bar{\mathbf{R}} + 10 \log \frac{2}{\pi} + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40} \quad (2.84)$$

Das Equações 2.8 e 2.84, obtém-se

$$E[\mathbf{r}^2] = \frac{4}{\pi} \exp \left[\left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] 10^{\frac{\bar{\mathbf{R}}}{10}} \quad (2.85)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\mathbf{r}) = \left[\frac{4}{\pi} \exp \left[\left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] - 1 \right] 10^{\frac{\bar{\mathbf{R}}}{10}} \quad (2.86)$$

Obtém-se, ainda, a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , dada pela densidade composta Rayleigh/Log-normal, ou seja, tem-se

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \sqrt{\frac{\pi}{\xi \sigma^2}} \int_0^\infty \frac{r}{(r')^3} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \frac{r^2}{(r')^2} \right] \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{r' \exp \left(\frac{\sigma^2}{2} \right)}{\bar{r}} \right] \right]^2 \right] dr \quad r \geq 0 \quad (2.87)$$

onde

$$r' \triangleq 10^{\frac{\mathbf{R}'}{20}} \quad (2.88)$$

é a média local, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} ;

$$\bar{r} \triangleq 10^{\frac{\bar{R}}{20}} \quad (2.89)$$

é a média na área, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} , e

$$\sigma \triangleq \frac{\sigma_{dB}}{(20/\ln 10)} \quad (2.90)$$

é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

A densidade composta Rayleigh/Log-normal, dada pela Equação 2.87, é a combinação das densidades de Rayleigh, dada pela Equação 2.4, e Log-normal, dada pela Equação 2.48. Assim,

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \int_0^{\infty} f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r') f_{\mathbf{r}'}(r') dr' \quad (2.91)$$

onde $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r')$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{r}' , expressa em unidades naturais,¹⁴ e $f_{\mathbf{r}'}(r')$ é a função densidade de probabilidade da média local, \mathbf{r}' , expressa em unidades naturais.

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r')$, da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{r}' , é dada pela densidade de Rayleigh, ou seja, das Equações 2.4 e 2.5, tem-se

$$f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r') = \frac{\pi r}{2(r')^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \frac{r^2}{(r')^2}\right] \quad r \geq 0 \quad (2.92)$$

onde r' é a média local, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} .

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}'}(r')$, da média local, \mathbf{r}' , é dada pela densidade Log-normal, ou seja, da Equação 2.48, tem-se

$$f_{\mathbf{r}'}(r') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma r'} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{r' \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}{\bar{r}'}\right]\right]^2\right] \quad r' \geq 0 \quad (2.93)$$

onde \bar{r}' é a média na área da média local, \mathbf{r}' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

Das Equações 2.91-2.93, obtém-se

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \sqrt{\frac{\pi}{\xi \sigma^2}} \int_0^{\infty} \frac{r}{(r')^3} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \frac{r^2}{(r')^2}\right] \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{r' \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}{\bar{r}'}\right]\right]^2\right] dr' \quad r \geq 0 \quad (2.94)$$

¹⁴As notações usualmente utilizadas na literatura para a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{r}' , são $f_{\mathbf{r} | \mathbf{r}'}(r | r')$, $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r')$ e $f_{\mathbf{r}}(r | r')$.

onde r' é a média local da envoltória, \mathbf{r} ; \bar{r}' é a média na área da média local, \mathbf{r}' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

O cálculo da média da densidade composta Rayleigh/Log-normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

A média na área, \bar{r} , da envoltória, \mathbf{r} , é dada por

$$\bar{r} \triangleq E[\mathbf{r}] \triangleq \int_0^{\infty} r f_{\mathbf{r}}(r) dr \quad (2.95)$$

Das Equações 2.91 e 2.95, obtém-se

$$\bar{r} = \int_0^{\infty} \left[\int_0^{\infty} r f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r') dr \right] f_{\mathbf{r}'}(r') dr' \quad (2.96)$$

Sabendo-se que

$$E[\mathbf{r} | \mathbf{r}' = r'] \triangleq \int_0^{\infty} r f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r') dr \quad (2.97)$$

é a média condicional¹⁵ e que

$$E[\mathbf{r} | \mathbf{r}' = r'] \triangleq r' \quad (2.98)$$

tem-se

$$\bar{r} = \int_0^{\infty} r' f_{\mathbf{r}'}(r') dr' \quad (2.99)$$

Ou seja,

$$\bar{r} = E[\mathbf{r}'] = \bar{r}' \quad (2.100)$$

onde \bar{r}' é a média na área da média local, \mathbf{r}' .

Das Equações 2.94 e 2.100, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , dada pela Equação 2.87.

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , pode ainda ser expressa por

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \sqrt{\frac{\pi}{\xi \sigma^2}} \int_0^{\infty} \frac{r}{(r')^3} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \frac{r^2}{(r')^2}\right] \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln\left(\frac{r'}{\hat{r}}\right)\right]^2\right] dr' \quad r \geq 0 \quad (2.101)$$

onde

$$\hat{r} \triangleq \frac{\bar{r}}{\exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (2.102)$$

¹⁵As Notações usualmente utilizadas na literatura para média da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{r}' , são $E[\mathbf{r} | \mathbf{r}' = r']$ e $E[\mathbf{r} | r']$. Ainda, é importante diferenciar $E[\mathbf{r} | \mathbf{r}' = r'] = E[\mathbf{r} | r']$ que é a média condicional não aleatória de $E[\mathbf{r} | r']$ que é a média condicional aleatória [15].

é a média normalizada da envoltória, \mathbf{r} .

O cálculo da variância da densidade composta Rayleigh/Log-normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

Da Equação 2.11, obtém-se a média local, \mathbf{w}' , dada por

$$\mathbf{w}' = \frac{2}{\pi} (\mathbf{r}')^2 \quad (2.103)$$

A média na área, \overline{w}' , da média local, \mathbf{w}' , é expressa por

$$\overline{w}' \triangleq E[\mathbf{w}'] \quad (2.104)$$

Da Equação 2.51, obtém-se também

$$E[(\mathbf{r}')^2] = (\overline{r}')^2 \exp(\sigma^2) \quad (2.105)$$

onde \overline{r}' é a média na área da média local, \mathbf{r}' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

Da Equação 2.100, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$\overline{r} = \overline{r}' \quad (2.106)$$

e, como será visto adiante na Equação 2.277, tem-se

$$\overline{w} = \overline{w}' \quad (2.107)$$

Assim, das Equações 2.103-2.107, obtém-se

$$\overline{w} = \frac{2}{\pi} (\overline{r}')^2 \exp(\sigma^2) \quad (2.108)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\mathbf{r}) = \left[\frac{4}{\pi} \exp(\sigma^2) - 1 \right] (\overline{r}')^2 \quad (2.109)$$

Da Equação 2.102, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$\widehat{r} \triangleq \frac{\overline{r}}{\exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (2.110)$$

e, como será visto adiante na Equação 2.289, tem-se

$$\widehat{w} \triangleq \frac{\overline{w}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.111)$$

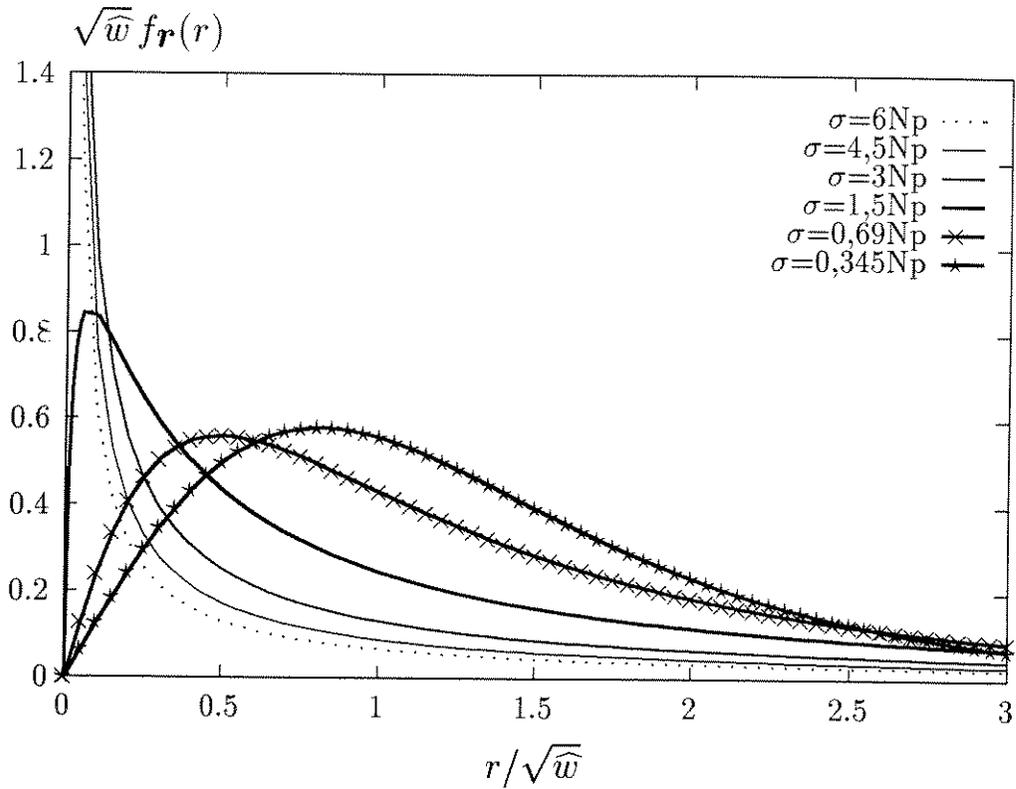


Figura 2.5: Função densidade de probabilidade da envoltória no ambiente Suzuki.

Assim, das Equações 2.108, 2.110 e 2.111, obtém-se

$$\hat{w} = \frac{2}{\pi} (\hat{r})^2 \quad (2.112)$$

Portanto, das Equações 2.101 e 2.112, tem-se

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \sqrt{\frac{\pi}{\xi \sigma^2}} \int_0^{\infty} \frac{r}{(r')^3} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \frac{r^2}{(r')^2}\right] \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln\left(r' \sqrt{\frac{2}{\hat{w} \pi}}\right)\right]^2\right] dr' \quad r \geq 0 \quad (2.113)$$

Fazendo $v = r' \sqrt{2}/\sqrt{\hat{w} \pi}$ e substituindo na Equação 2.113, obtém-se

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \int_0^{\infty} \frac{r}{v^3 \hat{w}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{r^2}{v^2 \hat{w}}\right] \exp\left[-\frac{[\ln(v)]^2}{2\sigma^2}\right] dv \quad r \geq 0 \quad (2.114)$$

A Figura 2.5 mostra a função densidade de probabilidade da envoltória descrita pela Equação 2.114, tendo como parâmetro o desvio padrão, σ , dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

2.2.6 Ambiente Nakagami Sombreado

A modelagem da envoltória do sinal de rádio móvel, em ambiente Nakagami Sombreado, descrita nesta secção, é contribuição deste trabalho de tese. Esta contribuição compreende a proposta de uma função densidade de probabilidade para a envoltória do sinal - a densidade composta Nakagami/Normal - e o cálculo da média e da variância desta densidade. Compreende, ainda, a proposta de uma segunda função densidade de probabilidade para a envoltória do sinal - a densidade composta Nakagami/Log-normal - e o cálculo da média e da variância desta densidade.

A densidade composta Nakagami/Normal é proposta como uma modelagem possível para a envoltória, \mathbf{r} , do sinal de rádio móvel. A expressão proposta é a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , dada por

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi \sigma_{dB}^2}} \frac{[\Gamma(m + \frac{1}{2})]^{2m}}{[\Gamma(m)]^{2m+1}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r^{2m-1}}{10^{\frac{mR'}{10}}} \exp \left[- \left[\frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \right]^2 \frac{r^2}{10^{\frac{R'}{10}}} \right] \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R' - \bar{R} + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40}}{\sigma_{dB}} \right)^2 \right] dR' \quad r \geq 0 \quad (2.115)$$

onde R' é a média local, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} ; \bar{R} é a média na área, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} ; σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis; m é o parâmetro de desvanecimento do sinal (ou grau de desvanecimento do sinal) e $\Gamma(\alpha)$ é a função Gama, dada pela Equação 2.17.

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade composta Nakagami/Normal, dada pela Equação 2.115, degenera-se para a densidade composta Rayleigh/Normal, dada pela Equação 2.61, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta Nakagami/Normal, dada pela Equação 2.115, é a combinação das densidades de Nakagami, dada pela Equação 2.14, e Normal, dada pela Equação 2.36. Assim,

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R') f_{\mathbf{R}'}(R') dR' \quad (2.116)$$

onde $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R')$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, e $f_{\mathbf{R}'}(R')$ é a função densidade de probabilidade da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R')$, da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, é dada pela densidade de Nakagami, ou seja, das

Equações 2.14 e 2.18, tem-se

$$f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R') = \frac{2 \left[\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right) \right]^{2m} r^{2m-1}}{[\Gamma(m)]^{2m+1} 10^{\frac{mR'}{10}}} \exp \left[- \left[\frac{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)}{\Gamma(m)} \right]^2 \frac{r^2}{10^{\frac{R'}{10}}} \right] \quad r \geq 0 \quad (2.117)$$

onde $R' \triangleq 20 \log r'$ é a média local, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} , e r' é a média local, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} .

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{R}'}(R')$, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, é dada pela densidade Normal, ou seja, da Equação 2.36, tem-se

$$f_{\mathbf{R}'}(R') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R' - \widetilde{R}'}{\sigma_{dB}} \right)^2 \right] \quad (2.118)$$

onde \widetilde{R}' é a média na área, dada em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

Das Equações 2.116-2.118, obtém-se

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{r}}(r) &= \sqrt{\frac{2}{\pi \sigma_{dB}^2}} \frac{[\Gamma(m + \frac{1}{2})]^{2m}}{[\Gamma(m)]^{2m+1}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r^{2m-1}}{10^{\frac{mR'}{10}}} \exp \left[- \left[\frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \right]^2 \frac{r^2}{10^{\frac{R'}{10}}} \right] \\ &\times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R' - \widetilde{R}'}{\sigma_{dB}} \right)^2 \right] dR' \quad r \geq 0 \end{aligned} \quad (2.119)$$

onde R' é a média local, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} ; \widetilde{R}' é a média na área, dada em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

De forma semelhante ao que foi feito para a densidade composta Rayleigh/Normal (verificar que as Equações 2.66-2.77 também são válidas para a densidade Nakagami/Normal), tem-se

$$\bar{r} = 10^{\frac{\widetilde{R}'}{20}} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] \quad (2.120)$$

onde \bar{r} é a média na área da envoltória, \mathbf{r} . Ou ainda,

$$\bar{R} = \widetilde{R}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40} \quad (2.121)$$

onde $\bar{R} \triangleq 20 \log \bar{r}$ é a média na área, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} .

Das Equações 2.119 e 2.121, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , dada pela Equação 2.115.

Da Equação 2.18, obtém-se a média local, w' , dada por

$$w' = \frac{m}{2} \left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma(m+\frac{1}{2})} \right]^2 (r')^2 \quad (2.122)$$

Da Equação 2.122, obtém-se a média local, W' , dada em decibéis, dada por

$$W' = R' + 10 \log \frac{m}{2} + 20 \log \left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma(m+\frac{1}{2})} \right] \quad (2.123)$$

Ainda, a média na área, \widetilde{W}' , dada em decibéis, da média local, W' , dada em decibéis, é expressa por

$$\widetilde{W}' \triangleq E[W'] \quad (2.124)$$

e a média na área, \widetilde{R}' , dada em decibéis, da média local, R' , dada em decibéis, é expressa por

$$\widetilde{R}' \triangleq E[R'] \quad (2.125)$$

Da Equação 2.121, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$\bar{R} = \widetilde{R}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40} \quad (2.126)$$

e, como será visto adiante na Equação 2.302, tem-se

$$\bar{W} = \widetilde{W}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20} \quad (2.127)$$

Assim, das Equações 2.123-2.127, obtém-se

$$\bar{W} = \bar{R} + 10 \log \frac{m}{2} + 20 \log \left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma(m+\frac{1}{2})} \right] + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40} \quad (2.128)$$

Das Equações 2.8 e 2.128, obtém-se

$$E[r^2] = m \left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma(m+\frac{1}{2})} \right]^2 \exp \left[\left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] 10^{\frac{\bar{R}}{10}} \quad (2.129)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(r) = \left[m \left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma(m+\frac{1}{2})} \right]^2 \exp \left[\left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] - 1 \right] 10^{\frac{\bar{R}}{10}} \quad (2.130)$$

A densidade composta Nakagami/Log-normal é proposta como uma modelagem possível para a envoltória, \mathbf{r} , do sinal de rádio móvel. A expressão proposta é a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , dada por

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi \sigma^2}} \frac{[\Gamma(m + \frac{1}{2})]^{2m}}{[\Gamma(m)]^{2m+1}} \int_0^{\infty} \frac{r'^{2m-1}}{(r')^{2m+1}} \exp \left[- \left[\frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \right]^2 \frac{r^2}{(r')^2} \right] \times \exp \left[- \frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{r' \exp(\frac{\sigma^2}{2})}{\bar{r}} \right] \right]^2 \right] dr' \quad r \geq 0 \quad (2.131)$$

onde

$$r' \triangleq 10^{\frac{R'}{20}} \quad (2.132)$$

é a média local, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} ;

$$\bar{r} \triangleq 10^{\frac{\bar{R}}{20}} \quad (2.133)$$

é a média na área, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} , e

$$\sigma \triangleq \frac{\sigma_{dB}}{(20/\ln 10)} \quad (2.134)$$

é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade composta Nakagami/Log-normal, dada pela Equação 2.131, degenera-se para a densidade composta Rayleigh/Log-normal, dada pela Equação 2.87, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta Nakagami/Log-normal, dada pela Equação 2.131, é a combinação das densidades de Nakagami, dada pela Equação 2.14, e Log-normal, dada pela Equação 2.48. Assim,

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \int_0^{\infty} f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r') f_{\mathbf{r}'}(r') dr' \quad (2.135)$$

onde $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r')$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{r}' , expressa em unidades naturais, e $f_{\mathbf{r}'}(r')$ é a função densidade de probabilidade da média local, \mathbf{r}' , expressa em unidades naturais.

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r')$, da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{r}' , é dada pela densidade de Nakagami, ou seja, das Equações 2.14 e 2.18, tem-se

$$f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r') = \frac{2 [\Gamma(m + \frac{1}{2})]^{2m} r^{2m-1}}{[\Gamma(m)]^{2m+1} (r')^{2m}} \exp \left[- \left[\frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \right]^2 \frac{r^2}{(r')^2} \right] \quad r \geq 0 \quad (2.136)$$

onde r' é a média local, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} .

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}'}(r')$, da média local, \mathbf{r}' , é dada pela densidade Log-normal, ou seja, da Equação 2.48, tem-se

$$f_{\mathbf{r}'}(r') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma r'} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{r' \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}{\bar{r}'} \right] \right]^2 \right] \quad r' \geq 0 \quad (2.137)$$

onde \bar{r}' é a média na área da média local, \mathbf{r}' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

Das Equações 2.135-2.137, obtém-se

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi \sigma^2}} \frac{[\Gamma(m + \frac{1}{2})]^{2m}}{[\Gamma(m)]^{2m+1}} \int_0^\infty \frac{r'^{2m-1}}{(r')^{2m+1}} \exp \left[-\left[\frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \right]^2 \frac{r^2}{(r')^2} \right] \\ \times \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{r' \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}{\bar{r}'} \right] \right]^2 \right] dr' \quad r \geq 0 \quad (2.138)$$

onde r' é a média local da envoltória, \mathbf{r} ; \bar{r}' é a média na área da média local, \mathbf{r}' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

De forma semelhante ao que foi feito para a densidade composta Rayleigh/Log-normal (verificar que as Equações 2.95-2.100 também são válidas para a densidade Nakagami/Log-normal), tem-se

$$\bar{r} = \bar{r}' \quad (2.139)$$

onde \bar{r} é a média na área da envoltória, \mathbf{r} , e \bar{r}' é a média na área da média local, \mathbf{r}' .

Das Equações 2.138 e 2.139, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , dada pela Equação 2.131.

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , pode ainda ser expressa por

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi \sigma^2}} \frac{[\Gamma(m + \frac{1}{2})]^{2m}}{[\Gamma(m)]^{2m+1}} \int_0^\infty \frac{r'^{2m-1}}{(r')^{2m+1}} \exp \left[-\left[\frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \right]^2 \frac{r^2}{(r')^2} \right] \\ \times \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left(\frac{r'}{\hat{r}} \right) \right]^2 \right] dr' \quad r \geq 0 \quad (2.140)$$

onde

$$\hat{r} \triangleq \frac{\bar{r}}{\exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (2.141)$$

é a média normalizada da envoltória, \mathbf{r} .

Da Equação 2.18, obtém-se a média local, \mathbf{w}' , dada por

$$\mathbf{w}' = \frac{m}{2} \left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma(m+\frac{1}{2})} \right]^2 (\mathbf{r}')^2 \quad (2.142)$$

A média na área, $\overline{w'}$, da média local, \mathbf{w}' , é expressa por

$$\overline{w'} \triangleq E[\mathbf{w}'] \quad (2.143)$$

Da Equação 2.51, obtém-se também

$$E[(\mathbf{r}')^2] = (\overline{r'})^2 \exp(\sigma^2) \quad (2.144)$$

onde $\overline{r'}$ é a média na área da média local, \mathbf{r}' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis,

Da Equação 2.139, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$\overline{r} = \overline{r'} \quad (2.145)$$

e, como será visto adiante na Equação 2.322, tem-se

$$\overline{w} = \overline{w'} \quad (2.146)$$

Assim, das Equações 2.142-2.146, obtém-se

$$\overline{w} = \frac{m}{2} \left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma(m+\frac{1}{2})} \right]^2 (\overline{r})^2 \exp(\sigma^2) \quad (2.147)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\mathbf{r}) = \left[m \left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma(m+\frac{1}{2})} \right]^2 \exp(\sigma^2) - 1 \right] (\overline{r})^2 \quad (2.148)$$

Da Equação 2.141, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$\hat{r} \triangleq \frac{\overline{r}}{\exp(\frac{\sigma^2}{2})} \quad (2.149)$$

e, como será visto adiante na Equação 2.334, tem-se

$$\hat{w} \triangleq \frac{\overline{w}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.150)$$

Assim, das Equações 2.147, 2.149 e 2.150, obtém-se

$$\hat{w} = \frac{m}{2} \left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma(m+\frac{1}{2})} \right]^2 (\hat{r})^2 \quad (2.151)$$

Portanto, das Equações 2.140 e 2.151,

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{r}}(r) &= \sqrt{\frac{2}{\pi \sigma^2}} \frac{[\Gamma(m+\frac{1}{2})]^{2m}}{[\Gamma(m)]^{2m+1}} \int_0^\infty \frac{r^{2m-1}}{(r')^{2m+1}} \exp \left[- \left[\frac{\Gamma(m+\frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \right]^2 \frac{r^2}{(r')^2} \right] \\ &\times \exp \left[- \frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left(\frac{\Gamma(m)}{\Gamma(m+\frac{1}{2})} \frac{r'\sqrt{m}}{\sqrt{2\hat{w}}} \right) \right]^2 \right] dr' \quad r \geq 0 \end{aligned} \quad (2.152)$$

Fazendo $u = r'\sqrt{m}\Gamma(m)/[\sqrt{2\hat{w}}\Gamma(m+1/2)]$ e substituindo na Equação 2.152, tem-se

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi \sigma^2}} \frac{m^m}{2^m \Gamma(m)} \int_0^\infty \frac{r^{2m-1}}{u^{2m+1} (\hat{w})^m} \exp \left[- \frac{m r^2}{2 u^2 \hat{w}} \right] \exp \left[- \frac{[\ln(u)]^2}{2\sigma^2} \right] du \quad r \geq 0 \quad (2.153)$$

Para o caso particular em que $m = 1$, as densidades dadas pelas Equações 2.152 e 2.153 degeneram-se, respectivamente, para as densidades dadas pelas Equações 2.113 e 2.114, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A Figura 2.6 mostra a função densidade de probabilidade da envoltória descrita pela Equação 2.153, para $m = 3$, tendo como parâmetro o desvio padrão, σ , dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

A Figura 2.7 mostra a função densidade de probabilidade da envoltória descrita pela Equação 2.153, para $\sigma = 3$ Np, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m , do sinal.

A Figura 2.8 mostra a função densidade de probabilidade da envoltória descrita pela Equação 2.153, para $\sigma = 0,345$ Np, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m , do sinal.

2.2.7 Ambiente Rice Sombreado

A modelagem da envoltória, \mathbf{r} , do sinal de rádio móvel, em ambiente Rice Sombreado, descrita nesta secção, é contribuição deste trabalho de tese. Esta contribuição compreende a proposta de uma função densidade de probabilidade para a envoltória, \mathbf{r} , do sinal - a densidade composta Rice/Normal - e o cálculo da média e da variância desta densidade. Compreende, ainda, a proposta de uma segunda função densidade de probabilidade para a envoltória, \mathbf{r} , do sinal - a densidade composta Rice/Log-normal - e o cálculo da média e da variância desta densidade.

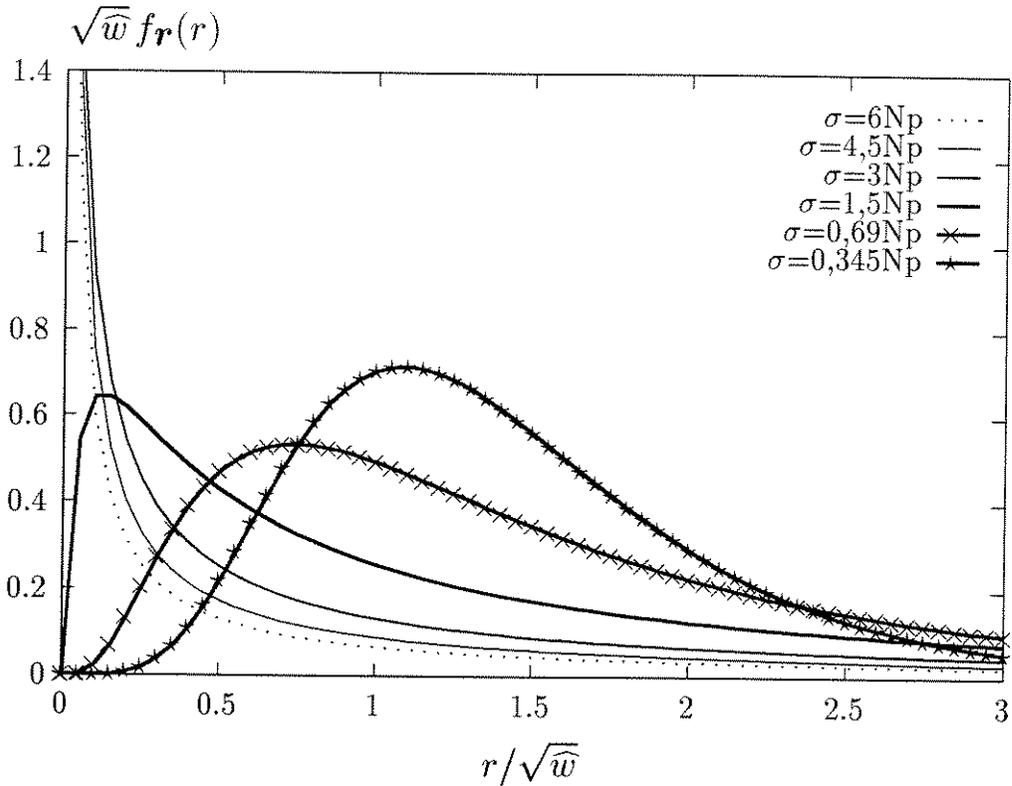


Figura 2.6: Função densidade de probabilidade da envoltória no ambiente Nakagami Sombreado, para $m = 3$, tendo como parâmetro o desvio padrão, dado em neper, da média local, dada em decibéis.

A densidade composta Rice/Normal é proposta como uma modelagem possível para a envoltória, r , do sinal de rádio móvel. A expressão proposta é a função densidade de probabilidade, $f_r(r)$, da envoltória, r , dada por

$$\begin{aligned}
 f_r(r) &= \sqrt{\frac{\pi}{8\sigma_{dB}^2}} \exp(-2k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r}{10^{\frac{R'}{10}}} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \exp(-k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \frac{r^2}{10^{\frac{R'}{10}}} \right] \\
 &\times I_0 \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{k}{2}\right) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right] \frac{r\sqrt{2k}}{10^{\frac{R'}{20}}} \right] \\
 &\times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R' - \bar{R} + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40}}{\sigma_{dB}} \right)^2 \right] dR' \quad r \geq 0
 \end{aligned} \tag{2.154}$$

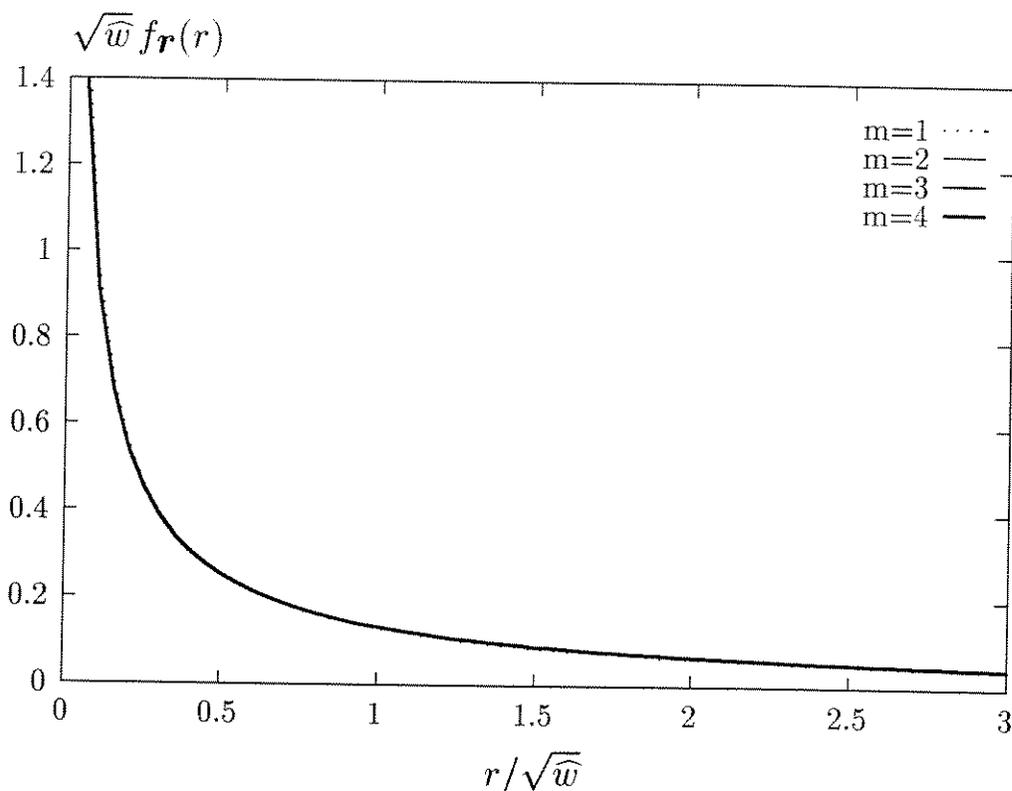


Figura 2.7: Função densidade de probabilidade da envoltória no ambiente Nakagami Sombreado, para $\sigma = 3$ Np, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento do sinal.

onde R' é a média local, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} ; \bar{R} é a média na área, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} ; σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis; k é o fator de Rice; $I_0(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero, que é dada pela Equação 2.23, e $I_1(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem um, que é dada pela Equação 2.24.

Para o caso particular em que $k = 0$, a densidade composta Rice/Normal, dada pela Equação 2.154, degenera-se para a densidade composta Rayleigh/Normal, dada pela Equação 2.61, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta Rice/Normal, dada pela Equação 2.154, é a combinação das densidades de Rice, dada pela Equação 2.28, e Normal, dada pela Equação 2.36. Assim,

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R') f_{\mathbf{R}'}(R') dR' \quad (2.155)$$

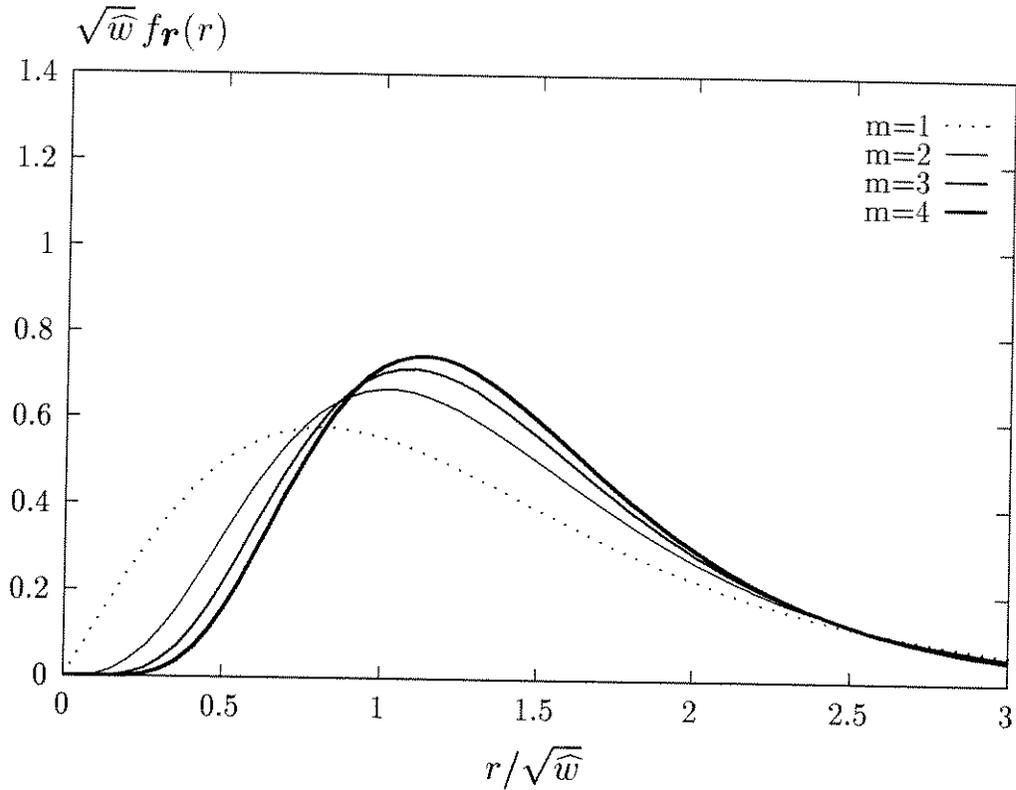


Figura 2.8: Função densidade de probabilidade da envoltória no ambiente Nakagami Sombreado, para $\sigma = 0,345$ Np, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento do sinal.

onde $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R')$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, e $f_{\mathbf{R}'}(R')$ é a função densidade de probabilidade da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R')$, da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, é dada pela densidade de Rice, ou seja, das Equações 2.28 e 2.30, tem-se

$$\begin{aligned}
 f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{R}' = R') &= \frac{\pi}{2} \exp(-2k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \frac{r}{10^{\frac{R'}{10}}} \\
 &\times \exp \left[-\frac{\pi}{4} \exp(-k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \frac{r^2}{10^{\frac{R'}{10}}} \right] \\
 &\times I_0 \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{k}{2}\right) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right] \frac{r\sqrt{2k}}{10^{\frac{R'}{20}}} \right] \quad r \geq 0 \quad (2.156)
 \end{aligned}$$

onde $R' \triangleq 20 \log r'$ é a média local, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} , e r' é a média local, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} .

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{R}'}(R')$, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, é dada pela densidade Normal, ou seja, da Equação 2.36, tem-se

$$f_{\mathbf{R}'}(R') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R' - \widetilde{R}'}{\sigma_{dB}} \right)^2 \right] \quad (2.157)$$

onde \widetilde{R}' é a média na área, dada em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

Das Equações 2.155-2.157, obtém-se

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{r}}(r) &= \sqrt{\frac{\pi}{8\sigma_{dB}^2}} \exp(-2k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r}{10^{\frac{R'}{10}}} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \exp(-k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \frac{r^2}{10^{\frac{R'}{10}}} \right] \\ &\times I_0 \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{k}{2}\right) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right] \frac{r\sqrt{2k}}{10^{\frac{R'}{20}}} \right] \\ &\times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R' - \widetilde{R}'}{\sigma_{dB}} \right)^2 \right] dR' \quad r \geq 0 \end{aligned} \quad (2.158)$$

onde R' é a média local, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} ; \widetilde{R}' é a média na área, dada em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

De forma semelhante ao que foi feito para a densidade composta Rayleigh/Normal (verificar que as Equações 2.66-2.77 também são válidas para a densidade Rice/Normal), tem-se

$$\bar{r} = 10^{\frac{\widetilde{R}'}{20}} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] \quad (2.159)$$

onde \bar{r} é a média na área da envoltória, \mathbf{r} . Ou ainda,

$$\bar{R} = \widetilde{R}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40} \quad (2.160)$$

onde $\bar{R} \triangleq 20 \log \bar{r}$ é a média na área, dada em decibéis, da envoltória, \mathbf{r} .

Das Equações 2.158 e 2.160, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , dada pela Equação 2.154.

Da Equação 2.31, obtém-se a média local, \mathbf{w}' , dada por

$$\mathbf{w}' = \frac{2}{\pi} \frac{(1+k) \exp(k) (\mathbf{r}')^2}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2} \quad (2.161)$$

Da Equação 2.161, obtém-se a média local, \mathbf{W}' , dada em decibéis, dada por

$$\mathbf{W}' = \mathbf{R}' + 10 \log \left[\frac{2(1+k) \exp(k)}{\pi} \right] - 20 \log \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right] \quad (2.162)$$

Ainda, a média na área, $\widetilde{\mathbf{W}}'$, dada em decibéis, da média local, \mathbf{W}' , dada em decibéis, é expressa por

$$\widetilde{\mathbf{W}}' \triangleq E[\mathbf{W}'] \quad (2.163)$$

e a média na área, $\widetilde{\mathbf{R}}'$, dada em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, é expressa por

$$\widetilde{\mathbf{R}}' \triangleq E[\mathbf{R}'] \quad (2.164)$$

Da Equação 2.160, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$\overline{\mathbf{R}} = \widetilde{\mathbf{R}}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40} \quad (2.165)$$

e, como será visto adiante na Equação 2.347, tem-se

$$\overline{\mathbf{W}} = \widetilde{\mathbf{W}}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20} \quad (2.166)$$

Assim, das Equações 2.162-2.166, obtém-se

$$\overline{\mathbf{W}} = \overline{\mathbf{R}} + 10 \log \left[\frac{2(1+k) \exp(k)}{\pi} \right] - 20 \log \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right] + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{40} \quad (2.167)$$

Das Equações 2.8 e 2.167, obtém-se

$$E[\mathbf{r}^2] = \frac{4}{\pi} \frac{(1+k) \exp(k)}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2} \exp \left[\left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] 10^{\frac{\overline{\mathbf{R}}}{10}} \quad (2.168)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\mathbf{r}) = \left[\frac{4}{\pi} \frac{(1+k) \exp(k)}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2} \exp \left[\left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] - 1 \right] 10^{\frac{\overline{\mathbf{R}}}{10}} \quad (2.169)$$

A densidade composta Rice/Log-normal é proposta como uma modelagem possível para a envoltória, \mathbf{r} , do sinal de rádio móvel. A expressão proposta é a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , dada por

$$\begin{aligned}
 f_{\mathbf{r}}(r) &= \sqrt{\frac{\pi}{8\sigma^2}} \exp(-2k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r}{(r')^3} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \exp(-k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \frac{r^2}{(r')^2}\right] \\
 &\times I_0\left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{k}{2}\right) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right] \frac{r\sqrt{2k}}{r'}\right] \\
 &\times \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{r' \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}{\bar{r}}\right] \right]^2\right] dr' \quad r \geq 0
 \end{aligned} \tag{2.170}$$

onde

$$r' \triangleq 10^{\frac{\mathbf{r}'}{20}} \tag{2.171}$$

é média local, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} ;

$$\bar{r} \triangleq 10^{\frac{\bar{\mathbf{r}}}{20}} \tag{2.172}$$

é a média na área, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} , e

$$\sigma \triangleq \frac{\sigma_{dB}}{(20/\ln 10)} \tag{2.173}$$

é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

Para o caso particular em que $k = 0$, a densidade composta Rice/Log-normal, dada pela Equação 2.170, degenera-se para a densidade composta Rayleigh/Log-normal, dada pela Equação 2.87, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta Rice/Log-normal, dada pela Equação 2.170, é a combinação das densidades de Rice, dada pela Equação 2.28, e Log-normal, dada pela Equação 2.48. Assim,

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \int_0^{\infty} f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r') f_{\mathbf{r}'}(r') dr' \tag{2.174}$$

onde $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r')$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{r}' , expressa em unidades naturais, e $f_{\mathbf{r}'}(r')$ é a função densidade de probabilidade da média local, \mathbf{r}' , expressa em unidades naturais.

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r')$, da envoltória, \mathbf{r} , condicional à média local, \mathbf{r}' , é dada pela densidade de Rice, ou seja, das Equações 2.28 e 2.30, tem-se

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{r}}(r | \mathbf{r}' = r') &= \frac{\pi}{2} \exp(-2k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \frac{r}{(r')^2} \\ &\times \exp \left[-\frac{\pi}{4} \exp(-k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \frac{r^2}{(r')^2} \right] \\ &\times I_0 \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{k}{2}\right) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right] \frac{r\sqrt{2k}}{r'} \right] \quad r \geq 0 \end{aligned} \quad (2.175)$$

onde r' é a média local, expressa em unidades naturais, da envoltória, \mathbf{r} .

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}'}(r')$, da média local, \mathbf{r}' , é dada pela densidade Log-normal, ou seja, da Equação 2.48, tem-se

$$f_{\mathbf{r}'}(r') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma r'} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{r' \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}{\bar{r}'} \right] \right]^2 \right] \quad r' \geq 0 \quad (2.176)$$

onde \bar{r}' é a média na área da média local, \mathbf{r}' , σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

Das Equações 2.174-2.176, obtém-se

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{r}}(r) &= \sqrt{\frac{\pi}{8\sigma^2}} \exp(-2k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r}{(r')^3} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \exp(-k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \frac{r^2}{(r')^2} \right] \\ &\times I_0 \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{k}{2}\right) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right] \frac{r\sqrt{2k}}{r'} \right] \\ &\times \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{r' \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}{\bar{r}'} \right] \right]^2 \right] dr' \quad r \geq 0 \end{aligned} \quad (2.177)$$

onde r' é a média local da envoltória, \mathbf{r} ; \bar{r}' é a média na área da média local, \mathbf{r}' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

De forma semelhante ao que foi feito para a densidade composta Rayleigh/Log-normal (verificar que as Equações 2.95-2.100 também são válidas para a densidade composta Rice/Log-normal), tem-se

$$\bar{r} = \bar{r}' \quad (2.178)$$

onde \bar{r} é a média na área da envoltória, \mathbf{r} , e \bar{r}' é a média na área da média local, \mathbf{r}' .

Das Equações 2.177 e 2.178, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , dada pela Equação 2.170.

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , pode ainda ser expressa por

$$\begin{aligned}
 f_{\mathbf{r}}(r) &= \sqrt{\frac{\pi}{8\sigma^2}} \exp(-2k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r}{(r')^3} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \exp(-k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \frac{r^2}{(r')^2} \right] \\
 &\times I_0 \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{k}{2}\right) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right] \frac{r\sqrt{2k}}{r'} \right] \\
 &\times \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln\left(\frac{r'}{\hat{r}}\right) \right]^2 \right] dr' \quad r \geq 0
 \end{aligned} \tag{2.179}$$

onde

$$\hat{r} \triangleq \frac{\bar{r}}{\exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)} \tag{2.180}$$

é a média normalizada da envoltória, \mathbf{r} .

Da Equação 2.31, obtém-se a média local, \mathbf{w}' , dada por

$$\mathbf{w}' = \frac{2}{\pi} \frac{(1+k) \exp(k) (\mathbf{r}')^2}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2} \tag{2.181}$$

A média na área, $\overline{w'}$ expressa em unidades naturais, da média local, \mathbf{w}' , é expressa por

$$\overline{w'} \triangleq E[\mathbf{w}'] \tag{2.182}$$

Da Equação 2.51, obtém-se também

$$E[(\mathbf{r}')^2] = (\overline{r'})^2 \exp(\sigma^2) \tag{2.183}$$

onde $\overline{r'}$ é a média na área da média local, \mathbf{r}' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

Da Equação 2.178, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$\bar{r} = \overline{r'} \tag{2.184}$$

e, como será visto adiante na Equação 2.367, tem-se

$$\bar{w} = \overline{w'} \tag{2.185}$$

Assim, das Equações 2.181-2.185, obtém-se

$$\bar{w} = \frac{2}{\pi} \frac{(1+k) \exp(k) (\bar{r})^2}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2} \exp(\sigma^2) \quad (2.186)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\mathbf{r}) = \left[\frac{4}{\pi} \frac{(1+k) \exp(k)}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2} \exp(\sigma^2) - 1 \right] (\bar{r})^2 \quad (2.187)$$

Da Equação 2.180, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$\hat{r} \triangleq \frac{\bar{r}}{\exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (2.188)$$

e, como será visto adiante na Equação 2.379, tem-se

$$\hat{w} \triangleq \frac{\bar{w}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.189)$$

Assim, das Equações 2.186, 2.188 e 2.189, obtém-se

$$\hat{w} = \frac{2}{\pi} \frac{(1+k) \exp(k) (\hat{r})^2}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2} \quad (2.190)$$

Portanto, das Equações 2.179 e 2.190,

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{r}}(r) &= \sqrt{\frac{\pi}{8\sigma^2}} \exp(-2k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \\ &\times \int_0^\infty \frac{r}{(r')^3} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \exp(-k) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]^2 \frac{r^2}{(r')^2}\right] \\ &\times I_0\left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{k}{2}\right) \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right] \frac{r\sqrt{2k}}{r'}\right] \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln\left[\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sqrt{(1+k)} \exp\left(\frac{k}{2}\right)}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right) (1+k) + I_1\left(\frac{k}{2}\right) k \right]} \frac{r'}{\sqrt{\hat{w}}}\right] \right]^2\right] dr' \quad r \geq 0 \quad (2.191) \end{aligned}$$

Fazendo $t = r' \sqrt{2(1+k)} \exp(k/2) / \left[\left[I_0(k/2) (1+k) + I_1(k/2) k \right] \sqrt{\pi \hat{w}} \right]$ e substituindo na Equação 2.191, obtém-se

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{r}}(r) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp(-k) (1+k) \int_0^\infty \frac{r}{t^3 \hat{w}} \exp\left[-\frac{(1+k) r^2}{2 t^2 \hat{w}}\right] \\ &\times I_0\left[\frac{r}{t \sqrt{\hat{w}}} \sqrt{2k(1+k)}\right] \exp\left[-\frac{[\ln(t)]^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad r \geq 0 \quad (2.192) \end{aligned}$$

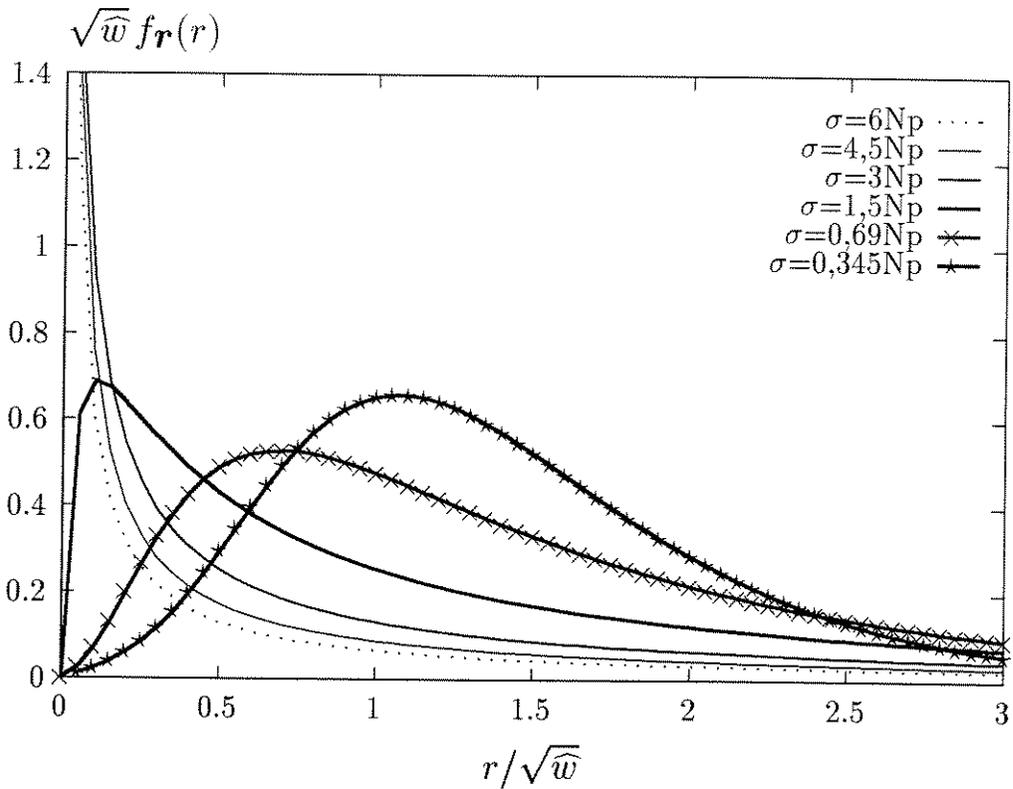


Figura 2.9: Função densidade de probabilidade da envoltória no ambiente Rice Sombreado, para $K = 5$ dB, tendo como parâmetro o desvio padrão, dado em neper, da média local, dada em decibéis.

Para o caso particular em que $k = 0$, as densidades dadas pelas Equações 2.191 e 2.192 degeneram-se, respectivamente, para as densidades dadas pelas Equações 2.113 e 2.114, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A função densidade de probabilidade da envoltória pode ainda ser expressa por

$$f_{\mathbf{r}}(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-10\frac{K}{10}\right) \left(1+10\frac{K}{10}\right) \int_0^\infty \frac{r}{t^3 \hat{w}} \exp\left[-\frac{\left(1+10\frac{K}{10}\right) r^2}{2t^2 \hat{w}}\right] \times I_0\left[\frac{r}{t\sqrt{\hat{w}}}\sqrt{2 \times 10\frac{K}{10}\left(1+10\frac{K}{10}\right)}\right] \exp\left[-\frac{[\ln(t)]^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad r \geq 0 \quad (2.193)$$

onde $K = 10 \log k$ é o fator de Rice, dado em decibéis.

Para o caso particular em que $K = -\infty$ dB, a densidade dada pela Equação 2.193 degenera-se para a Equação 2.114, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A Figura 2.9 mostra a função densidade de probabilidade da envoltória descrita pela

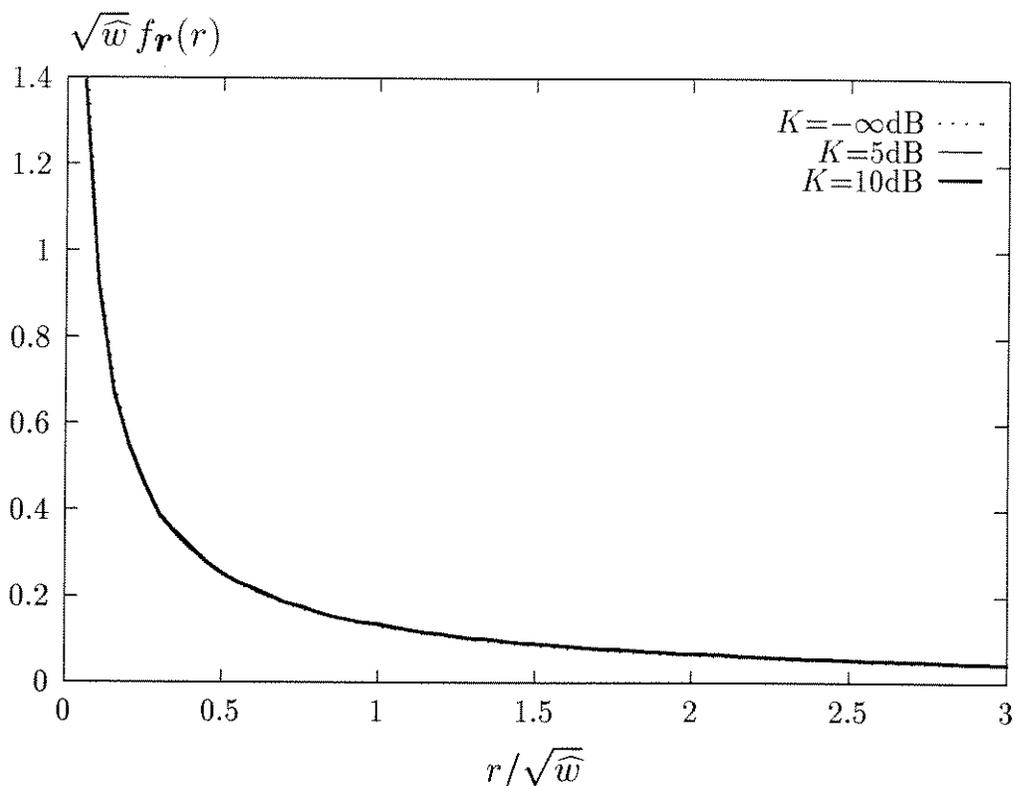


Figura 2.10: Função densidade de probabilidade da envoltória no ambiente Rice Sombreado, para $\sigma = 3 \text{ Np}$, tendo como parâmetro o fator de Rice, dado em decibéis.

Equação 2.193, para $K = 5 \text{ dB}$, tendo como parâmetro o desvio padrão, σ , dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis.

A Figura 2.10 mostra a função densidade de probabilidade da envoltória descrita pela Equação 2.193, para $\sigma = 3 \text{ Np}$, tendo como parâmetro o fator de Rice, K , dado em decibéis.

A Figura 2.11 mostra a função densidade de probabilidade da envoltória descrita pela Equação 2.193, para $\sigma = 0,345 \text{ Np}$, tendo como parâmetro o fator de Rice, K , dado em decibéis.

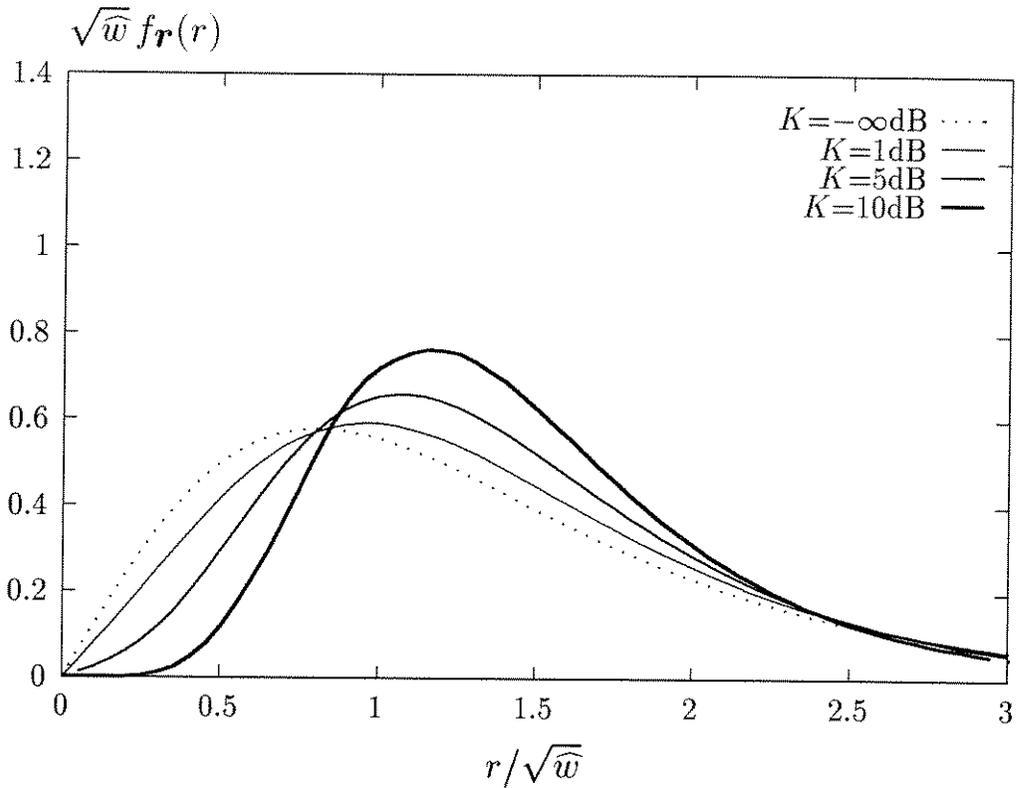


Figura 2.11: Função densidade de probabilidade da envoltória no ambiente Rice Sombreado, para $\sigma = 0,345 \text{ Np}$, tendo como parâmetro o fator de Rice, dado em decibéis.

2.3 Densidades da Relação Sinal/Ruído

A relação sinal/ruído, γ , é expressa por

$$\gamma \triangleq \frac{w}{n_0} \tag{2.194}$$

onde w é a potência do sinal e n_0 é a média da potência de ruído.

Das Equações 2.7 e 2.194, obtém-se

$$\gamma \triangleq \frac{r^2}{2n_0} \tag{2.195}$$

onde r e $r^2/2$ são, respectivamente, a envoltória e a potência do sinal de rádio móvel.

Da Equação 2.194, obtém-se a média, $\bar{\gamma}$, da relação sinal/ruído, γ , dada por

$$\bar{\gamma} \triangleq \frac{\bar{w}}{n_0} \quad (2.196)$$

onde \bar{w} é a média da potência, w , do sinal.

A relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis, é expressa por

$$\Gamma \triangleq 10 \log \gamma \quad (2.197)$$

Das Equações 2.194 e 2.197, obtém-se

$$\Gamma \triangleq \mathbf{W} - N_0 \quad (2.198)$$

onde $\mathbf{W} \triangleq 10 \log w$ é a potência, dada em decibéis, do sinal, e $N_0 \triangleq 10 \log n_0$ é a média, dada em decibéis, da potência do ruído.

Das Equações 2.195 e 2.197, obtém-se

$$\Gamma \triangleq \mathbf{R} - N_0 - 10 \log 2 \quad (2.199)$$

onde $\mathbf{R} = 20 \log r$ e $\mathbf{W} = \mathbf{R} - 10 \log 2$ são, respectivamente, a envoltória, dada em decibéis, e a potência, dada em decibéis, do sinal de rádio móvel.

Da Equação 2.198, obtém-se a média, $\tilde{\Gamma}$, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis,¹⁶ expressa por

$$\tilde{\Gamma} \triangleq \tilde{\mathbf{W}} - N_0 \quad (2.200)$$

onde $\tilde{\mathbf{W}}$ é a média da potência, \mathbf{W} , dada em decibéis.

Da Equação 2.199,¹⁷ obtém-se a média, $\tilde{\Gamma}$, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis, expressa por

$$\tilde{\Gamma} \triangleq \tilde{\mathbf{R}} - N_0 - 10 \log 2 \quad (2.201)$$

onde $\tilde{\mathbf{R}}$ é a média da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis.

Sendo conhecida a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, r , obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , expressa por

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{f_{\mathbf{r}}(r)}{\left| \frac{d\gamma}{dr} \right|} \Bigg|_{r=\sqrt{2\gamma n_0}} \quad (2.202)$$

¹⁶É importante diferenciar $\tilde{\Gamma}$ que é a média, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis, de $\bar{\Gamma}$ que é a média, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ .

¹⁷Ou, das Equações 2.38 e 2.200.

e, portanto, obtém-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \left. \frac{f_{\mathbf{R}}(r)}{\frac{r}{n_0}} \right|_{r=\sqrt{2\gamma n_0}} \quad (2.203)$$

Sendo conhecida a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{R}}(R)$, da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\Gamma}(\Gamma)$, da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis, expressa por

$$f_{\Gamma}(\Gamma) = \left. \frac{f_{\mathbf{R}}(R)}{\left| \frac{d\Gamma}{dR} \right|} \right|_{R=\Gamma+N_0+10 \log 2} \quad (2.204)$$

e, portanto, obtém-se

$$f_{\Gamma}(\Gamma) = f_{\mathbf{R}}(R) \Big|_{R=\Gamma+N_0+10 \log 2} \quad (2.205)$$

2.3.1 Ambiente Rayleigh

A relação sinal/ruído, γ , em ambiente Rayleigh, é modelada pela densidade Exponencial. A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , é expressa por¹⁸

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad \gamma \geq 0 \quad (2.206)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a média da relação sinal/ruído, γ , e

$$\text{var}(\gamma) = (\bar{\gamma})^2 \quad (2.207)$$

é a variância da relação sinal/ruído, γ .

A Figura 2.12 mostra a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído descrita pela Equação 2.206.

2.3.2 Ambiente Nakagami

A relação sinal/ruído, γ , em ambiente Nakagami, é modelada pela densidade Gama. A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , é expressa por¹⁹

$$f_{\gamma}(\gamma) = \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad \gamma \geq 0 \quad (2.208)$$

¹⁸Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.13, 2.196 e 2.203.

¹⁹Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.14, 2.196 e 2.203.

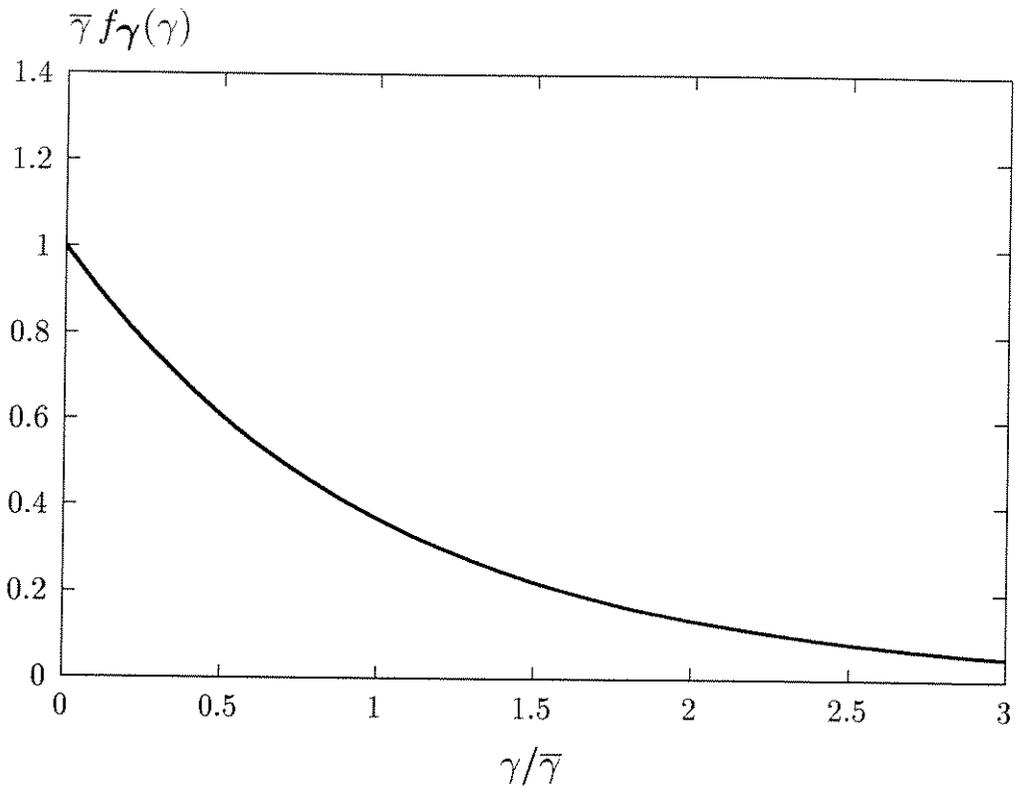


Figura 2.12: Função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído no ambiente Rayleigh.

onde $\bar{\gamma}$ é a média da relação sinal/ruído, γ ;

$$var(\gamma) = \left[\frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} - 1 \right] (\bar{\gamma})^2 \quad (2.209)$$

é a variância da relação sinal/ruído, γ ; m é o parâmetro de desvanecimento do sinal e $\Gamma(\alpha)$ é a função Gama, dada pela Equação 2.17.

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade Gama, dada pela Equação 2.208, degenera-se para a densidade Exponencial, dada pela Equação 2.206, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh.

A Figura 2.13 mostra a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído descrita pela Equação 2.208, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m , do sinal.

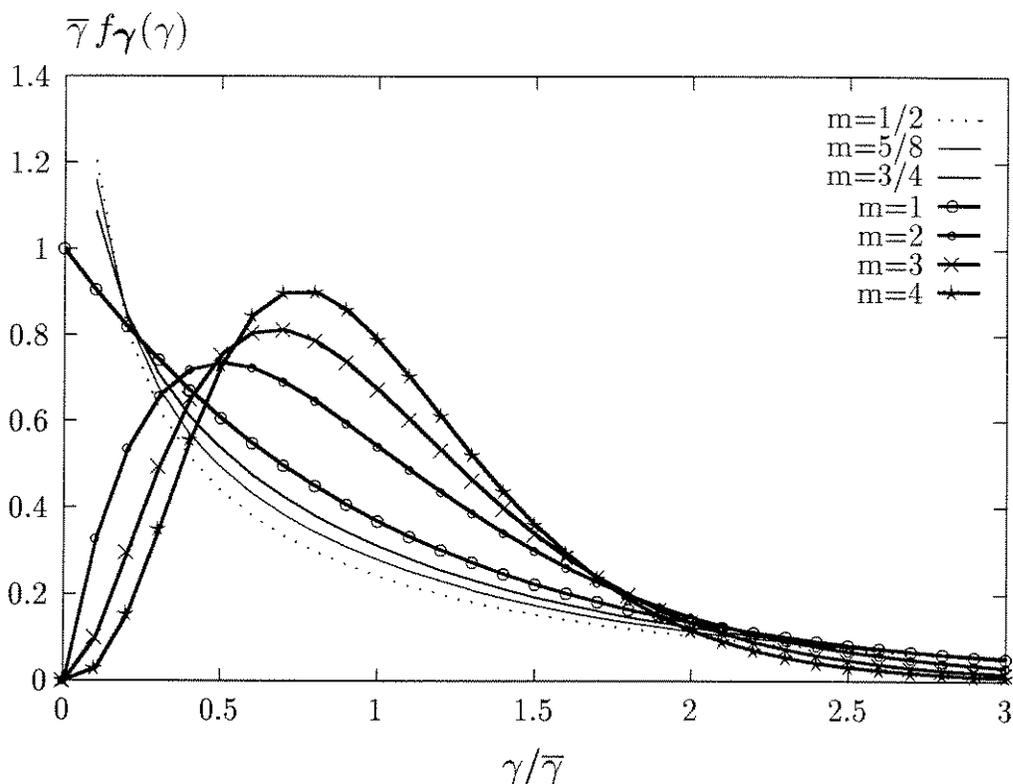


Figura 2.13: Função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído no ambiente Nakagami.

2.3.3 Ambiente Rice

A relação sinal/ruído, γ , em ambiente Rice, é modelada pela densidade Chi-quadrada não Central. A função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , é expressa por²⁰

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}}\right] \exp(-k) I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\bar{\gamma}}}\right] \quad \gamma \geq 0 \quad (2.210)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a média da relação sinal/ruído, γ ;

$$var(\gamma) = \frac{(1+2k)}{(1+k)^2} (\bar{\gamma})^2 \quad (2.211)$$

²⁰Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.33, 2.196 e 2.203.

é a variância da relação sinal/ruído, $\bar{\gamma}$; k é o fator de Rice e $I_0(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero, que é dada pela Equação 2.23.

Ainda, a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído pode ser expressa por²¹

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{(1+10^{\frac{K}{10}})}{\bar{\gamma}} \exp\left[-\frac{\gamma(1+10^{\frac{K}{10}})}{\bar{\gamma}}\right] \exp\left(-10^{\frac{K}{10}}\right) \times I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma 10^{\frac{K}{10}}(1+10^{\frac{K}{10}})}{\bar{\gamma}}}\right] \quad \gamma \geq 0 \quad (2.212)$$

onde K é o fator de Rice, dado em decibéis.

Para o caso particular em que se tem obstrução da linha de visada, isto é, para $k = 0$ e $K = -\infty$ dB, as densidades Chi-quadrada não Central, dadas pelas Equações 2.210 e 2.212, degeneram-se para a densidade Exponencial, dada pela Equação 2.206, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh.

A Figura 2.14 mostra a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído descrita pela Equação 2.212, tendo como parâmetro o fator de Rice, K , dado em decibéis.

2.3.4 Ambiente Log-normal

A relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis, em ambiente Log-normal, é modelada pela densidade Normal. A função densidade de probabilidade, $f_{\Gamma}(\Gamma)$, da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis, é expressa por²²

$$f_{\Gamma}(\Gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma - \tilde{\Gamma}}{\sigma_{dB}}\right)^2\right] \quad (2.213)$$

onde $\tilde{\Gamma}$ é a média, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis; $var(\Gamma) = \sigma_{dB}^2$ é a variância da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis.²³

Pode-se obter a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído,

²¹Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.34, 2.196 e 2.203.

²²Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.36, 2.201 e 2.205.

²³O desvio padrão, dado em decibéis, da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis, coincide com o desvio padrão, dado em decibéis, da envoltória, R , dada em decibéis, (verificação - ver Nota 22). Ambos, por estarem associados à modelagem do desvanecimento lento, são denominados de desvio padrão de sombreamento (dado em decibéis).

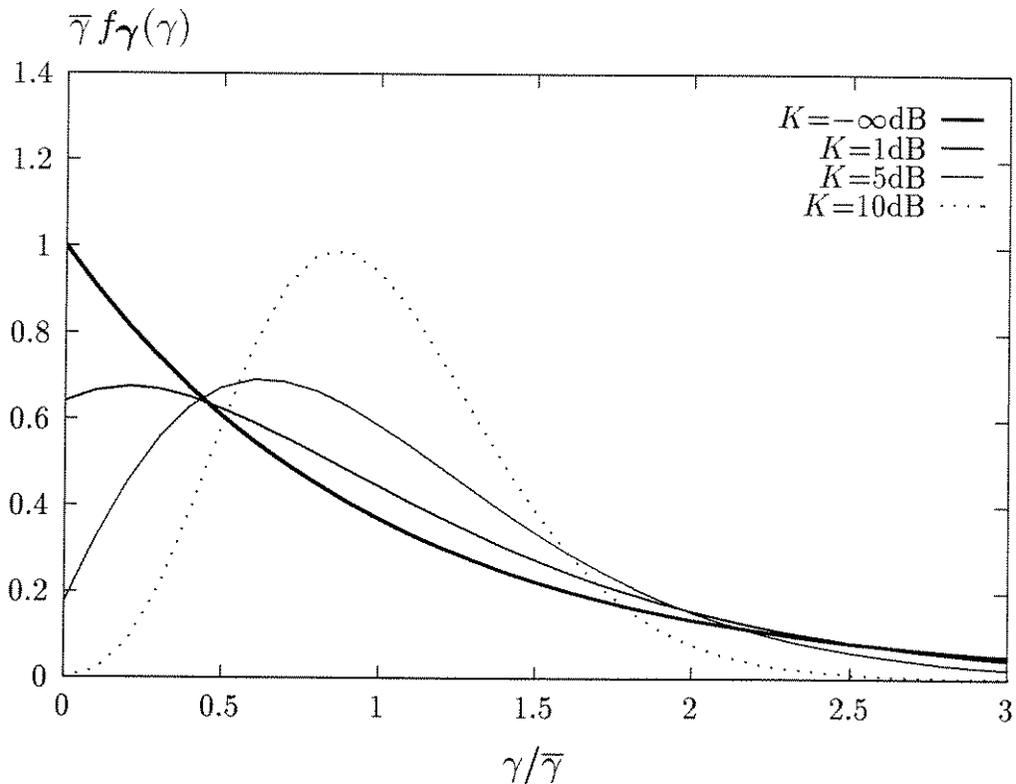


Figura 2.14: Função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído no ambiente Rice.

γ , expressa em unidades naturais, a partir da Equação 2.213, pois

$$f_{\gamma}(\gamma) = \left. \frac{f_{\Gamma}(\Gamma)}{\left| \frac{d\gamma}{d\Gamma} \right|} \right|_{\Gamma=10 \log \gamma} \quad (2.214)$$

e, portanto,

$$f_{\gamma}(\gamma) = \left. \frac{(10/\ln 10) f_{\Gamma}(\Gamma)}{10^{\frac{\Gamma}{10}}} \right|_{\Gamma=10 \log \gamma} \quad (2.215)$$

Assim, das Equações 2.213 e 2.215, obtém-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{(10/\ln 10)}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB} \gamma} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{dB}^2} \left[10 \log \left(\frac{\gamma}{\tilde{\gamma}} \right) \right]^2 \right] \quad \gamma \geq 0 \quad (2.216)$$

onde

$$\tilde{\gamma} = 10^{\frac{\tilde{\Gamma}}{10}} \quad (2.217)$$

é a média, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis,²⁴ e

²⁴Também é importante diferenciar $\tilde{\gamma}$ que é a média, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis, de $\bar{\gamma}$ que é a média, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ .

σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da relação sinal/ruído, $\mathbf{\Gamma}$, dada em decibéis. Ou seja, $\tilde{\gamma}$ e σ_{dB} são, respectivamente, a média, expressa em unidades naturais, e o desvio padrão, dado em decibéis, da densidade Normal correspondente. Ainda, das Equações 2.55, 2.200 e 2.217, obtém-se a média, $\tilde{\gamma}$, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, $\mathbf{\Gamma}$, dada em decibéis, expressa por

$$\tilde{\gamma} = \frac{\tilde{w}}{n_0} \quad (2.218)$$

onde \tilde{w} é a média, expressa em unidades naturais, da potência, \mathbf{W} , dada em decibéis.

Portanto, a relação sinal/ruído, γ , é modelada pela densidade Log-normal e a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , é expressa por²⁵

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma\gamma} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left(\frac{\gamma}{\tilde{\gamma}}\right)\right]^2\right] \quad \gamma \geq 0 \quad (2.219)$$

onde

$$\sigma \triangleq \frac{\sigma_{dB}}{(20/\ln 10)} \quad (2.220)$$

é o desvio padrão, dado em neper, da relação sinal/ruído, $\mathbf{\Gamma}$, dada em decibéis;²⁶

$$\bar{\gamma} \triangleq \tilde{\gamma} \exp(2\sigma^2) \quad (2.221)$$

é a média da relação sinal/ruído, γ , e

$$\text{var}(\gamma) = [\exp(4\sigma^2) - 1] \exp(4\sigma^2) (\tilde{\gamma})^2 \quad (2.222)$$

é a variância da relação sinal/ruído, γ .

Das Equações 2.219 e 2.221, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , dada por²⁷

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma\gamma} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}}\right]\right]^2\right] \quad \gamma \geq 0 \quad (2.223)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a média da relação sinal/ruído, γ , e

$$\text{var}(\gamma) = [\exp(4\sigma^2) - 1] (\bar{\gamma})^2 \quad (2.224)$$

é a variância da relação sinal/ruído, γ .

²⁵Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.43, 2.56, 2.203 e 2.218.

²⁶O desvio padrão, dado em neper, da relação sinal/ruído, $\mathbf{\Gamma}$, dada em decibéis, coincide com o desvio padrão, dado em neper, da envoltória, \mathbf{R} , dada em decibéis, (verificação - ver Nota 25). Ambos, por estarem associados à modelagem do desvanecimento lento, são denominados de desvio padrão de sombreamento (dado em neper).

²⁷Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.48, 2.49, 2.196 e 2.203.

Da Equação 2.224, tem-se

$$E[\gamma^2] = (\bar{\gamma})^2 \exp(4\sigma^2) \quad (2.225)$$

A função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , pode ainda ser expressa por

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma\gamma} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left(\frac{\gamma}{\hat{\gamma}}\right)\right]^2\right] \quad \gamma \geq 0 \quad (2.226)$$

onde

$$\hat{\gamma} \triangleq \frac{\bar{\gamma}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.227)$$

é a média normalizada da relação sinal/ruído, γ .

Das Equações 2.196 e 2.227, obtém-se

$$\hat{\gamma} = \frac{\hat{w}}{n_0} \quad (2.228)$$

onde

$$\hat{w} \triangleq \frac{\bar{w}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.229)$$

é a média normalizada da potência, w .

Ainda, das Equações 2.221 e 2.227, obtém-se

$$\hat{\gamma} = \tilde{\gamma} \quad (2.230)$$

A Figura 2.15 mostra a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído descrita pela Equação 2.226, tendo como parâmetro o desvio padrão, σ , dado em neper, da relação sinal/ruído, Γ , dada em decibéis.

2.3.5 Ambiente Suzuki

A relação sinal/ruído, γ , em ambiente Suzuki, é modelada pela densidade composta Exponencial/Normal. A função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , é expressa por²⁸

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}} \exp\left(-\frac{\gamma}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}\right) \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma' - \bar{\Gamma} + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20}}{\sigma_{dB}}\right)^2\right] d\Gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (2.231)$$

²⁸Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.61, 2.79, 2.84, 2.203, 2.232 e 2.233.

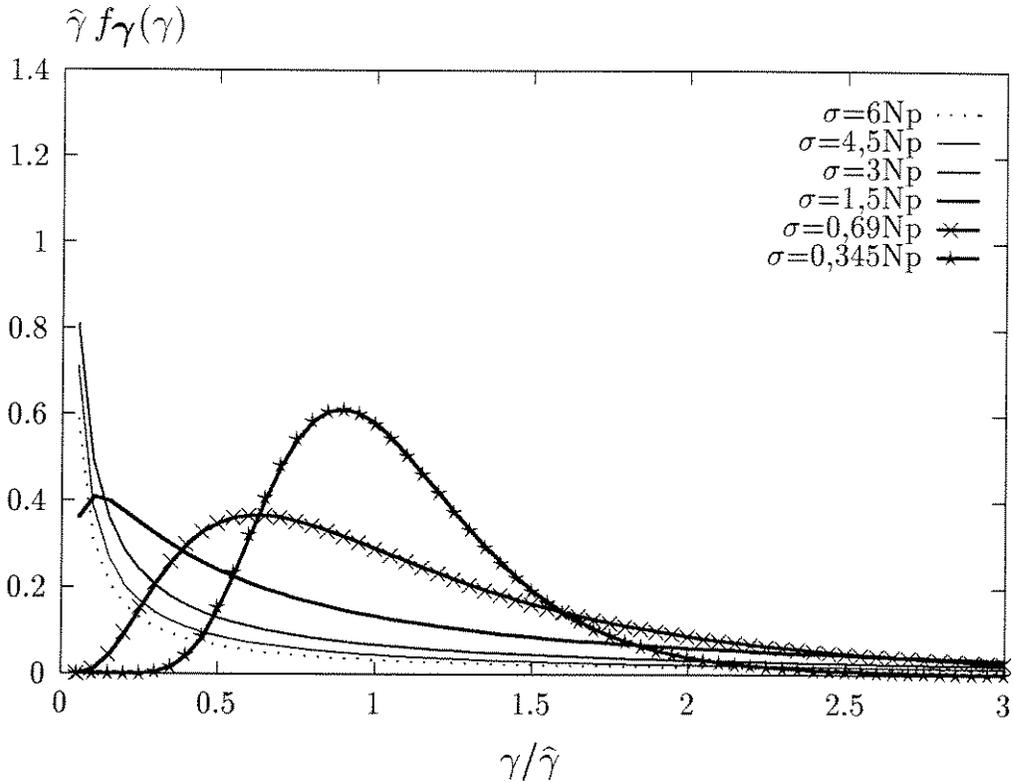


Figura 2.15: Função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído no ambiente Log-normal.

onde

$$\Gamma' \triangleq W' - N_0 \quad (2.232)$$

é a média local, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ ; W' , é a média local, dada em decibéis, da potência, w ;

$$\bar{\Gamma} \triangleq \bar{W} - N_0 \quad (2.233)$$

é a média na área, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ ; \bar{W} , é a média na área, dada em decibéis, da potência, w , e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, Γ' , dada em decibéis.²⁹

A densidade composta Exponencial/Normal, dada pela Equação 2.231, é a combinação das densidades Exponencial, dada pela Equação 2.206, e Normal, dada pela Equação 2.213.

²⁹O desvio padrão, dado em decibéis, da média local, Γ' , dada em decibéis, coincide com o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, (verificação - ver Nota 28). Ambos, por estarem associados à modelagem do desvanecimento lento, são denominados de desvio padrão de sombreamento (dado em decibéis).

Assim,

$$f_{\gamma}(\gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\gamma}(\gamma | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma') f_{\mathbf{\Gamma}'}(\Gamma') d\Gamma' \quad (2.234)$$

onde $f_{\gamma}(\gamma | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma')$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis,³⁰ e $f_{\mathbf{\Gamma}'}(\Gamma')$ é a função densidade de probabilidade da média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis.

A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma')$, da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis, é dada pela densidade Exponencial, ou seja, da Equação 2.206, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma') = \frac{1}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}} \exp\left(-\frac{\gamma}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}\right) \quad \gamma \geq 0 \quad (2.235)$$

onde $\Gamma' \triangleq 10 \log \gamma'$ é a média local, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ , e γ' é a média local, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ .

A função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{\Gamma}'}(\Gamma')$, da média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis, é dada pela densidade Normal, ou seja, da Equação 2.213, tem-se

$$f_{\mathbf{\Gamma}'}(\Gamma') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma' - \widetilde{\Gamma}'}{\sigma_{dB}}\right)^2\right] \quad (2.236)$$

onde

$$\widetilde{\Gamma}' \triangleq \widetilde{W}' - N_0 \quad (2.237)$$

é a média na área, dada em decibéis, da média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis; \widetilde{W}' é a média na área, dada em decibéis, da média local, \mathbf{W}' , dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis.

Das Equações 2.234-2.236, obtém-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}} \exp\left(-\frac{\gamma}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}\right) \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma' - \widetilde{\Gamma}'}{\sigma_{dB}}\right)^2\right] d\Gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (2.238)$$

onde Γ' é a média local, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ ; $\widetilde{\Gamma}'$ é a média na área, dada em decibéis, da média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis.

O cálculo da média da densidade composta Exponencial/Normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

³⁰As notações usualmente utilizadas na literatura para a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis, são $f_{\gamma|\mathbf{\Gamma}'}(\gamma | \Gamma')$, $f_{\gamma}(\gamma | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma')$ e $f_{\gamma}(\gamma | \Gamma')$.

A média na área, $\bar{\gamma}$, da relação sinal/ruído, γ , é dada por

$$\bar{\gamma} \triangleq E[\gamma] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (2.239)$$

Das Equações 2.234 e 2.239, obtém-se

$$\bar{\gamma} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma}(\gamma | \Gamma' = \Gamma') d\gamma \right] f_{\Gamma'}(\Gamma') d\Gamma' \quad (2.240)$$

Sabendo-se que

$$E[\gamma | \Gamma' = \Gamma'] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma}(\gamma | \Gamma' = \Gamma') d\gamma \quad (2.241)$$

é a média condicional³¹ e que

$$E[\gamma | \Gamma' = \Gamma'] \triangleq 10^{\frac{\Gamma'}{10}} \quad (2.242)$$

tem-se

$$\bar{\gamma} = \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{\Gamma'}{10}} f_{\Gamma'}(\Gamma') d\Gamma' \quad (2.243)$$

Ainda,

$$f_{\Gamma'}(\Gamma') = \left. \frac{f_{\gamma'}(\gamma')}{\left| \frac{d\gamma'}{d\Gamma'} \right|} \right|_{\gamma' = 10^{\frac{\Gamma'}{10}}} \quad (2.244)$$

e, portanto,

$$f_{\Gamma'}(\Gamma') = \left. \frac{\gamma' f_{\gamma'}(\gamma')}{(10/\ln 10)} \right|_{\gamma' = 10^{\frac{\Gamma'}{10}}} \quad (2.245)$$

Das Equações 2.243 e 2.245, obtém-se

$$\bar{\gamma} = \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{\Gamma'}{5}} \frac{f_{\gamma'}\left(10^{\frac{\Gamma'}{10}}\right)}{(10/\ln 10)} d\Gamma' \quad (2.246)$$

Substituindo $\Gamma' = 10 \log \gamma'$ na Equação 2.246, tem-se

$$\bar{\gamma} = \int_0^{\infty} \gamma' f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.247)$$

Ou seja,

$$\bar{\gamma} = E[\gamma'] = \bar{\gamma}' \quad (2.248)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a média na área da média local, γ' .

³¹As Notações usualmente utilizadas na literatura para média da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, Γ' , dada em decibéis, são $E[\gamma | \Gamma' = \Gamma']$ e $E[\gamma | \Gamma']$. Ainda, é importante diferenciar $E[\gamma | \Gamma' = \Gamma'] = E[\gamma | \Gamma']$ que é a média condicional não aleatória de $E[\gamma | \Gamma']$ que é a média condicional aleatória [15].

Das Equações 2.217, 2.220, 2.221 e 2.248, tem-se

$$\bar{\gamma} = 10^{\frac{\tilde{\Gamma}'}{10}} \exp \left[2 \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] \quad (2.249)$$

ou ainda,

$$\bar{\Gamma} = \tilde{\Gamma}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20} \quad (2.250)$$

onde $\bar{\Gamma} \triangleq 10 \log \bar{\gamma}$ é a média na área, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ .

Das Equações 2.238 e 2.250, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , dada pela Equação 2.231.

Das Equações 2.196, 2.237 e 2.249, obtém-se

$$\bar{w} = 10^{\frac{\tilde{W}'}{10}} \exp \left[2 \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] \quad (2.251)$$

ou ainda,

$$\bar{W} = \tilde{W}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20} \quad (2.252)$$

onde $\bar{W} \triangleq 10 \log \bar{w}$ é a média na área, dada em decibéis, da potência, w .

O cálculo da variância da densidade composta Exponencial/Normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

Sabe-se que

$$E[\gamma^2] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (2.253)$$

Das Equações 2.234 e 2.253, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \Gamma' = \Gamma') d\gamma \right] f_{\Gamma'}(\Gamma') d\Gamma' \quad (2.254)$$

Sabendo-se que

$$E[\gamma^2 | \Gamma' = \Gamma'] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \Gamma' = \Gamma') d\gamma \quad (2.255)$$

e que, da Equação 2.207,

$$E[\gamma^2 | \Gamma' = \Gamma'] = 2 \times 10^{\frac{\Gamma'}{5}} \quad (2.256)$$

tem-se

$$E[\gamma^2] = 2 \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{\Gamma'}{5}} f_{\Gamma'}(\Gamma') d\Gamma' \quad (2.257)$$

Das Equações 2.245 e 2.257, obtém-se

$$E[\gamma^2] = 2 \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{3\Gamma'}{10}} \frac{f_{\Gamma'}\left(10^{\frac{\Gamma'}{10}}\right)}{(10/\ln 10)} d\Gamma' \quad (2.258)$$

Substituindo $\Gamma' = 10 \log \gamma'$ na Equação 2.258, tem-se

$$E[\gamma^2] = 2 \int_0^\infty (\gamma')^2 f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.259)$$

Ou seja,

$$E[\gamma^2] = 2 E[(\gamma')^2] \quad (2.260)$$

Das Equações 2.220, 2.225 e 2.260, obtém-se

$$E[\gamma^2] = 2 \times 10^{\frac{\bar{\Gamma}}{5}} \exp \left[4 \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] \quad (2.261)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\gamma) = \left[2 \exp \left[4 \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] - 1 \right] 10^{\frac{\bar{\Gamma}}{5}} \quad (2.262)$$

Obtém-se, ainda, a função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , dada pela densidade composta Exponencial/Log-normal, ou seja, tem-se³²

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^\infty \frac{1}{(\gamma')^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma'}\right) \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}}\right]\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (2.263)$$

onde

$$\gamma' \triangleq 10^{\frac{\Gamma'}{10}} \triangleq \frac{w'}{n_0} \quad (2.264)$$

é a média local, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ ; w' é a média local, expressa em unidades naturais, da potência, w ;

$$\bar{\gamma} \triangleq 10^{\frac{\bar{\Gamma}}{10}} \triangleq \frac{\bar{w}}{n_0} \quad (2.265)$$

é a média na área, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ ; \bar{w} é a média na área, expressa em unidades naturais, da potência, w , e

$$\sigma \triangleq \frac{\sigma_{dB}}{(20/\ln 10)} \quad (2.266)$$

é o desvio padrão, dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.³³

A densidade composta Exponencial/Log-normal, dada pela Equação 2.263, é a combinação das densidades Exponencial, dada pela Equação 2.206, e Log-normal, dada pela Equação 2.223. Assim,

$$f_\gamma(\gamma) = \int_0^\infty f_\gamma(\gamma | \gamma' = \gamma') f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.267)$$

³²Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.87, 2.103, 2.108, 2.203, 2.264 e 2.265.

³³O desvio padrão, dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis, coincide com o desvio padrão, dado em neper, da média local, \mathbf{R}' , dada em decibéis, (verificação - ver Nota 32). Ambos, por estarem associados à modelagem do desvanecimento lento, são denominados de desvio padrão de sombreamento (dado em neper).

onde $f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma')$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, γ' , expressa em unidades naturais,³⁴ e $f_{\gamma'}(\gamma')$ é a função densidade de probabilidade da média local, γ' , expressa em unidades naturais.

A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma')$, da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, γ' , é dada pela densidade Exponencial, ou seja, das Equações 2.206, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') = \frac{1}{\gamma'} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma'}\right) \quad \gamma \geq 0 \quad (2.268)$$

onde γ' é a média local, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ .

A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma'}(\gamma')$, da média local, γ' , é dada pela densidade Log-normal, ou seja, da Equação 2.223, tem-se

$$f_{\gamma'}(\gamma') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \gamma'} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}'}\right]\right]^2\right] \quad \gamma' \geq 0 \quad (2.269)$$

onde $\bar{\gamma}'$ é a média na área da média local, γ' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.

Das Equações 2.267-2.269, obtém-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^{\infty} \frac{1}{(\gamma')^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma'}\right) \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}'}\right]\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (2.270)$$

onde γ' é a média local da relação sinal/ruído, γ ; $\bar{\gamma}'$ é a média na área da média local, γ' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.

O cálculo da média da densidade composta Exponencial/Log-normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

A média na área, $\bar{\gamma}$, da relação sinal/ruído, γ , é dada por

$$\bar{\gamma} \triangleq E[\gamma] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (2.271)$$

Das Equações 2.267 e 2.271, obtém-se

$$\bar{\gamma} = \int_0^{\infty} \left[\int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') d\gamma \right] f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.272)$$

Sabendo-se que

$$E[\gamma | \gamma' = \gamma'] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') d\gamma \quad (2.273)$$

³⁴As notações usualmente utilizadas na literatura para a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, γ' , são $f_{\gamma|\gamma'}(\gamma|\gamma')$, $f_{\gamma}(r|\gamma'=\gamma')$ e $f_{\gamma}(\gamma|\gamma')$.

é a média condicional³⁵ e que

$$E[\gamma | \gamma' = \gamma'] \triangleq \gamma' \quad (2.274)$$

tem-se

$$\bar{\gamma} = \int_0^{\infty} \gamma' f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.275)$$

Ou seja,

$$\bar{\gamma} = E[\gamma'] = \bar{\gamma}' \quad (2.276)$$

onde $\bar{\gamma}'$ é a média na área da média local, γ' .

Das Equações 2.264, 2.265 e 2.276, obtém-se também,

$$\bar{w} = \bar{w}' \quad (2.277)$$

Das Equações 2.270 e 2.276, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , dada pela Equação 2.263.

O cálculo da variância da densidade composta Exponencial/Log-normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

Sabe-se que

$$E[\gamma^2] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (2.278)$$

Das Equações 2.267 e 2.278, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \int_0^{\infty} \left[\int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') d\gamma \right] f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.279)$$

Sabendo-se que

$$E[\gamma^2 | \gamma' = \gamma'] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') d\gamma \quad (2.280)$$

e que, da Equação 2.207,

$$E[\gamma^2 | \gamma' = \gamma'] = 2(\gamma')^2 \quad (2.281)$$

tem-se

$$E[\gamma^2] = 2 \int_0^{\infty} (\gamma')^2 f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.282)$$

Ou seja,

$$E[\gamma^2] = 2 E[(\gamma')^2] \quad (2.283)$$

³⁵As Notações usualmente utilizadas na literatura para média da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, γ' , são $E[\gamma | \gamma' = \gamma']$ e $E[\gamma | \gamma']$. Ainda, é importante diferenciar $E[\gamma | \gamma' = \gamma'] = E[\gamma | \gamma']$ que é a média condicional não aleatória de $E[\gamma | \gamma']$ que é a média condicional aleatória [15].

Das Equações 2.225 e 2.283, obtém-se

$$E[\gamma^2] = 2 (\bar{\gamma})^2 \exp(4\sigma^2) \quad (2.284)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\gamma) = [2 \exp(4\sigma^2) - 1] (\bar{\gamma})^2 \quad (2.285)$$

A função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , pode ainda ser expressa por

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^\infty \frac{1}{(\gamma')^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma'}\right) \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left(\frac{\gamma'}{\hat{\gamma}}\right)\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (2.286)$$

onde

$$\hat{\gamma} \triangleq \frac{\bar{\gamma}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.287)$$

é a média normalizada da relação sinal/ruído, γ .

Das Equações 2.196 e 2.287, obtém-se

$$\hat{\gamma} = \frac{\hat{w}}{n_0} \quad (2.288)$$

onde

$$\hat{w} \triangleq \frac{\bar{w}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.289)$$

é a média normalizada da potência, w .

Fazendo $v = \gamma'/\hat{\gamma}$ e substituindo na Equação 2.286, obtém-se

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^\infty \frac{1}{v^2 \hat{\gamma}} \exp\left[-\frac{\gamma}{v \hat{\gamma}}\right] \exp\left[-\frac{[\ln(v)]^2}{8\sigma^2}\right] dv \quad \gamma \geq 0 \quad (2.290)$$

A Figura 2.16 mostra a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído descrita pela Equação 2.290, tendo como parâmetro o desvio padrão, σ , dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.

2.3.6 Ambiente Nakagami Sombreado

A relação sinal/ruído, γ , em ambiente Nakagami Sombreado, é modelada pela densidade composta Gama/Normal. A função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação

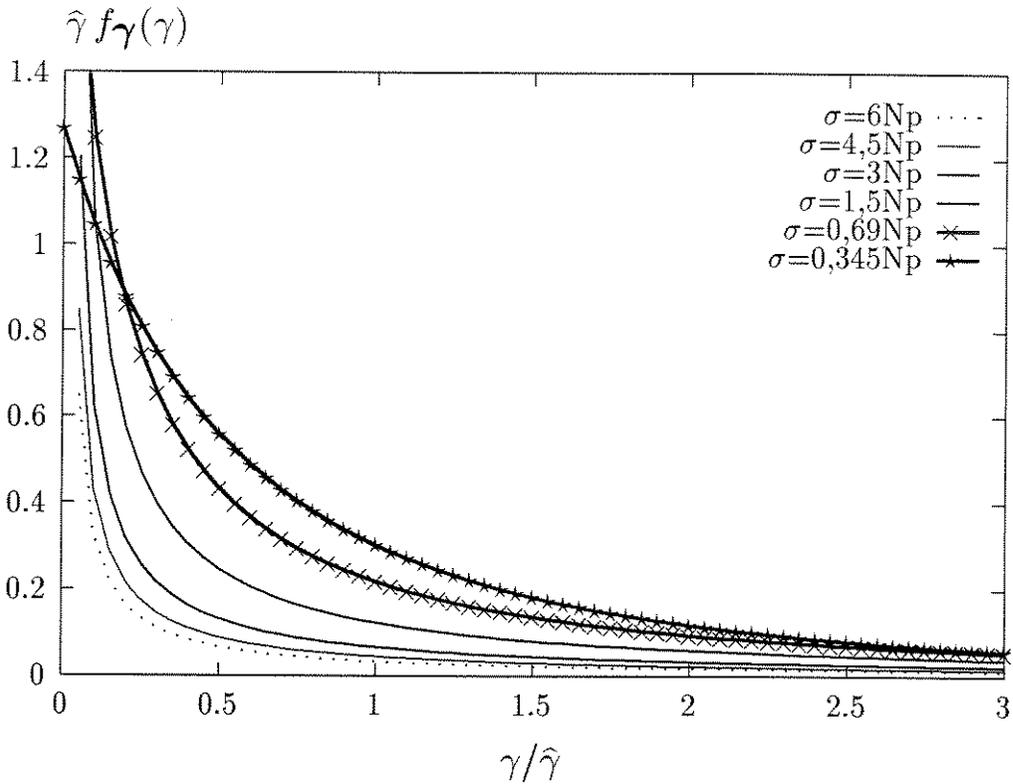


Figura 2.16: Função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído no ambiente Suzuki.

sinal/ruído, γ , é expressa por³⁶

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{m^m}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB} \Gamma(m)} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\gamma^{m-1}}{10^{\frac{m\Gamma'}{10}}} \exp\left(-\frac{m\gamma}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}\right) \times \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma' - \bar{\Gamma} + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20}}{\sigma_{dB}}\right)^2\right] d\Gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (2.291)$$

onde

$$\Gamma' \triangleq W' - N_0 \quad (2.292)$$

é a média local, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ ; W' , é a média local, dada em decibéis, da potência, w ;

$$\bar{\Gamma} \triangleq \bar{W} - N_0 \quad (2.293)$$

é a média na área, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ ; \bar{W} , é a média na área, dada em decibéis, da potência, w ; σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, Γ' , dada em

³⁶Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.115, 2.123, 2.128, 2.203, 2.292 e 2.293.

decibéis;³⁷ m é o parâmetro de desvanecimento do sinal (ou grau de desvanecimento do sinal) e $\Gamma(\alpha)$ é a função Gama, dada pela Equação 2.17.

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade composta Gama/Normal, dada pela Equação 2.291, degenera-se para a densidade composta Exponencial/Normal, dada pela Equação 2.231, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta Gama/Normal, dada pela Equação 2.291, é a combinação das densidades Gama, dada pela Equação 2.208, e Normal, dada pela Equação 2.213. Assim,

$$f_{\gamma}(\gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\gamma}(\gamma | \Gamma' = \Gamma') f_{\Gamma'}(\Gamma') d\Gamma' \quad (2.294)$$

onde $f_{\gamma}(\gamma | \Gamma' = \Gamma')$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, Γ' , dada em decibéis, e $f_{\Gamma'}(\Gamma')$ é a função densidade de probabilidade da média local, Γ' , dada em decibéis.

A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma | \Gamma' = \Gamma')$, da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, Γ' , dada em decibéis, é dada pela densidade Gama, ou seja, da Equação 2.208, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma | \Gamma' = \Gamma') = \left(\frac{m}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}\right)^m \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}\right) \quad \gamma \geq 0 \quad (2.295)$$

onde $\Gamma' \triangleq 10 \log \gamma'$ é a média local, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ , e γ' é a média local, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ .

A função densidade de probabilidade, $f_{\Gamma'}(\Gamma')$, da média local, Γ' , dada em decibéis, é dada pela densidade Normal, ou seja, da Equação 2.213, tem-se

$$f_{\Gamma'}(\Gamma') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma' - \widetilde{\Gamma}'}{\sigma_{dB}}\right)^2\right] \quad (2.296)$$

onde

$$\widetilde{\Gamma}' \triangleq \widetilde{W}' - N_0 \quad (2.297)$$

é a média na área, dada em decibéis, da média local, Γ' , dada em decibéis; \widetilde{W}' é a média na área, dada em decibéis, da média local, W' , dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, Γ' , dada em decibéis.

Das Equações 2.294-2.296, obtém-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{m^m}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB} \Gamma(m)} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\gamma^{m-1}}{10^{\frac{m\Gamma'}{10}}} \exp\left(-\frac{m\gamma}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}\right) \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma' - \widetilde{\Gamma}'}{\sigma_{dB}}\right)^2\right] d\Gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (2.298)$$

³⁷As observações constantes na Nota 29 são válidas para todos os ambientes compostos sombreados (verificação para ambiente Nakagami Sombreado - ver Nota 36).

onde Γ' é a média local, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ ; $\widetilde{\Gamma}'$ é a média na área, dada em decibéis, da média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis.

O cálculo da média e da variância da densidade composta Gama/Normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

De forma semelhante ao que foi feito para a densidade composta Exponencial/Normal (verificar que as Equações 2.239-2.249 também são válidas para a densidade composta Gama/Normal), tem-se

$$\bar{\gamma} = 10^{\frac{\widetilde{\Gamma}'}{10}} \exp \left[2 \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] \quad (2.299)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a média na área da relação sinal/ruído, γ . Ou ainda,

$$\bar{\Gamma} = \widetilde{\Gamma}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20} \quad (2.300)$$

onde $\bar{\Gamma} \triangleq 10 \log \bar{\gamma}$ é a média na área, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ .

Das Equações 2.298 e 2.300, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , dada pela Equação 2.291.

Ainda, das Equações 2.196, 2.297 e 2.299, obtém-se

$$\bar{w} = 10^{\frac{\widetilde{W}'}{10}} \exp \left[2 \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] \quad (2.301)$$

ou ainda,

$$\bar{W} = \widetilde{W}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20} \quad (2.302)$$

onde $\bar{W} \triangleq 10 \log \bar{w}$ é a média na área, dada em decibéis, da potência, w .

Ainda,

$$E[\gamma^2] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (2.303)$$

Das Equações 2.294 e 2.303, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma') d\gamma \right] f_{\mathbf{\Gamma}'}(\Gamma') d\Gamma' \quad (2.304)$$

Sabendo-se que

$$E[\gamma^2 | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma'] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma') d\gamma \quad (2.305)$$

e que, da Equação 2.209,

$$E[\gamma^2 | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma'] = \frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} 10^{\frac{\Gamma'}{5}} \quad (2.306)$$

tem-se

$$E[\gamma^2] = \frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{\Gamma'}{5}} f_{\Gamma'}(\Gamma') d\Gamma' \quad (2.307)$$

Das Equações 2.245 e 2.307, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{3\Gamma'}{10}} \frac{f_{\gamma'}\left(10^{\frac{\Gamma'}{10}}\right)}{(10/\ln 10)} d\Gamma' \quad (2.308)$$

Substituindo $\Gamma' = 10 \log \gamma'$ na Equação 2.308, tem-se

$$E[\gamma^2] = \frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} \int_0^{\infty} (\gamma')^2 f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.309)$$

Ou seja,

$$E[\gamma^2] = \frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} E[(\gamma')^2] \quad (2.310)$$

Das Equações 2.220, 2.225 e 2.310, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} 10^{\frac{\bar{\Gamma}}{5}} \exp\left[4\left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20}\right)^2\right] \quad (2.311)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\gamma) = \left[\frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} \exp\left[4\left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20}\right)^2\right] - 1 \right] 10^{\frac{\bar{\Gamma}}{5}} \quad (2.312)$$

Obtém-se, ainda, a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , dada pela densidade composta Gama/Log-normal, ou seja, tem-se³⁸

$$\begin{aligned} f_{\gamma}(\gamma) &= \frac{m^m}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \Gamma(m)} \int_0^{\infty} \frac{\gamma^{m-1}}{(\gamma')^{m+1}} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\gamma'}\right) \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}}\right]\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \end{aligned} \quad (2.313)$$

onde

$$\gamma' \triangleq 10^{\frac{\Gamma'}{10}} \triangleq \frac{w'}{n_0} \quad (2.314)$$

é a média local, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ ; w' é a média local, expressa em unidades naturais, da potência, w ;

$$\bar{\gamma} \triangleq 10^{\frac{\bar{\Gamma}}{10}} \triangleq \frac{\bar{w}}{n_0} \quad (2.315)$$

³⁸Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.131, 2.142, 2.147, 2.203, 2.314 e 2.315.

é a média na área, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ ; \bar{w} é a média na área, expressa em unidades naturais, da potência, w , e

$$\sigma \triangleq \frac{\sigma_{dB}}{(10/\ln 10)} \quad (2.316)$$

é o desvio padrão, dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.³⁹

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade composta Gama/Log-normal, dada pela Equação 2.313, degenera-se para a densidade composta Exponencial/Log-normal, dada pela Equação 2.263, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta Gama/Log-normal, dada pela Equação 2.313, é a combinação das densidades Gama, dada pela Equação 2.208, e Log-normal, dada pela Equação 2.223. Assim,

$$f_{\gamma}(\gamma) = \int_0^{\infty} f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.317)$$

onde $f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma')$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, γ' , expressa em unidades naturais, e $f_{\gamma'}(\gamma')$ é a função densidade de probabilidade da média local, γ' , expressa em unidades naturais.

A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma')$, da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, γ' , é dada pela densidade Gama, ou seja, da Equação 2.208, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') = \left(\frac{m}{\gamma'}\right)^m \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\gamma'}\right) \quad \gamma \geq 0 \quad (2.318)$$

onde γ' é a média local, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ .

A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma'}(\gamma')$, da média local, γ' , é dada pela densidade Log-normal, ou seja, da Equação 2.223, tem-se

$$f_{\gamma'}(\gamma') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \gamma'} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}'}\right]\right]^2\right] \quad \gamma' \geq 0 \quad (2.319)$$

onde $\bar{\gamma}'$ é a média na área da média local, γ' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.

Das Equações 2.317-2.319, obtém-se

$$\begin{aligned} f_{\gamma}(\gamma) &= \frac{m^m}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \Gamma(m)} \int_0^{\infty} \frac{\gamma^{m-1}}{(\gamma')^{m+1}} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\gamma'}\right) \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}'}\right]\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \end{aligned} \quad (2.320)$$

³⁹As observações constantes na Nota 33 são válidas para todos os ambientes compostos sombreados (verificação para ambiente Nakagami Sombreado - ver Nota 38).

onde γ' é a média local da relação sinal/ruído, γ ; $\bar{\gamma}'$ é a média na área da média local, γ' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.

O cálculo da média e da variância da densidade composta Gama/Log-normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

De forma semelhante ao que foi feito para a densidade Exponencial/Log-normal (verificar que as Equações 2.271-2.276 também são válidas para a densidade composta Gama/Log-normal), tem-se

$$\bar{\gamma} = \bar{\gamma}' \quad (2.321)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a média na área da relação sinal/ruído, γ , e $\bar{\gamma}'$ é a média na área da média local, γ'

Das Equações 2.314, 2.315 e 2.321, obtém-se também,

$$\bar{w} = \bar{w}' \quad (2.322)$$

Das Equações 2.320 e 2.321, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , dada pela Equação 2.313.

Ainda,

$$E[\gamma^2] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (2.323)$$

Das Equações 2.317 e 2.323, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \int_0^{\infty} \left[\int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') d\gamma \right] f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.324)$$

Sabendo-se que

$$E[\gamma^2 | \gamma' = \gamma'] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') d\gamma \quad (2.325)$$

e que, da Equação 2.209,

$$E[\gamma^2 | \gamma' = \gamma'] = \frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} (\gamma')^2 \quad (2.326)$$

tem-se

$$E[\gamma^2] = \frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} \int_0^{\infty} (\gamma')^2 f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.327)$$

Ou seja,

$$E[\gamma^2] = \frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} E[(\gamma')^2] \quad (2.328)$$

Das Equações 2.225 e 2.328, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} (\bar{\gamma})^2 \exp(4\sigma^2) \quad (2.329)$$

Alternativamente, obtém-se

$$var(\gamma) = \left[\frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} \exp(4\sigma^2) - 1 \right] (\bar{\gamma})^2 \quad (2.330)$$

A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , pode ainda ser expressa por

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{m^m}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \Gamma(m)} \int_0^{\infty} \frac{\gamma^{m-1}}{(\gamma')^{m+1}} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\gamma'}\right) \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left(\frac{\gamma'}{\hat{\gamma}}\right)\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (2.331)$$

onde

$$\hat{\gamma} \triangleq \frac{\bar{\gamma}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.332)$$

é a média normalizada da relação sinal/ruído, γ .

Das Equações 2.196 e 2.332, obtém-se

$$\hat{\gamma} = \frac{\hat{w}}{n_0} \quad (2.333)$$

onde

$$\hat{w} \triangleq \frac{\bar{w}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.334)$$

é a média normalizada da potência, w .

Fazendo $u = \gamma'/\hat{\gamma}$ e substituindo na Equação 2.331, obtém-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{m^m}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \Gamma(m)} \int_0^{\infty} \frac{\gamma^{m-1}}{u^{m+1} (\hat{\gamma})^m} \exp\left[-\frac{m\gamma}{u\hat{\gamma}}\right] \exp\left[-\frac{[\ln(u)]^2}{8\sigma^2}\right] du \quad \gamma \geq 0 \quad (2.335)$$

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade dada pela Equação 2.335 degenera-se para a densidade dada pela Equação 2.290, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A Figura 2.17 mostra a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído descrita pela Equação 2.335, para $m = 3$, tendo como parâmetro o desvio padrão, σ , dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.

A Figura 2.18 mostra a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído descrita pela Equação 2.335, para $\sigma = 3$ Np, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m , do sinal.

A Figura 2.19 mostra a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído descrita pela Equação 2.335, para $\sigma = 0,345$ Np, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m , do sinal.

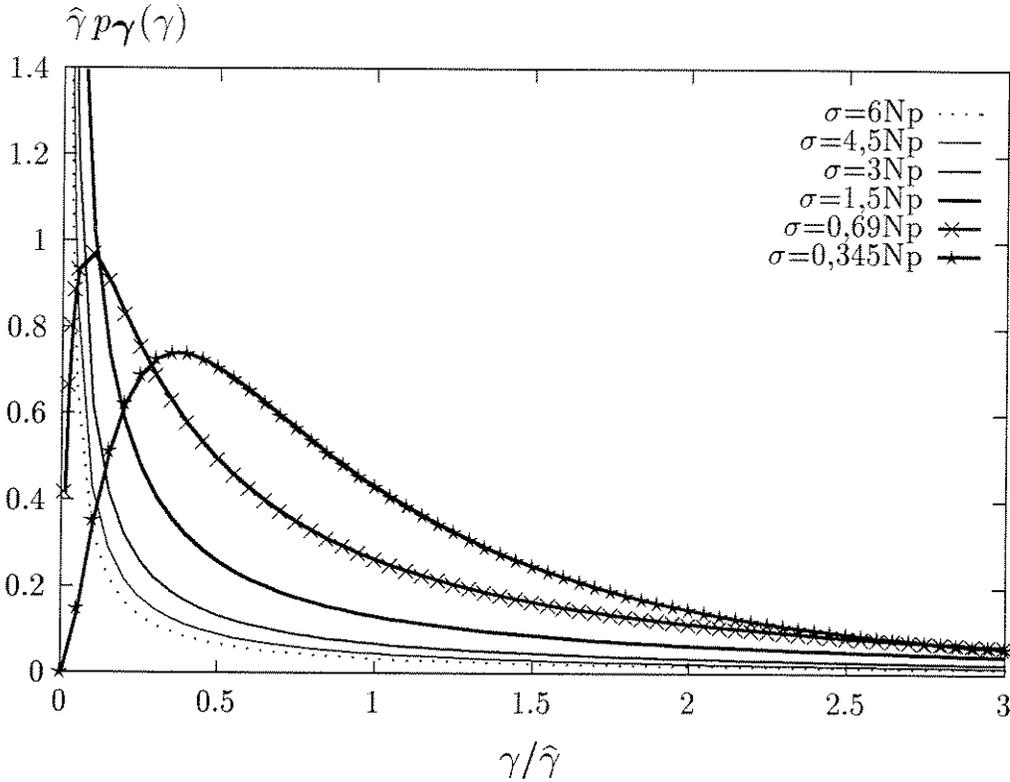


Figura 2.17: Função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído no ambiente Nakagami Sombreado, para $m = 3$, tendo como parâmetro o desvio padrão, dado em neper, da média local, dada em decibéis.

2.3.7 Ambiente Rice Sombreado

A relação sinal/ruído, γ , em ambiente Rice Sombreado, é modelada pela densidade composta Chi-quadrada não Central/Normal. A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , é expressa por⁴⁰

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{(1+k) \exp(-k)}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}\right] \times I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}}\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Gamma' - \bar{\Gamma} + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20}}{\sigma_{dB}}\right)^2\right] d\Gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (2.336)$$

onde

$$\Gamma' \triangleq W' - N_0 \quad (2.337)$$

⁴⁰Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.154, 2.162, 2.167, 2.203, 2.337 e 2.338.

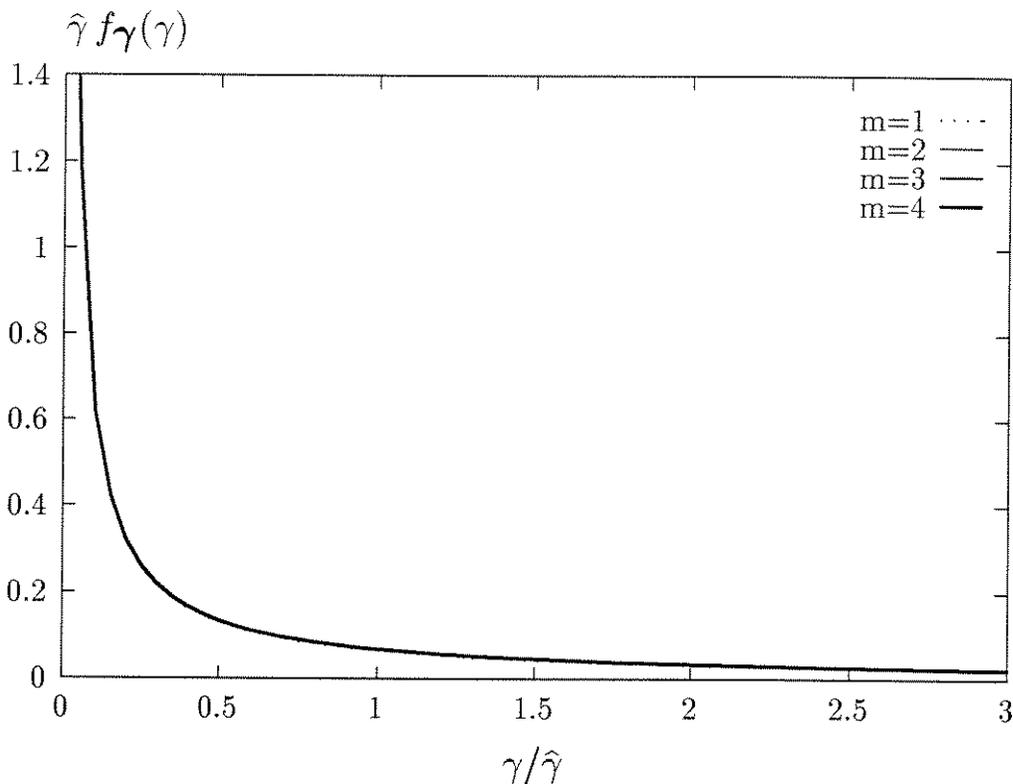


Figura 2.18: Função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído no ambiente Nakagami Sombreado, para $\sigma = 3 \text{ Np}$, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento do sinal.

é a média local, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ ; W' , é a média local, dada em decibéis, da potência, w ;

$$\bar{\Gamma} \triangleq \bar{W} - N_0 \tag{2.338}$$

é a média na área, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ ; \bar{W} , é a média na área, dada em decibéis, da potência, w ; σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, Γ' , dada em decibéis;⁴¹ k é o fator de Rice e $I_0(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero, que é dada pela Equação 2.23.

Para o caso particular em que $k = 0$, a densidade composta Chi-quadrada não Central/Normal, dada pela Equação 2.336, degenera-se para a densidade composta Exponencial/Normal, dada pela Equação 2.231, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta Chi-quadrada não Central/Normal, dada pela Equação 2.336,

⁴¹As observações constantes na Nota 29 são válidas para todos os ambientes compostos sombreados (verificação para ambiente Rice Sombreado - ver Nota 40).

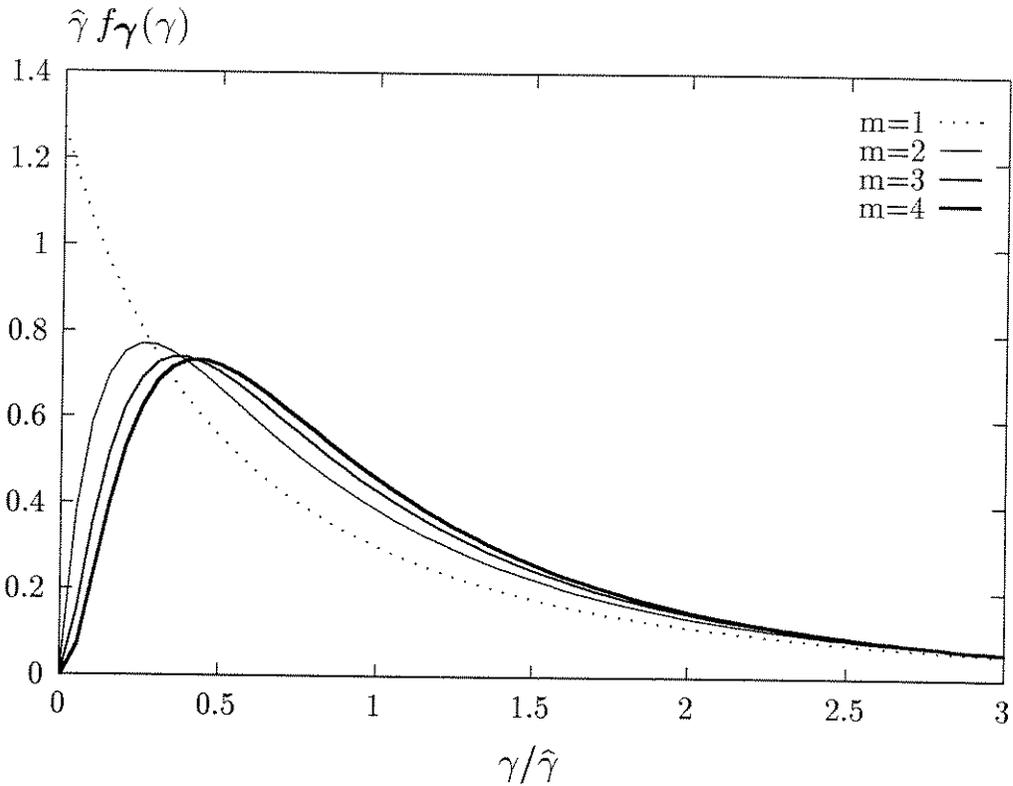


Figura 2.19: Função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído no ambiente Nakagami Sombreado, para $\sigma = 0,345$ Np, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento do sinal.

é a combinação das densidades Chi-quadrada não Central, dada pela Equação 2.210, e Normal, dada pela Equação 2.213. Assim,

$$f_{\gamma}(\gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\gamma}(\gamma | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma') f_{\mathbf{\Gamma}'}(\Gamma') d\Gamma' \quad (2.339)$$

onde $f_{\gamma}(\gamma | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma')$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis, e $f_{\mathbf{\Gamma}'}(\Gamma')$ é a função densidade de probabilidade da média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis.

A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma')$, da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, $\mathbf{\Gamma}'$, dada em decibéis, é dada pela densidade Chi-quadrada não Central, ou seja, da Equação 2.210, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma | \mathbf{\Gamma}' = \Gamma') = \frac{(1+k)}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}\right] \exp(-k) I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}}\right] \quad \gamma \geq 0 \quad (2.340)$$

onde $\Gamma' \triangleq 10 \log \gamma'$ é a média local, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ , e γ' é a média local, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ .

A função densidade de probabilidade, $f_{\Gamma'}(\Gamma')$, da média local, Γ' , dada em decibéis, é dada pela densidade Normal, ou seja, da Equação 2.213, tem-se

$$f_{\Gamma'}(\Gamma') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma' - \widetilde{\Gamma}'}{\sigma_{dB}} \right)^2 \right] \quad (2.341)$$

onde

$$\widetilde{\Gamma}' \triangleq \widetilde{W}' - N_0 \quad (2.342)$$

é a média na área, dada em decibéis, da média local, Γ' , dada em decibéis; \widetilde{W}' é a média na área, dada em decibéis, da média local, W' , dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, Γ' , dada em decibéis.

Das Equações 2.339-2.341, obtém-se

$$\begin{aligned} f_{\gamma}(\gamma) &= \frac{(1+k) \exp(-k)}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}} \exp \left[-\frac{\gamma (1+k)}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}} \right] \\ &\times I_0 \left[2 \sqrt{\frac{\gamma k (1+k)}{10^{\frac{\Gamma'}{10}}}} \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma' - \widetilde{\Gamma}'}{\sigma_{dB}} \right)^2 \right] d\Gamma' \quad \gamma \geq 0 \end{aligned} \quad (2.343)$$

onde Γ' é a média local, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ ; $\widetilde{\Gamma}'$ é a média na área, dada em decibéis, da média local, Γ' , dada em decibéis, e σ_{dB} é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, Γ' , dada em decibéis.

O cálculo da média e da variância da densidade composta Chi-quadrada não Central/Normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

De forma semelhante ao que foi feito para a densidade composta Exponencial/Normal (verificar que as Equações 2.239-2.249 também são válidas para a densidade composta Chi-quadrada não Central/Normal), tem-se

$$\bar{\gamma} = 10^{\frac{\bar{\Gamma}'}{10}} \exp \left[2 \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] \quad (2.344)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a média na área da relação sinal/ruído, γ . Ou ainda,

$$\bar{\Gamma}' = \widetilde{\Gamma}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20} \quad (2.345)$$

onde $\bar{\Gamma}' \triangleq 10 \log \bar{\gamma}$ é a média na área, dada em decibéis, da relação sinal/ruído, γ .

Das Equações 2.343 e 2.345, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , dada pela Equação 2.336.

Ainda, das Equações 2.196, 2.342 e 2.344, obtém-se

$$\bar{w} = 10^{\frac{\bar{w}'}{10}} \exp \left[2 \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] \quad (2.346)$$

ou ainda,

$$\bar{W} = \bar{W}' + \frac{\sigma_{dB}^2 \ln 10}{20} \quad (2.347)$$

onde $\bar{W} \triangleq 10 \log \bar{w}$ é a média na área, dada em decibéis, da potência, w .

Ainda,

$$E[\gamma^2] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (2.348)$$

Das Equações 2.339 e 2.348, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \Gamma' = \Gamma') d\gamma \right] f_{\Gamma'}(\Gamma') d\Gamma' \quad (2.349)$$

Sabendo-se que

$$E[\gamma^2 | \Gamma' = \Gamma'] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \Gamma' = \Gamma') d\gamma \quad (2.350)$$

e que, da Equação 2.211,

$$E[\gamma^2 | \Gamma' = \Gamma'] = \frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} 10^{\frac{\Gamma'}{5}} \quad (2.351)$$

tem-se

$$E[\gamma^2] = \frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{\Gamma'}{5}} f_{\Gamma'}(\Gamma') d\Gamma' \quad (2.352)$$

Das Equações 2.245 e 2.352, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{3\Gamma'}{10}} \frac{f_{\gamma'}\left(10^{\frac{\Gamma'}{10}}\right)}{(10/\ln 10)} d\Gamma' \quad (2.353)$$

Substituindo $\Gamma' = 10 \log \gamma'$ na Equação 2.353, tem-se

$$E[\gamma^2] = \frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} \int_0^{\infty} (\gamma')^2 f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.354)$$

Ou seja,

$$E[\gamma^2] = \frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} E[(\gamma')^2] \quad (2.355)$$

Das Equações 2.220, 2.225 e 2.355, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} 10^{\frac{\bar{\Gamma}}{5}} \exp \left[4 \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] \quad (2.356)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\gamma) = \left[\frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} \exp \left[4 \left(\frac{\sigma_{dB} \ln 10}{20} \right)^2 \right] - 1 \right] 10^{\frac{\bar{\Gamma}}{5}} \quad (2.357)$$

Obtém-se, ainda, a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , dada pela densidade composta Chi-quadrada não Central/Log-normal, ou seja, tem-se⁴²

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{(1+k) \exp(-k)}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^{\infty} \frac{1}{(\gamma')^2} \exp \left[-\frac{\gamma(1+k)}{\gamma'} \right] \times I_0 \left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\gamma'}} \right] \exp \left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}} \right] \right]^2 \right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (2.358)$$

onde

$$\gamma' \triangleq 10^{\frac{\Gamma'}{10}} \triangleq \frac{w'}{n_0} \quad (2.359)$$

é a média local, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ ; w' é a média local, expressa em unidades naturais, da potência, w ;

$$\bar{\gamma} \triangleq 10^{\frac{\bar{\Gamma}}{10}} \triangleq \frac{\bar{w}}{n_0} \quad (2.360)$$

é a média na área, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ ; \bar{w} é a média na área, expressa em unidades naturais, da potência, w , e

$$\sigma \triangleq \frac{\sigma_{dB}}{(20/\ln 10)} \quad (2.361)$$

é o desvio padrão, dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.⁴³

Para o caso particular em que $k = 0$, a densidade composta Chi-quadrada não Central/Log-normal, dada pela Equação 2.358, degenera-se para a densidade composta Exponencial/Log-normal, dada pela Equação 2.263, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta Chi-quadrada não Central/Log-normal, dada pela Equação 2.358, é a combinação das densidades Chi-quadrada não Central, dada pela Equação 2.210, e Log-normal, dada pela Equação 2.223. Assim,

$$f_{\gamma}(\gamma) = \int_0^{\infty} f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.362)$$

⁴²Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.170, 2.181, 2.186, 2.203, 2.359 e 2.360.

⁴³As observações constantes na Nota 33 são válidas para todos os ambientes compostos sombreados (verificação para ambiente Rice Sombreado - ver Nota 42).

onde $f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma')$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, γ' , expressa em unidades naturais, e $f_{\gamma'}(\gamma')$ é a função densidade de probabilidade da média local, γ' , expressa em unidades naturais.

A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma')$, da relação sinal/ruído, γ , condicional à média local, γ' , é dada pela densidade Chi-quadrada não Central, ou seja, das Equações 2.210, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') = \frac{(1+k)}{\gamma'} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\gamma'}\right] \exp(-k) I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\gamma'}}\right] \quad \gamma \geq 0 \quad (2.363)$$

onde γ' é a média local, expressa em unidades naturais, da relação sinal/ruído, γ .

A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma'}(\gamma')$, da média local, γ' , é dada pela densidade Log-normal, ou seja, da Equação 2.223, tem-se

$$f_{\gamma'}(\gamma') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \gamma'} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}'}\right]\right]^2\right] \quad \gamma' \geq 0 \quad (2.364)$$

onde $\bar{\gamma}'$ é a média na área da média local, γ' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.

Das Equações 2.362-2.364, obtém-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{(1+k) \exp(-k)}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^{\infty} \frac{1}{(\gamma')^2} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\gamma'}\right] \times I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\gamma'}}\right] \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}'}\right]\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (2.365)$$

onde γ' é a média local da relação sinal/ruído, γ ; $\bar{\gamma}'$ é a média na área da média local, γ' , e σ é o desvio padrão, dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.

O cálculo da média e da variância da densidade composta Chi-quadrada não Central/Log-normal que é feito a seguir é contribuição deste trabalho de tese.

De forma semelhante ao que foi feito para a densidade composta Exponencial/Log-normal (verificar que as Equações 2.271-2.276 também são válidas para a densidade composta Chi-quadrada não Central/Log-normal), tem-se

$$\bar{\gamma} = \bar{\gamma}' \quad (2.366)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a média na área da relação sinal/ruído, γ , e $\bar{\gamma}'$ é a média na área da média local, γ'

Das Equações 2.359, 2.360 e 2.366, obtém-se também

$$\bar{w} = \bar{w}' \quad (2.367)$$

Das Equações 2.365 e 2.366, obtém-se a função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , dada pela Equação 2.358.

Ainda,

$$E[\gamma^2] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (2.368)$$

Das Equações 2.362 e 2.368, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \int_0^{\infty} \left[\int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') d\gamma \right] f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.369)$$

Sabendo-se que

$$E[\gamma^2 | \gamma' = \gamma'] \triangleq \int_0^{\infty} \gamma^2 f_{\gamma}(\gamma | \gamma' = \gamma') d\gamma \quad (2.370)$$

e que, da Equação 2.211,

$$E[\gamma^2 | \gamma' = \gamma'] = \frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} (\gamma')^2 \quad (2.371)$$

tem-se

$$E[\gamma^2] = \frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} \int_0^{\infty} (\gamma')^2 f_{\gamma'}(\gamma') d\gamma' \quad (2.372)$$

Ou seja,

$$E[\gamma^2] = \frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} E[(\gamma')^2] \quad (2.373)$$

Das Equações 2.225 e 2.373, obtém-se

$$E[\gamma^2] = \frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} (\bar{\gamma})^2 \exp(4\sigma^2) \quad (2.374)$$

Alternativamente, obtém-se

$$\text{var}(\gamma) = \left[\frac{(2+4k+k^2)}{(1+k)^2} \exp(4\sigma^2) - 1 \right] (\bar{\gamma})^2 \quad (2.375)$$

A função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal/ruído, γ , pode ainda ser expressa por

$$\begin{aligned} f_{\gamma}(\gamma) &= \frac{(1+k) \exp(-k)}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^{\infty} \frac{1}{(\gamma')^2} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\gamma'}\right] \\ &\times I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\gamma'}}\right] \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left(\frac{\gamma'}{\hat{\gamma}}\right)\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \end{aligned} \quad (2.376)$$

onde

$$\hat{\gamma} \triangleq \frac{\bar{\gamma}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.377)$$

é a média normalizada da relação sinal/ruído, γ

Das Equações 2.196 e 2.377, obtém-se

$$\hat{\gamma} = \frac{\hat{w}}{n_0} \quad (2.378)$$

onde

$$\hat{w} \triangleq \frac{\bar{w}}{\exp(2\sigma^2)} \quad (2.379)$$

é a média normalizada da potência, w .

Fazendo $t = \gamma'/\hat{\gamma}$ e substituindo na Equação 2.376, obtém-se

$$\begin{aligned} f_{\gamma}(\gamma) &= \frac{(1+k) \exp(-k)}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^{\infty} \frac{1}{t^2(\hat{\gamma})} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{t\hat{\gamma}}\right] \\ &\times I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{t\hat{\gamma}}}\right] \exp\left[-\frac{[\ln(t)]^2}{8\sigma^2}\right] dt \quad \gamma \geq 0 \end{aligned} \quad (2.380)$$

Para o caso particular em que $k = 0$, a densidade dada pela Equação 2.380 degenera-se para a densidade dada pela Equação 2.290, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

Ainda, a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído pode ser expressa por⁴⁴

$$\begin{aligned} f_{\gamma}(\gamma) &= \frac{(1+10^{\frac{K}{10}}) \exp(-10^{\frac{K}{10}})}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^{\infty} \frac{1}{t^2(\hat{\gamma})} \exp\left[-\frac{\gamma(1+10^{\frac{K}{10}})}{t\hat{\gamma}}\right] \\ &\times I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma 10^{\frac{K}{10}}(1+10^{\frac{K}{10}})}{t\hat{\gamma}}}\right] \exp\left[-\frac{[\ln(t)]^2}{8\sigma^2}\right] dt \quad \gamma \geq 0 \end{aligned} \quad (2.381)$$

onde K é o fator de Rice, dado em decibéis.

Para o caso particular em que $K = -\infty$ dB, a densidade dada pela Equação 2.381, degenera-se para a densidade dada pela Equação 2.290, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A Figura 2.20 mostra a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído descrita pela Equação 2.381, para $K = 5$ dB, tendo como parâmetro o desvio padrão, σ , dado em neper, da média local, Γ' , dada em decibéis.

A Figura 2.21 mostra a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído descrita pela Equação 2.381, para $\sigma = 3$ Np, tendo como parâmetro o fator de Rice, K , dado em decibéis.

A Figura 2.22 mostra a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído descrita pela Equação 2.381, para $\sigma = 0,345$ Np, tendo como parâmetro o fator de Rice, K , dado em decibéis.

⁴⁴Esta expressão pode ser obtida a partir das Equações 2.181, 2.186, 2.193, 2.203, 2.359 e 2.360.

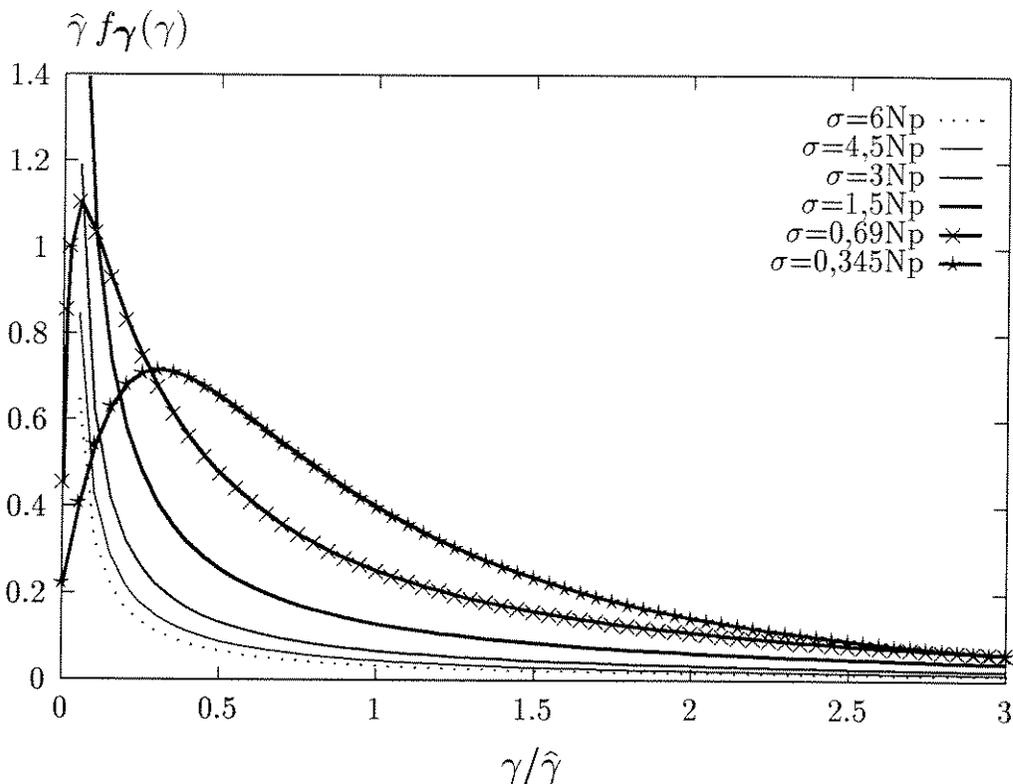


Figura 2.20: Função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído no ambiente Rice Sombreado, para $K = 5$ dB, tendo como parâmetro o desvio padrão, dado em neper, da média local, dada em decibéis.

2.4 Comparações entre os Diversos Modelos Estatísticos do Sinal de Rádio Móvel

2.4.1 Comparação entre os Modelos Nakagami e Rice

O modelo Nakagami, para $m \geq 1$,⁴⁵ e o modelo Rice são utilizados para modelar ambientes com mesmo tipo de desvanecimento. O modelo Nakagami, para $m = 1$, e o modelo Rice, para $k = 0$, são idênticos. O modelo Nakagami, para $m > 1$, pode aproximar o modelo Rice, para $k \neq 0$, utilizando-se a relação seguinte [8]

$$k = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}} \quad (2.382)$$

⁴⁵Para $m \geq 1$ o modelo Nakagami descreve ambientes com propagação multipercurso associada ($m > 1$) ou não ($m = 1$) à presença de linha de visada [8].

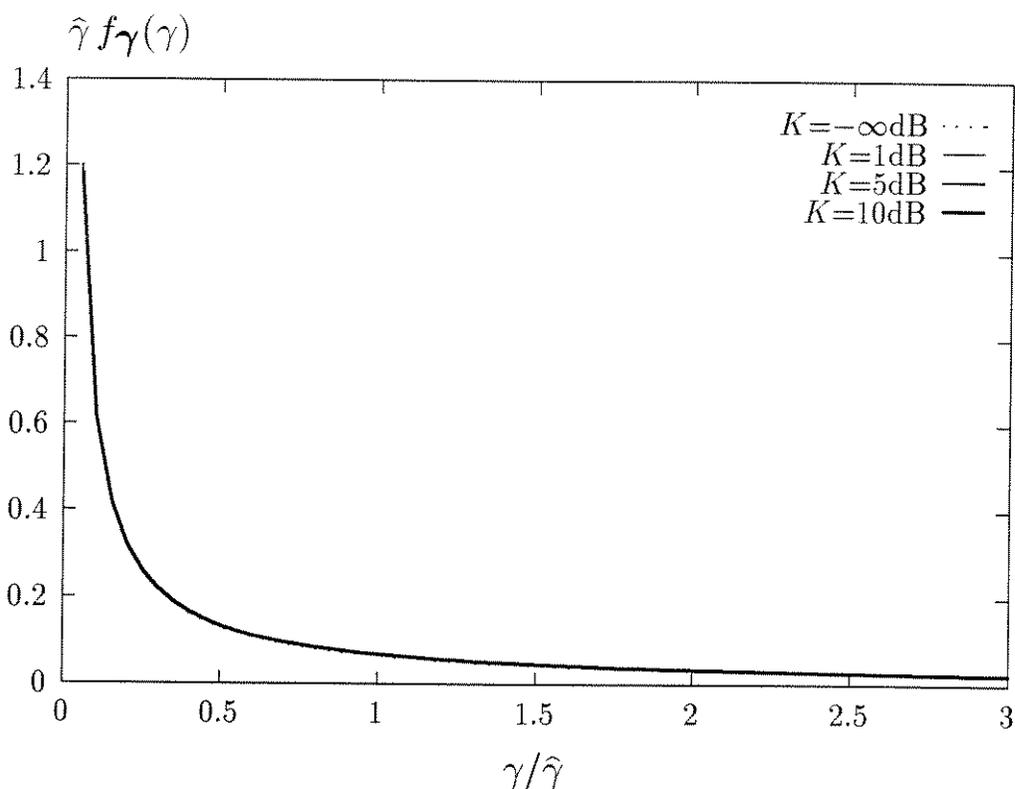


Figura 2.21: Função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído no ambiente Rice Sombreado, para $\sigma = 3$ Np, tendo como parâmetro o fator de Rice, dado em decibéis.

onde k é o fator de Rice e m é o parâmetro de desvanecimento do sinal.

Alternativamente, pode-se utilizar a relação seguinte

$$K = 10 \log \left(\frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}} \right) \tag{2.383}$$

onde K é o fator de Rice, dado em decibéis, e m é o parâmetro de desvanecimento do sinal.

Da Equação 2.383, obtêm-se as seguintes relações entre o parâmetro de desvanecimento, m , e o fator de Rice, K , dado em decibéis:⁴⁶

- $m = 2 \approx K = 3,83$ dB.
- $m = 3 \approx K = 6,48$ dB.
- $m = 4 \approx K = 8,11$ dB.

⁴⁶Estas relações serão úteis para a comparação entre os modelos.

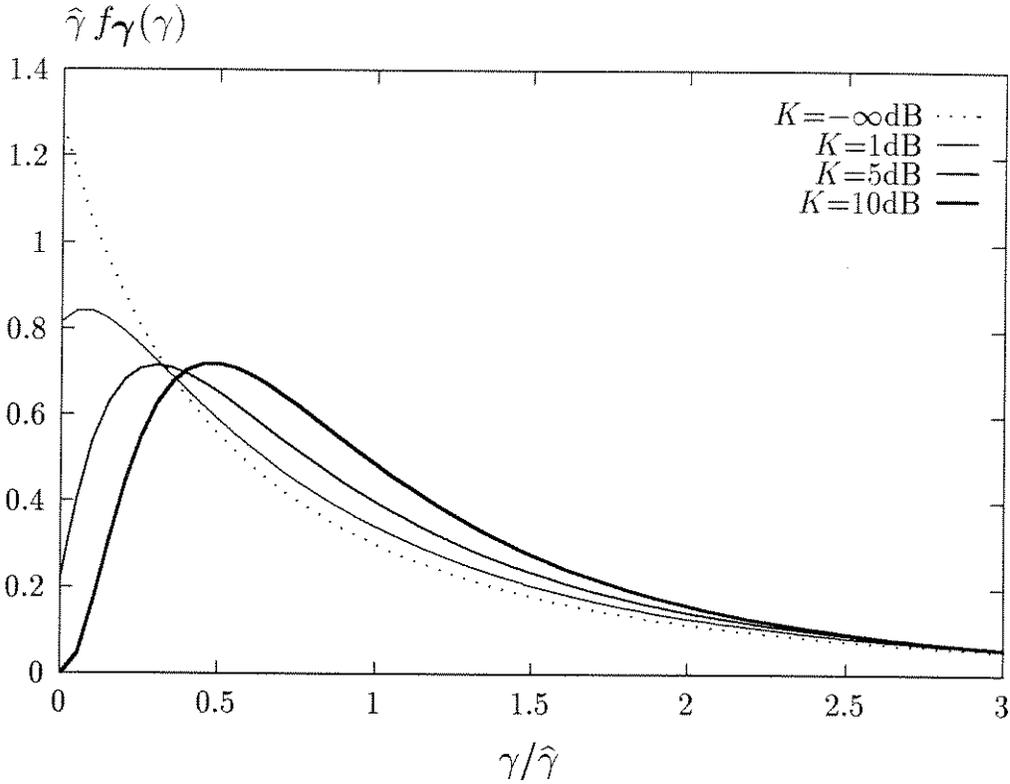


Figura 2.22: Função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído no ambiente Rice Sombreado, para $\sigma = 0,345$ Np, tendo como parâmetro o fator de Rice, dado em decibéis.

A Figura 2.23 mostra a comparação entre os modelos Nakagami e Rice para a envoltória do sinal de rádio móvel. O modelo Nakagami é caracterizado pela densidade de Nakagami, dada pela Equação 2.14, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m . O modelo Rice é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.34, tendo como parâmetro o fator de Rice, K , dado em decibéis.⁴⁷

A Figura 2.24 mostra a comparação entre os modelos Nakagami e Rice para a relação sinal/ruído. O modelo Nakagami é caracterizado pela densidade Gama, dada pela Equação 2.208, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m . O modelo Rice é caracterizado pela densidade Chi-quadrada não Central, dada pela Equação 2.212, tendo como parâmetro o fator de Rice, K , dado em decibéis.⁴⁷

⁴⁷É importante observar que os valores dos parâmetros são aqueles que possibilitam a comparação entre os modelos.

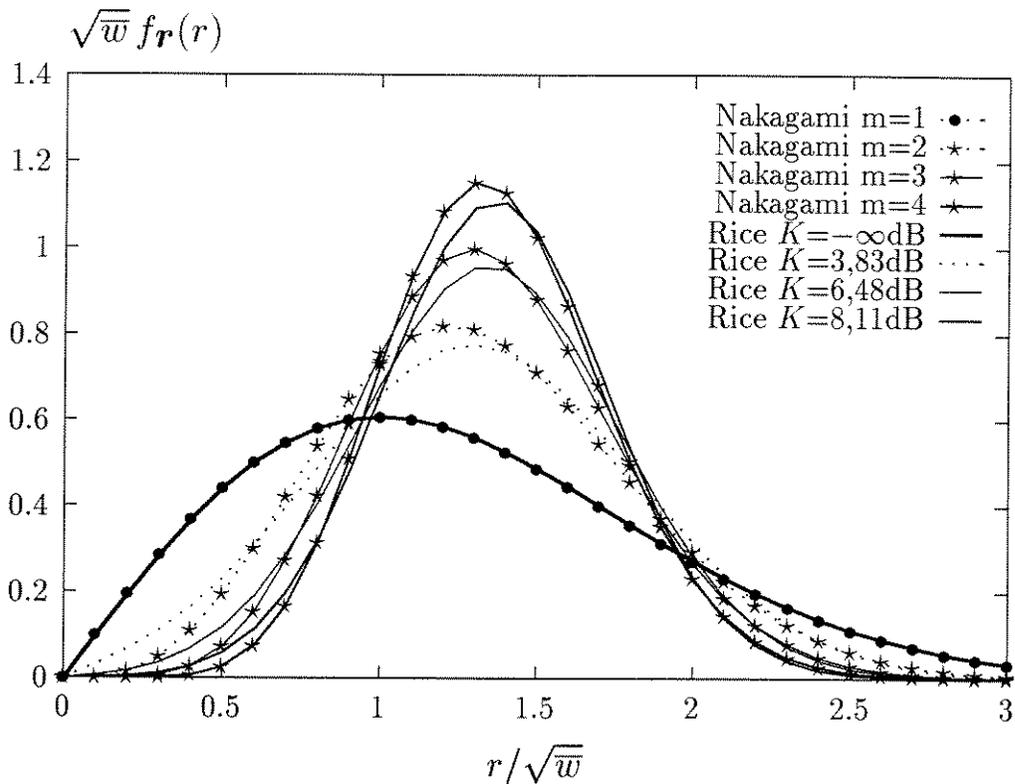


Figura 2.23: Comparação entre os modelos Nakagami e Rice para a envoltória.

É interessante observar nas Figuras 2.23 e 2.24 que os modelos Nakagami, para $m \geq 1$, e Rice, apesar de serem utilizados para modelar ambientes com mesmo tipo de desvanecimento, são idênticos apenas para $m = 1$ e $K = -\infty$ dB, para os demais valores são realmente apenas modelos aproximados e não idênticos como geralmente utilizados na literatura.⁴⁸

2.4.2 Comparação entre o Modelo Suzuki e os Modelos Rayleigh e Log-normal

As densidades que caracterizam o ambiente Suzuki são uma combinação das densidades que caracterizam os ambientes Rayleigh e Log-normal. Portanto, o modelo Suzuki é a combinação dos modelos Rayleigh e Log-normal. Assim, o modelo Suzuki será comparado aos

⁴⁸Por este motivo, cálculos realizados a partir das densidades que caracterizam estes modelos não apresentam resultados idênticos.

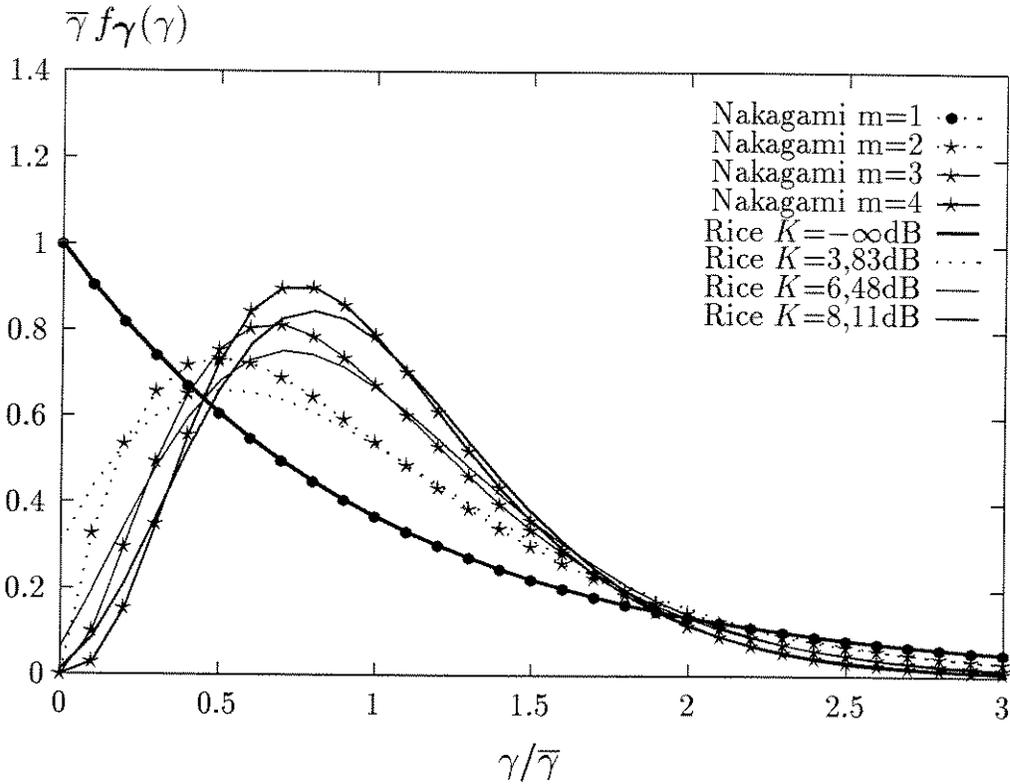


Figura 2.24: Comparação entre os modelos Nakagami e Rice para a relação sinal/ruído.

modelos que o compõem, ou seja, aos modelos Rayleigh e Log-normal.

A Figura 2.25 mostra a comparação entre o modelo Suzuki e os modelos Rayleigh e Log-normal para a envoltória do sinal de rádio móvel. O modelo Rayleigh é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.13.⁴⁹ O modelo Log-normal é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.60, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper. O modelo Suzuki é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.114, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper.

A Figura 2.26 mostra a comparação entre o modelo Suzuki e os modelos Rayleigh e Log-normal para a densidade da relação sinal/ruído. O modelo Rayleigh é caracterizado pela densidade Exponencial, dada pela Equação 2.206.⁵⁰ O modelo Log-normal é caracterizado pela densidade Log-normal, dada pela Equação 2.219, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper. O modelo Suzuki é caracterizado pela densidade dada pela

⁴⁹É importante ressaltar que para o ambiente Rayleigh, tem-se $\hat{w} = \bar{w}$.

⁵⁰É importante ressaltar que para o ambiente Rayleigh, tem-se $\hat{\gamma} = \bar{\gamma}$.

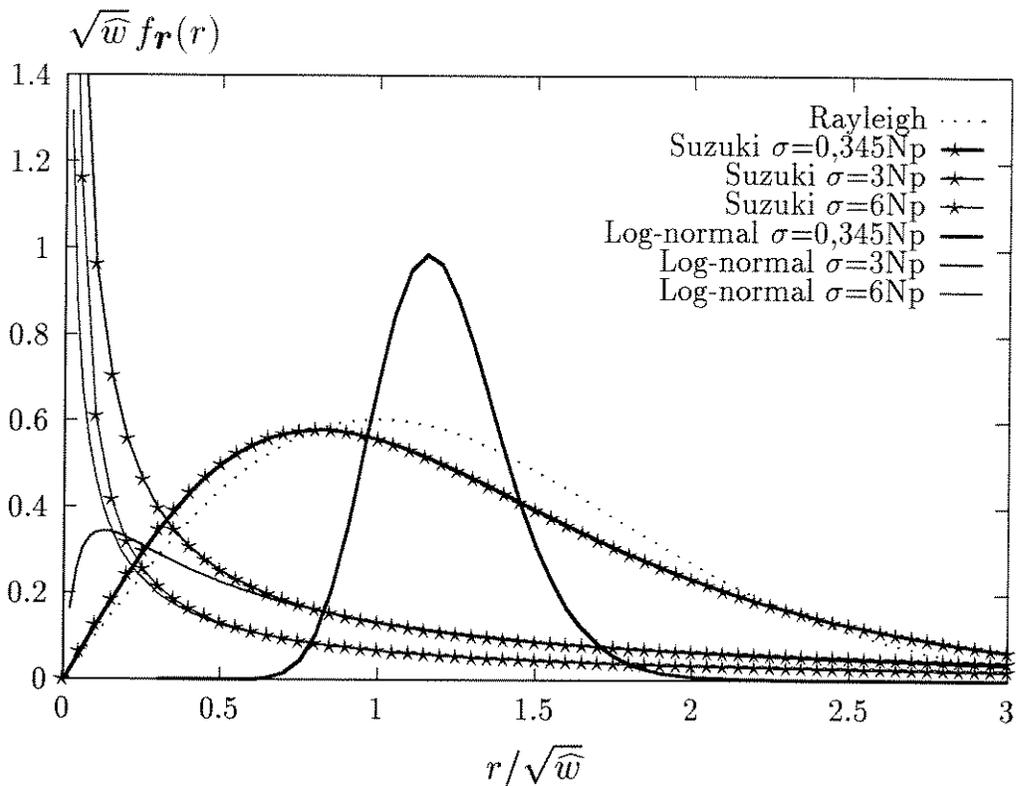


Figura 2.25: Comparação entre o modelo Suzuki e os modelos Rayleigh e Log-normal para a densidade da envoltória.

Equação 2.290, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper.

Das Figuras 2.25 e 2.26, observa-se que, para valores grandes do desvio padrão de sombreamento ($\sigma \geq 6 \text{ Np}$), o modelo Suzuki aproxima o modelo Log-normal, isto é, o desvanecimento Log-normal é crítico em relação ao desvanecimento Rayleigh. Ainda, observa-se que, para valores pequenos do desvio padrão de sombreamento ($\sigma \leq 0,345 \text{ Np}$), o modelo Suzuki aproxima o modelo Rayleigh, isto é, o desvanecimento Rayleigh é crítico em relação ao desvanecimento Log-normal.

É interessante ressaltar que, para $\sigma \rightarrow 0$, o modelo Suzuki tende ao modelo Rayleigh.

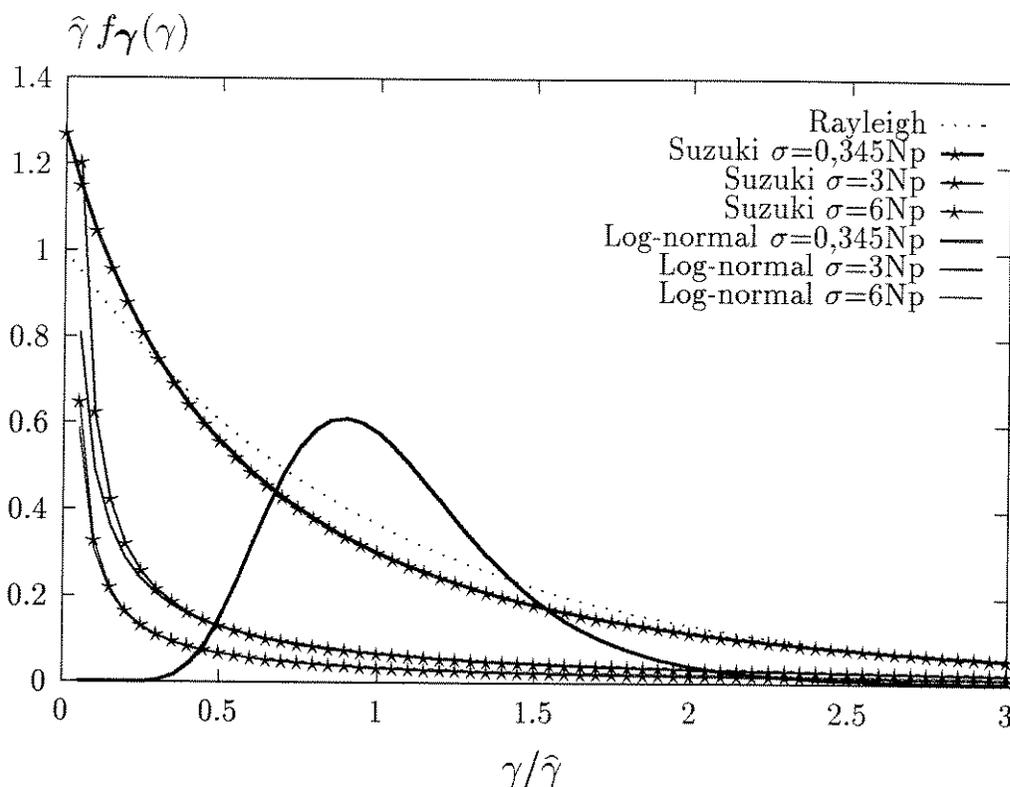


Figura 2.26: Comparação entre o modelo Suzuki e os modelos Rayleigh e Log-normal para a densidade da relação sinal/ruído.

2.4.3 Comparação entre o Modelo Nakagami Sombreado e os Modelos Nakagami e Log-normal

As densidades que caracterizam o ambiente Nakagami Sombreado são uma combinação das densidades que caracterizam os ambientes Nakagami e Log-normal. Portanto, o modelo Nakagami Sombreado é a combinação dos modelos Nakagami e Log-normal. Assim, o modelo Nakagami Sombreado será comparado aos modelos que o compõem, ou seja, aos modelos Nakagami e Log-normal.

A Figura 2.27 mostra a comparação entre o modelo Nakagami Sombreado e os modelos Nakagami e Log-normal para a densidade da envoltória do sinal de rádio móvel, para $m = 3$. O modelo Nakagami é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.14, para $m = 3$.⁵¹ O modelo Log-normal é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.60, tendo

⁵¹É importante ressaltar que para o ambiente Nakagami, tem-se $\hat{w} = \bar{w}$.

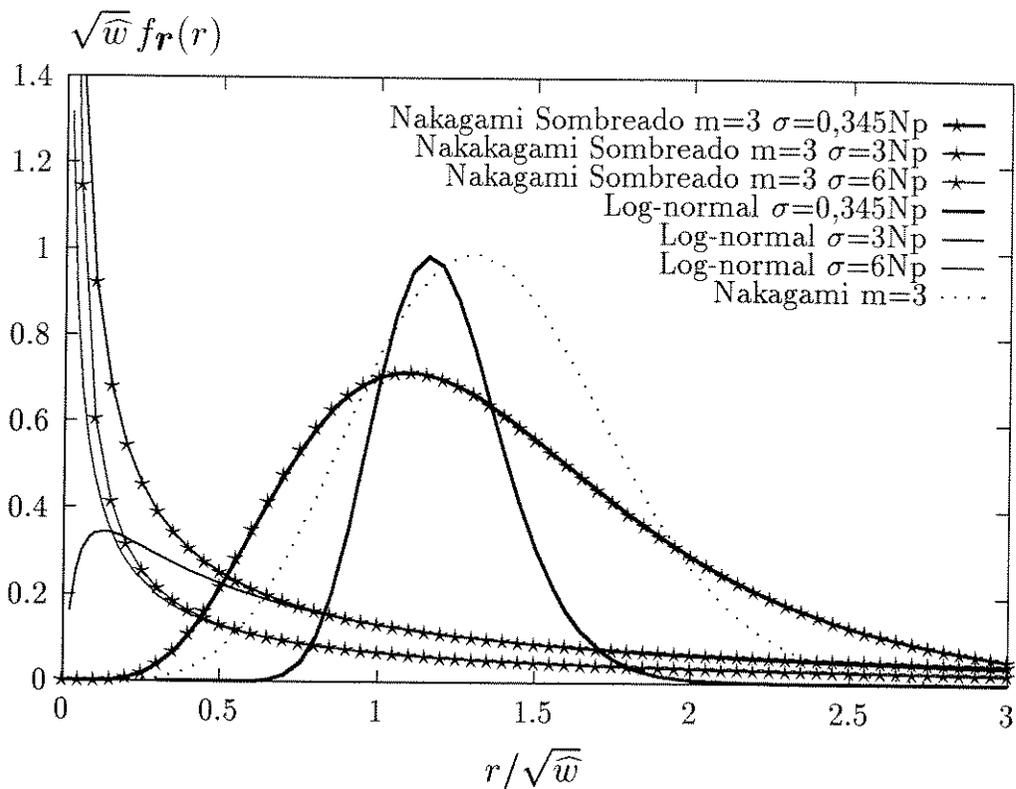


Figura 2.27: Comparação entre o modelo Nakagami Sombreado e os modelos Nakagami e Log-normal para a densidade da envoltória, para $m = 3$.

como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper. O modelo Nakagami Sombreado é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.153, para $m = 3$, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper.

A Figura 2.28 mostra a comparação entre os modelos Nakagami e Nakagami Sombreado para a densidade da envoltória do sinal de rádio móvel, para $m = 3$. O modelo Nakagami é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.14, para $m = 3$. O modelo Nakagami Sombreado é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.153, para $m = 3$, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper.

A Figura 2.29 mostra a comparação entre o modelo Nakagami Sombreado e os modelos Nakagami e Log-normal para a densidade da relação sinal/ruído, para $m = 3$.⁵² O modelo Nakagami é caracterizado pela densidade Gama, dada pela Equação 2.208, para $m = 3$. O modelo Log-normal é caracterizado pela densidade Log-normal, dada pela Equação 2.219,

⁵²É importante ressaltar que para o ambiente Nakagami, tem-se $\hat{\gamma} = \bar{\gamma}$.

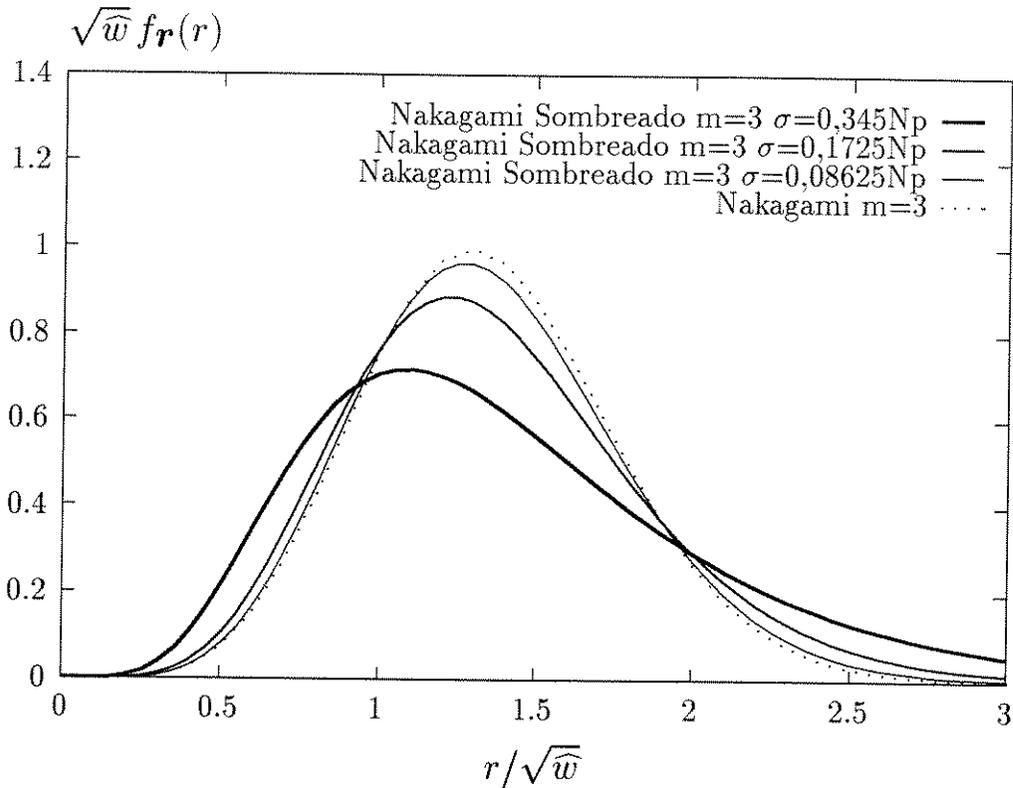


Figura 2.28: Comparação entre os modelos Nakagami e Nakagami Sombreado para a densidade da envoltória, para $m = 3$.

tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper. O modelo Nakagami Sombreado é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.335, para $m = 3$, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper.

A Figura 2.30 mostra a comparação entre os modelos Nakagami e Nakagami Sombreado para a densidade da relação sinal/ruído, para $m = 3$. O modelo Nakagami é caracterizado pela densidade Gama, dada pela Equação 2.208, para $m = 3$. O modelo Nakagami Sombreado é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.335, para $m = 3$, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper.

Das Figuras 2.27 e 2.29, observa-se que, para valores grandes do desvio padrão de sombreamento ($\sigma \geq 6 N_p$), o modelo Nakagami Sombreado aproxima o modelo Log-normal, isto é, o desvanecimento Log-normal é crítico em relação ao desvanecimento Nakagami. Conclui-se que, para valores grandes do desvio padrão de sombreamento, o modelo Nakagami Sombreado aproxima também modelo Suzuki, isto é, a influência do grau de desvanecimento pode ser

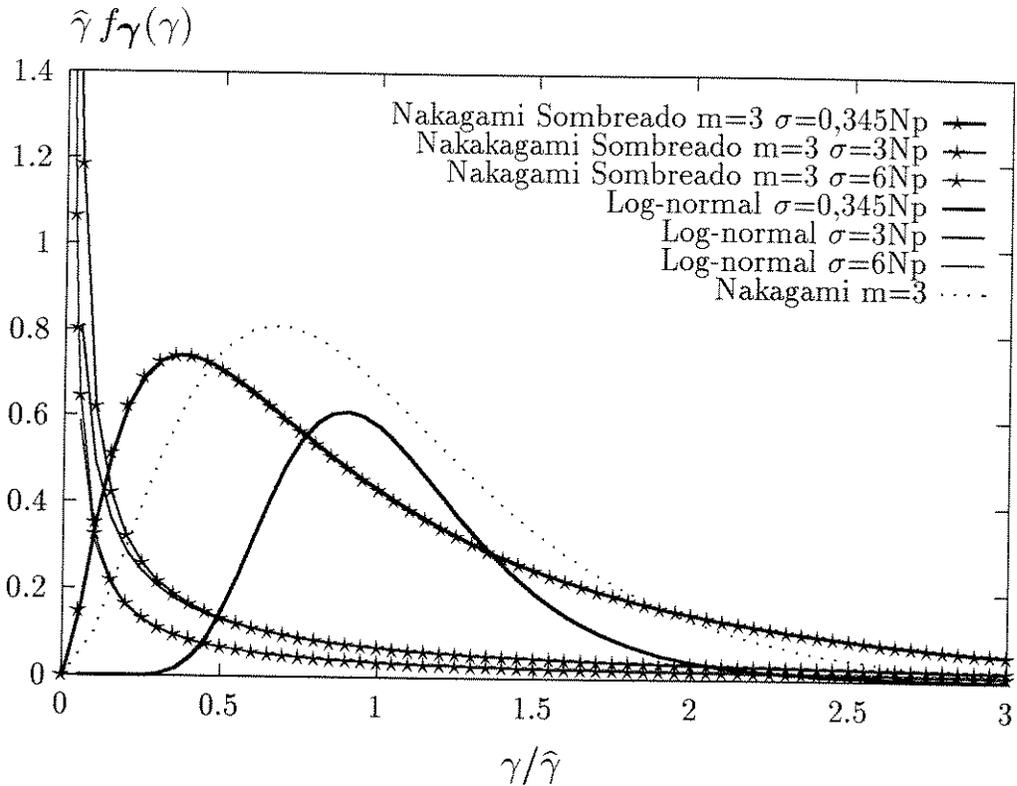


Figura 2.29: Comparação entre o modelo Nakagami Sombreado e os modelos Nakagami e Log-normal para a densidade da relação sinal/ruído, para $m = 3$.

desprezada (comparar as Figuras 2.25 e 2.27 e comparar as Figuras 2.26 e 2.29).

Das Figuras 2.27 e 2.29, observa-se que, para valores pequenos do desvio padrão de sombreamento ($\sigma \sim 0,345 N_p$), o modelo Nakagami Sombreado não aproxima o modelo Nakagami, isto é, o desvio padrão de sombreamento não pode ser desprezado, ou seja, tem importância relevante. Conclui-se que, para valores pequenos do desvio padrão de sombreamento, a influência do desvio padrão de sombreamento aumenta com o aumento do grau de desvanecimento, m , (comparar as Figuras 2.25 e 2.27 e comparar as Figuras 2.26 e 2.29).

É interessante ressaltar que, nas Figuras 2.28 e 2.30, para $\sigma \rightarrow 0$, o modelo Nakagami Sombreado tende ao modelo Nakagami, e que somente para valores extremamente pequenos do desvio padrão de sombreamento ($\sigma \leq 0,08625 N_p$), o modelo Nakagami Sombreado aproxima o modelo Nakagami, isto é, o desvanecimento Nakagami torna-se crítico em relação ao desvanecimento Log-normal.

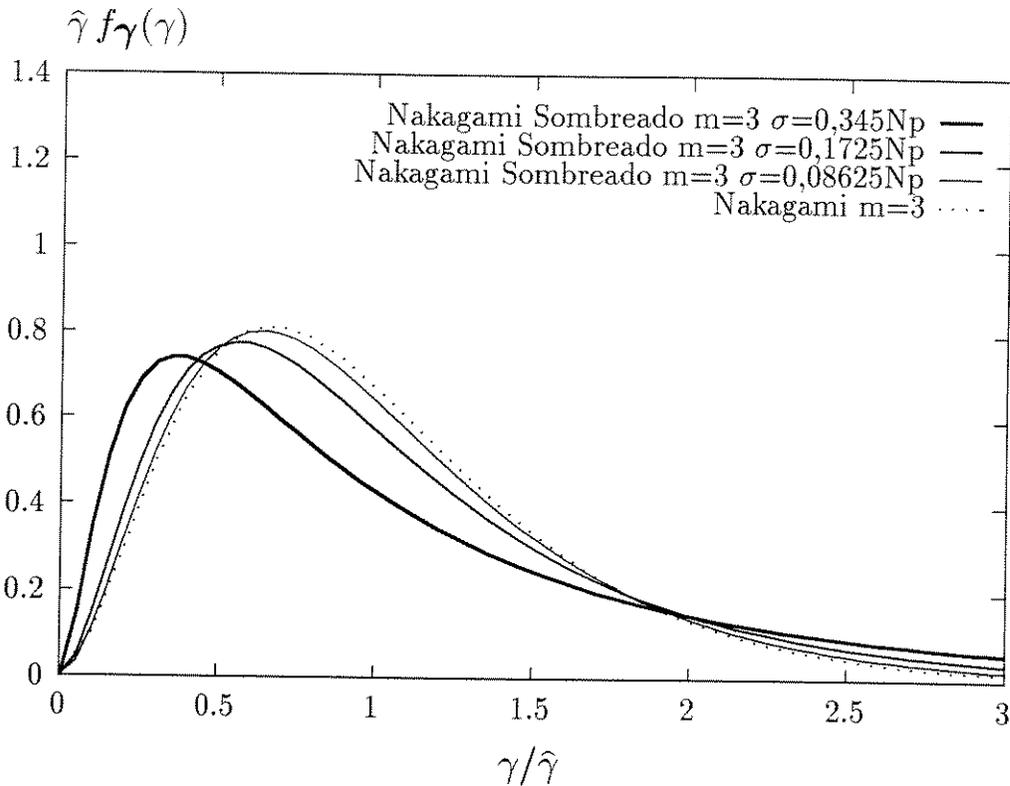


Figura 2.30: Comparação entre os modelos Nakagami e Nakagami Sombreado para a densidade da relação sinal/ruído, para $m = 3$.

2.4.4 Comparação entre o Modelo Rice Sombreado e os Modelos Rice e Log-normal

As densidades que caracterizam o ambiente Rice Sombreado são uma combinação das densidades que caracterizam os ambientes Rice e Log-normal. Portanto, o modelo Rice Sombreado é a combinação dos modelos Rice e Log-normal. Assim, o modelo Rice Sombreado será comparado aos modelos que o compõem, ou seja, aos modelos Rice e Log-normal.

A Figura 2.31 mostra a comparação entre o modelo Rice Sombreado e os modelos Rice e Log-normal para a densidade da envoltória do sinal de rádio móvel, para $K = 5$ dB. O modelo Rice é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.34, para $K = 5$ dB.⁵³ O modelo Log-normal é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.60, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper. O modelo Rice Sombreado é

⁵³É importante ressaltar que para o ambiente Rice, tem-se $\hat{w} = \bar{w}$.

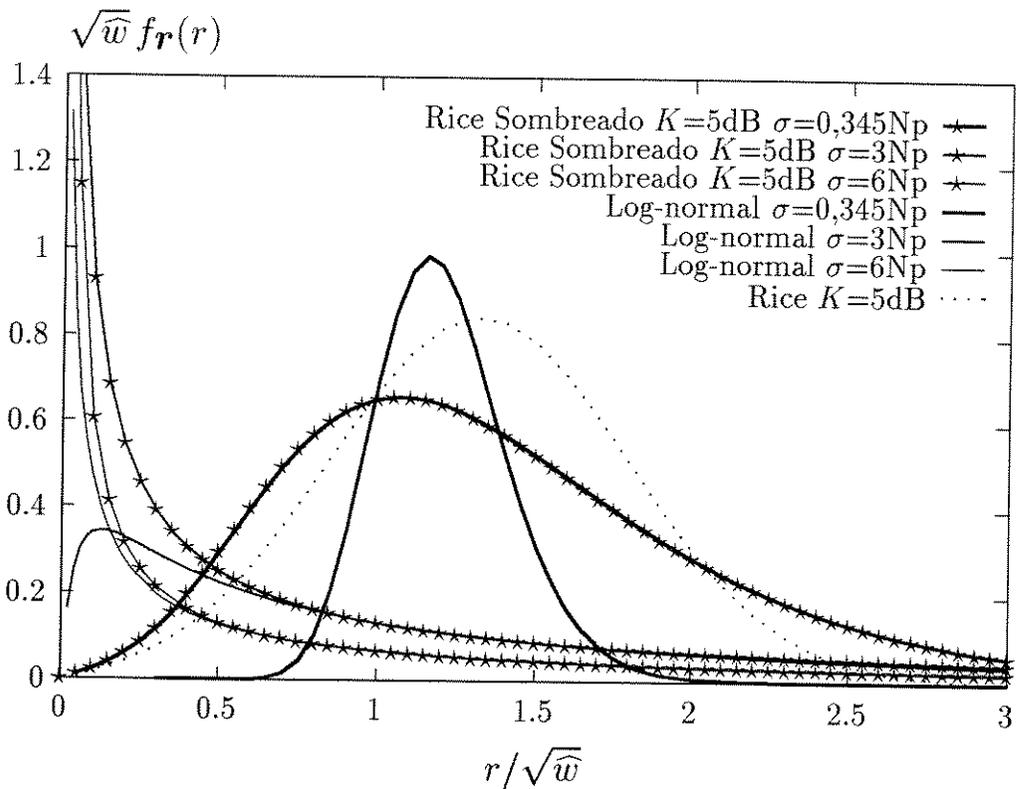


Figura 2.31: Comparação entre o modelo Rice Sombreado e os modelos Rice e Log-normal para a densidade da envoltória, para $K = 5$ dB.

caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.193, para $K = 5$ dB, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper.

A Figura 2.32 mostra a comparação entre os modelos Rice e Rice Sombreado para a densidade da envoltória do sinal de rádio móvel, para $K = 5$ dB. O modelo Rice é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.34, para $K = 5$ dB. O modelo Rice Sombreado é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.193, para $K = 5$ dB, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper.

A Figura 2.33 mostra a comparação entre o modelo Rice Sombreado e os modelos Rice e Log-normal para a densidade da relação sinal/ruído, para $K = 5$ dB. O modelo Rice é caracterizado pela densidade Chi-quadrada não Central, dada pela Equação 2.212, para $K = 5$ dB.⁵⁴ O modelo Log-normal é caracterizado pela densidade Log-normal, dada pela Equação 2.219, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em ne-

⁵⁴É importante ressaltar que para o ambiente Rice, tem-se $\hat{\gamma} = \bar{\gamma}$.

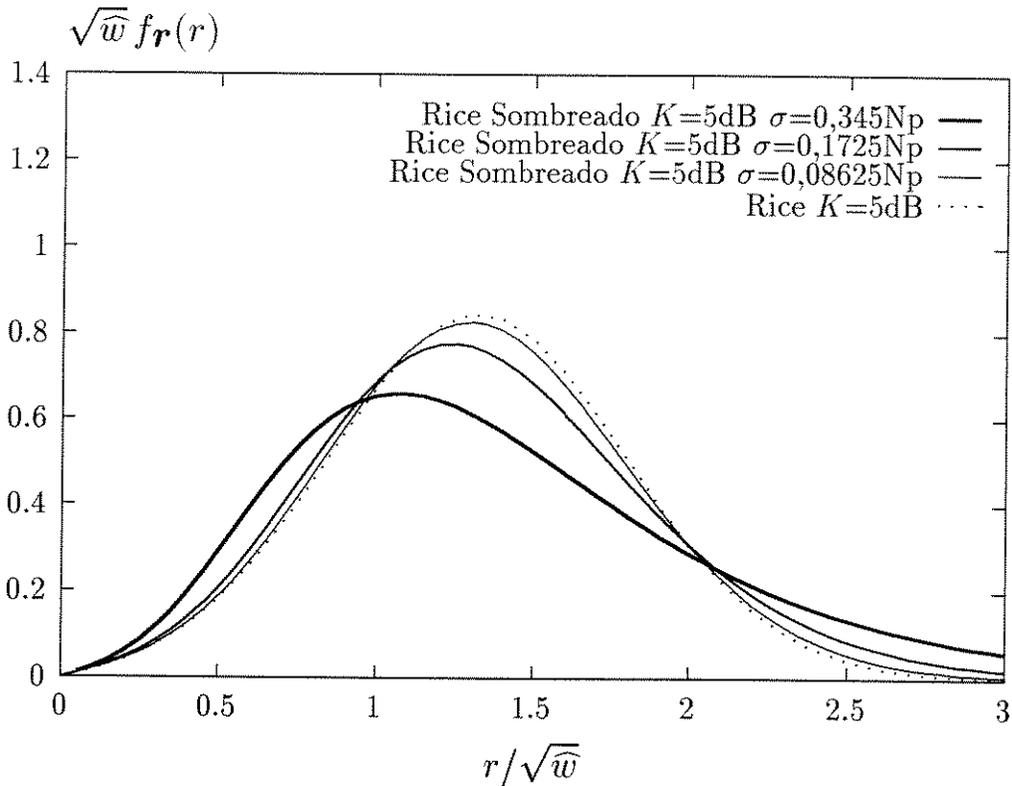


Figura 2.32: Comparação entre os modelos Rice e Rice Sombreado para a densidade da envoltória, para $m = 3$.

per. O modelo Rice Sombreado é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.381, para $K = 5$ dB, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper.

A Figura 2.34 mostra a comparação entre os modelos Rice e Rice Sombreado para a densidade da relação sinal/ruído, para $K = 5$ dB. O modelo Rice é caracterizado pela densidade Chi-quadrada não Central, dada pela Equação 2.212, para $K = 5$ dB. O modelo Rice Sombreado é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.381, para $K = 5$ dB, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper.

Das Figuras 2.31 e 2.33, observa-se que, para valores grandes do desvio padrão de sombreamento ($\sigma \geq 6$ Np), o modelo Rice Sombreado aproxima o modelo Log-normal, isto é, o desvanecimento Log-normal é crítico em relação ao desvanecimento Rice. Conclui-se que, para valores grandes do desvio padrão de sombreamento, o modelo Rice Sombreado aproxima também modelo Suzuki, isto é, a influência do fator de Rice, dado em decibéis, pode ser desprezada, (comparar Figuras 2.25 e 2.31 e comparar Figuras 2.26 e 2.33). Conclui-se também

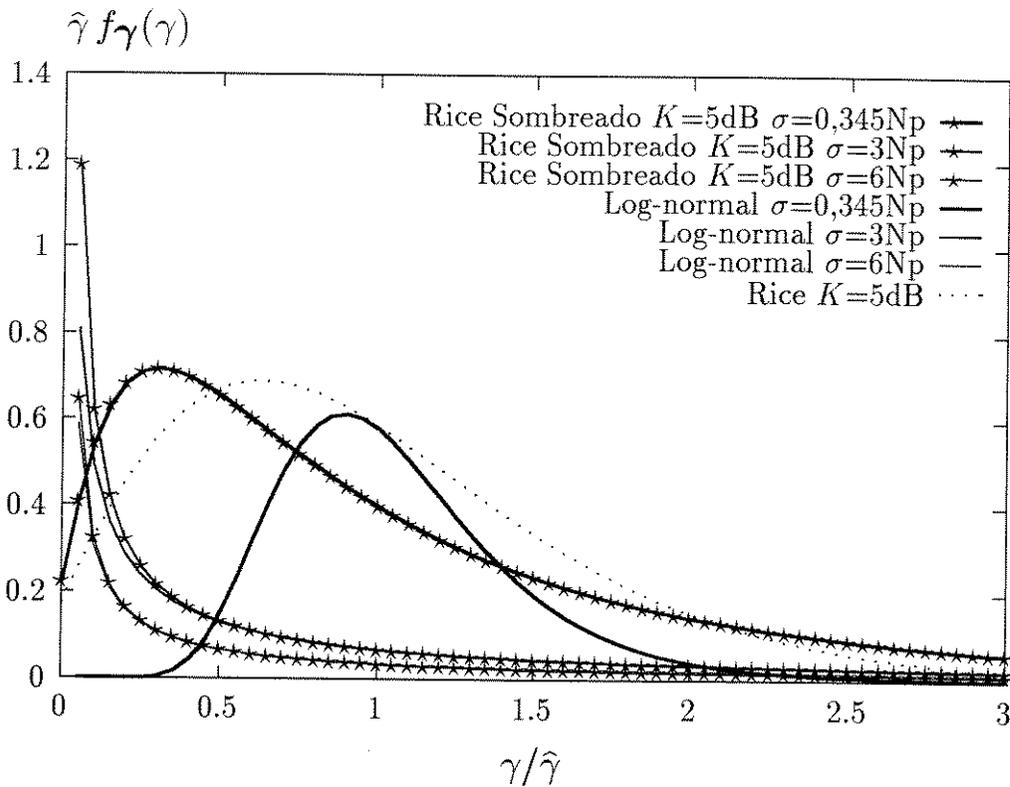


Figura 2.33: Comparação entre o modelo Rice Sombreado e os modelos Rice e Log-normal para a densidade da relação sinal/ruído, para $K = 5$ dB.

que, para valores grandes do desvio padrão de sombreamento ($\sigma \geq 6$ Np), os modelos Rice Sombreado e Nakagami Sombreado aproximam modelo Suzuki, e por conseqüência, aproximam-se mutuamente, (comparar as Figuras 2.27 e 2.31 e comparar as as Figuras 2.29 e 2.33). Das Figuras 2.31 e 2.33, observa-se que, para valores pequenos do desvio padrão de sombreamento ($\sigma \sim 0,345$ Np), o modelo Rice Sombreado não aproxima o modelo Rice, isto é, o desvio padrão de sombreamento de envoltória não pode ser desprezado, ou seja, tem importância relevante. Conclui-se que, para valores pequenos do desvio padrão de sombreamento a influência do desvio padrão de sombreamento aumenta com o aumento do fator de Rice, K , dado em decibéis, (comparar Figuras 2.25 e 2.31 e comparar Figuras 2.26 e 2.33).

É interessante ressaltar que, nas Figuras 2.32 e 2.34, para $\sigma \rightarrow 0$, o modelo Rice Sombreado tende ao modelo Rice, e que somente para valores extremamente pequenos do desvio padrão de sombreamento ($\sigma \leq 0,08625$ Np), o modelo Rice Sombreado aproxima o modelo Rice, isto é, o desvanecimento Rice torna-se crítico em relação ao desvanecimento Log-normal.

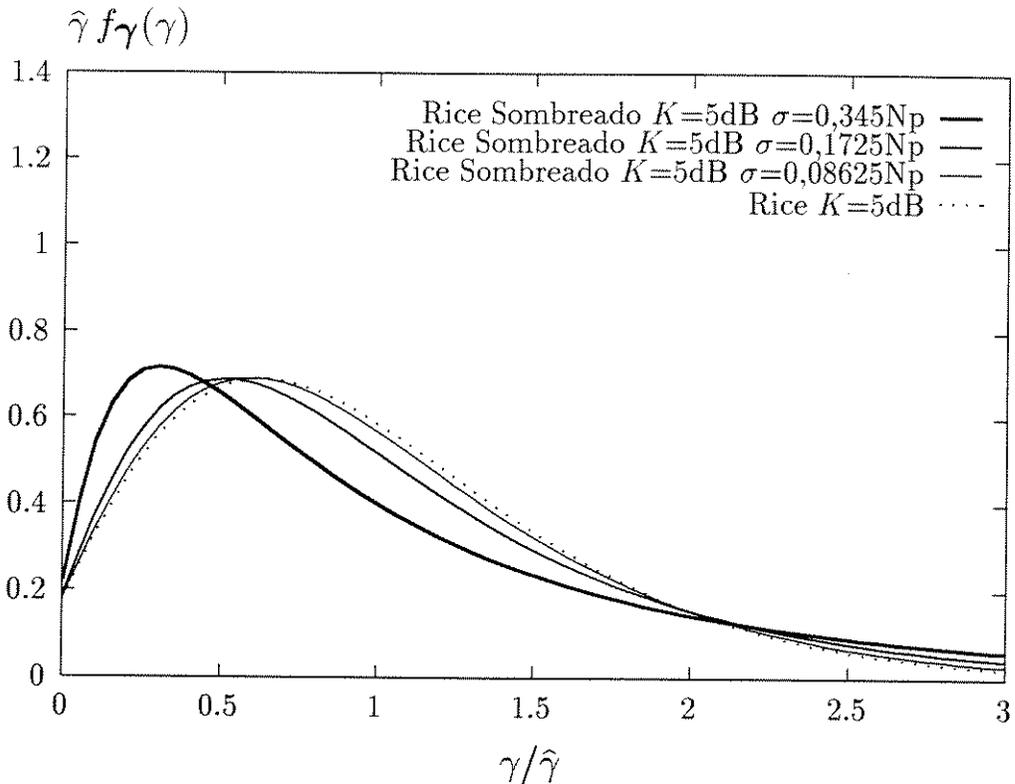


Figura 2.34: Comparação entre os modelos Rice e Rice Sombreado para a densidade da relação sinal/ruído, para $m = 3$.

2.4.5 Comparação entre os Modelos Nakagami Sombreado e Rice Sombreado

O modelo Nakagami Sombreado, para $m \geq 1$,⁵⁵ e o modelo Rice Sombreado são utilizados para modelar ambientes com mesmo tipo de desvanecimento. O modelo Nakagami Sombreado, para $m = 1$, e o modelo Rice Sombreado, para $k = 0$, são idênticos. O modelo Nakagami Sombreado, para $m > 1$, e o modelo Rice Sombreado, para $k \neq 0$, podem ser aproximados utilizando-se a relação entre o fator de Rice, k , e o parâmetro de desvanecimento, m , dada pela Equação 2.382.

⁵⁵Para $m \geq 1$ o modelo Nakagami Sombreado descreve ambientes com propagação multipercurso e sombreamento combinados, associados ($m > 1$) ou não ($m = 1$) à presença de linha de visada (ou de componente direta sombreada)

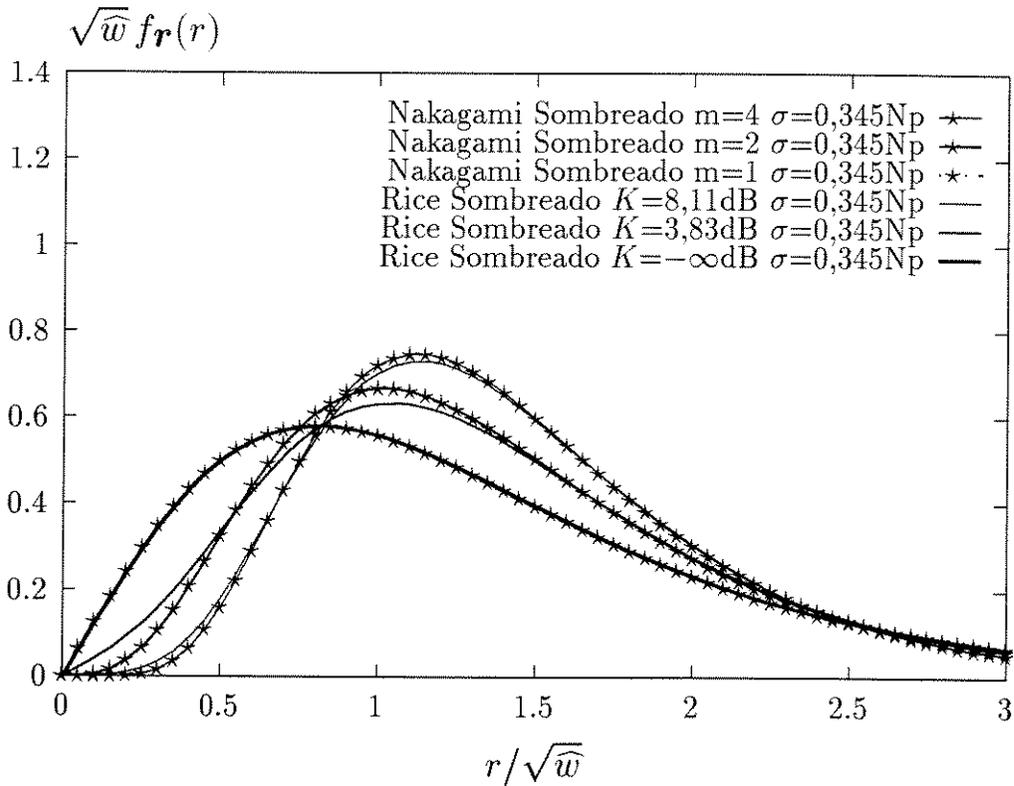


Figura 2.35: Comparação entre os modelos Nakagami Sombreado e Rice Sombreado para a densidade da envoltória, para $\sigma = 0,345 N_p$.

Alternativamente, o modelo Nakagami Sombreado, para $m > 1$, pode aproximar o modelo Rice Sombreado, para $K \neq -\infty$ dB, utilizando-se a relação entre o fator de Rice, K , dado em decibéis, e o parâmetro de desvanecimento, m , dado pela Equação 2.383.

A Figura 2.35 mostra a comparação entre os modelos Nakagami Sombreado e Rice Sombreado para a densidade da envoltória do sinal de rádio móvel, para $\sigma = 0,345 N_p$. O modelo Nakagami Sombreado é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.153, para $\sigma = 0,345 N_p$, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m . O modelo Rice Sombreado é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.193, para $\sigma = 0,345 N_p$, tendo como parâmetro o fator de Rice, K , dado em decibéis.⁴⁷

A Figura 2.36 mostra a comparação entre os modelos Nakagami Sombreado e Rice Sombreado para a densidade da relação sinal/ruído, para $\sigma = 0,345 N_p$. O modelo Nakagami Sombreado é caracterizado pela densidade dada pela Equação 2.335, para $\sigma = 0,345 N_p$, e tem como parâmetro o grau de desvanecimento, m . O modelo Rice Sombreado é caracterizado

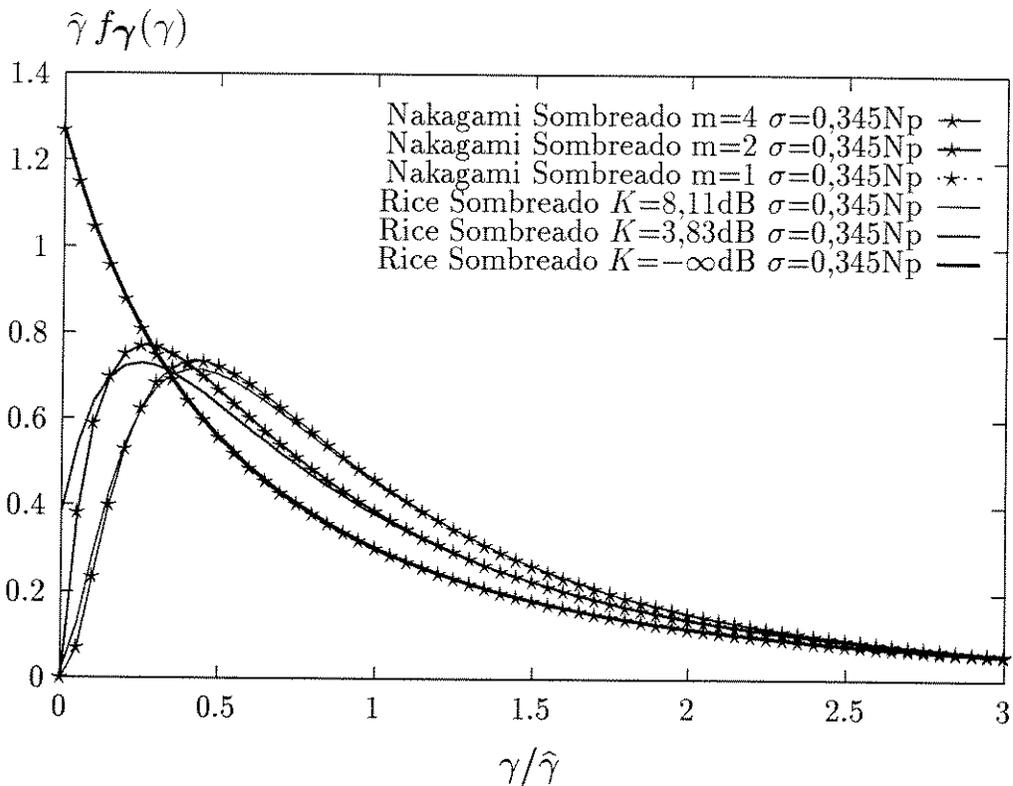


Figura 2.36: Comparação entre os modelos Nakagami Sombreado e Rice Sombreado para a densidade da relação sinal/ruído, para $\sigma = 0,345 Np$.

pela densidade dada pela Equação 2.381, para $\sigma = 0,345 Np$, tendo como parâmetro o fator de Rice, K , dado em decibéis.⁴⁷

É interessante observar nas Figuras 2.35 e 2.36 que, mesmo para valores de desvio padrão de sombreamento em que o grau de desvanecimento e o fator de Rice, dado em decibéis, não podem ser desprezados, os modelos Nakagami Sombreado, para $m > 1$, e Rice Sombreado, para $K \neq -\infty dB$ que são utilizados para modelar ambientes com mesmo tipo de desvanecimento, são modelos bastante aproximados.

2.5 Conclusão

O ambiente de rádio móvel foi amplamente modelado, no que diz respeito à variabilidade do sinal em torno desta média de potência. A avaliação da variabilidade do sinal em

torno da média da potência necessitou ser feita por métodos estatísticos. Foram descritos os diversos tipos de desvanecimento encontrados no canal de rádio móvel. Ainda, foram descritos os diversos modelos estatísticos utilizados para caracterizar a variabilidade do sinal de rádio móvel.

Os modelos estatísticos utilizados para descrever o ambiente de rádio móvel são: Rayleigh, Nakagami, Rice, Log-normal, Suzuki, Nakagami Sombreado e Rice Sombreado.

A modelagem da variabilidade do sinal de rádio móvel, para cada um dos modelos citados, compreendeu:

- a modelagem estatística da envoltória do sinal.
- a modelagem estatística da relação sinal/ruído.

A modelagem estatística da envoltória do sinal foi feita de forma a que as densidades fossem colocadas em função da média da potência do sinal. Assim, as densidades da envoltória do sinal podem ser comparadas entre si.

A modelagem estatística da relação sinal/ruído foi feita de forma a que as densidades fossem colocadas em função da média da relação sinal/ruído. Assim, as densidades da relação sinal/ruído podem ser comparadas entre si.

A modelagem estatística da envoltória do sinal de rádio móvel para os ambientes Nakagami Sombreado e Rice Sombreado é contribuição deste trabalho de tese. Assim, são contribuições:

- a densidade composta Nakagami/Normal.
- a densidade composta Nakagami/Log-normal.
- a densidade composta Rice/Normal.
- a densidade composta Rice/Log-normal.

São também contribuições todos os cálculos das médias e das variâncias da envoltória e da relação sinal/ruído para os ambientes compostos. São ambientes compostos: Suzuki, Nakagami Sombreado e Rice Sombreado.

Ainda, os diversos modelos estatísticos para o sinal de rádio móvel foram comparados entre si.

Capítulo 3

Interferência Cocanal

3.1 Introdução

A interferência cocanal é uma inadequada recepção do sinal desejado na presença de canais de rádio de mesma frequência sendo utilizados em diferentes células. Os diferentes canais de rádio de mesma frequência de portadora podem ou não estar sendo utilizados em um dado momento, isto é, podem estar ativos ou inativos. Quando vários cocanais estão simultaneamente ativos, o sinal desejado é recebido mas também são recebidos sinais indesejados - sinais interferentes - que podem causar a degradação do sinal de rádio móvel desejado, isto é, podem causar interferência cocanal.

A análise da interferência cocanal necessita ser feita por métodos estatísticos, devido à grande variabilidade do sinal de rádio móvel [17]. A probabilidade de interferência cocanal é uma medida de desempenho do sistema de rádio móvel. Para esta análise necessita-se da modelagem estatística do sinal desejado e dos sinais interferentes. Em geral, os sinais interferentes são caracterizados por um único modelo estatístico. O sinal desejado, entretanto, pode ser caracterizado por modelo estatístico diferente daquele utilizado para caracterizar os sinais interferentes. Ainda, a modelagem do sinal desejado e dos sinais interferentes é feita através dos modelos estatísticos descritos no Capítulo 2.

No Capítulo 2, cada ambiente de rádio móvel está associado a um modelo estatístico e os nomes dos modelos estatísticos são utilizados para denominar os ambientes por eles descritos. A associação de cada ambiente de rádio móvel a um dos modelos descritos é uma simplificação porquanto cada ambiente está associado apenas ao modelo estatístico do sinal desejado, não sendo considerada a existência de interferências. Entretanto, no caso da análise da interferência cocanal, a existência de sinais interferentes é considerada, e o ambiente de rádio

móvel deve, portanto, ser associado tanto ao modelo estatístico do sinal desejado quanto ao modelo estatístico dos sinais interferentes. Neste caso, deve-se rever a forma de denominação do ambiente de rádio móvel descrita no Capítulo 2. Assim, o ambiente de rádio móvel, do ponto de vista da análise da interferência cocanal, é denominado pela composição dos nomes dos modelos que caracterizam o sinal desejado e os sinais interferentes. A denominação do ambiente de rádio móvel é, portanto, dividida em duas partes. A primeira parte indica o modelo estatístico utilizado para caracterizar o sinal desejado e a segunda parte indica o modelo estatístico utilizado para caracterizar os sinais interferentes. Na literatura, por vezes, o nome do modelo estatístico que caracteriza os sinais interferentes é omitido quando este é o mesmo modelo que caracteriza o sinal desejado. Entretanto, é importante observar que a utilização deste tipo de modelagem na qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes possuem mesmo tipo de desvanecimento é possível, mas não é obrigatória. Também é importante observar que a utilização de modelagem diversa desta deve ser aventada.

Neste capítulo, a análise da interferência cocanal será feita para os seguintes ambientes de rádio móvel:

- Rayleigh/Rayleigh - no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh.
- Nakagami/Rayleigh - no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Nakagami e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh. A análise da interferência cocanal em ambiente Nakagami/Rayleigh inclui a análise da interferência cocanal em ambiente Rayleigh/Rayleigh.
- Nakagami/Nakagami - no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Nakagami. A análise da interferência cocanal em ambiente Nakagami/Nakagami inclui a análise da interferência cocanal em ambiente Nakagami/Rayleigh e em ambiente Rayleigh/Rayleigh.
- Rice/Rayleigh - no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rice e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh. A análise da interferência cocanal em ambiente Rice/Rayleigh inclui a análise da interferência cocanal em ambiente Rayleigh/Rayleigh.
- Rice/Rice - no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rice. A análise da interferência cocanal em ambiente Rice/Rice inclui a análise da interferência cocanal em ambiente Rice/Rayleigh e em ambiente Rayleigh/Rayleigh.

- Log-normal/Log-normal - no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Log-normal.
- Rayleigh/Suzuki - no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rayleigh e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki.
- Nakagami/Suzuki - no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Nakagami e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki. A análise da interferência cocanal em ambiente Nakagami/Suzuki inclui a análise da interferência cocanal em ambiente Rayleigh/Suzuki.
- Rice/Suzuki - no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rice e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki. A análise da interferência cocanal em ambiente Rice/Suzuki inclui a análise da interferência cocanal em ambiente Rayleigh/Suzuki.
- Suzuki/Suzuki - no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki.
- Nakagami Sombreado/Suzuki - no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Nakagami Sombreado e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki. A análise da interferência cocanal em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki inclui a análise da interferência cocanal em ambiente Suzuki/Suzuki.
- Rice Sombreado/Suzuki - no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rice Sombreado e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki. A análise da interferência cocanal em ambiente Rice Sombreado/Suzuki inclui a análise da interferência cocanal em ambiente Suzuki/Suzuki.

3.2 Probabilidade de Interferência Cocanal

Um rádio móvel considerado recebe o sinal desejado com envoltória, r , de sua estação rádio base, e também recebe n sinais interferentes (n sinais ativos) com envoltórias, $\{r_i : i = 1, \dots, n\}$,¹ das estações rádio base interferentes.

¹O número, n , de sinais interferentes ativos é uma variável aleatória discreta. Considerando a existência de N estações rádio base interferentes, o número de sinais interferentes ativos pode assumir os valores $0, \dots, N$. Portanto, $n = 0$ indica a inexistência de sinais interferentes ativos e $n = N$ indica que todos os cocanais estão ativos. Sendo n o valor genérico assumido pela variável aleatória, n , e considerando que existem sinais interferentes, ou seja, que o valor, n , assumido pela variável aleatória n é dado por $n > 0$, ou seja, $n = 1, \dots, N$, são obtidas as n envoltórias, $\{r_i : i = 1, \dots, n\}$.

Portanto, a relação sinal-desejado/ruído, γ , é expressa por (Equação 2.195)

$$\gamma \triangleq \frac{\mathbf{r}^2}{2n_0} \quad (3.1)$$

onde $\mathbf{r}^2/2$ e n_0 são, respectivamente, a potência do sinal desejado e a média da potência de ruído. As relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são expressas por (Equação 2.195)

$$\gamma_i \triangleq \frac{\mathbf{r}_i^2}{2n_0} : i = 1, \dots, n \quad (3.2)$$

onde $\{\mathbf{r}_i^2/2 : i = 1, \dots, n\}$ são as potências das interferências existentes.

As interferências que chegam à antena receptora compõem-se dando origem ao sinal interferente total. A interferência total é também conhecida por interferência conjunta ou interferência composta. Assim, o rádio móvel considerado recebe um sinal interferente total com envoltória, \mathbf{y} . Portanto, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é expressa por (Equação 2.195)

$$\mathbf{x} \triangleq \frac{\mathbf{y}^2}{2n_0} \quad (3.3)$$

onde $\mathbf{y}^2/2$ é a potência da interferência total. A relação interferência-total/ruído é também conhecida por relação interferência-conjunta/ruído ou relação interferência-composta/ruído.

3.2.1 Sistemas de Adição Linear

Os sistemas de adição linear são aqueles nos quais, a envoltória, \mathbf{y} , da interferência total é dada por

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \quad (3.4)$$

onde $\{\mathbf{r}_i : i = 1, \dots, n\}$ são as envoltórias das interferências existentes.² Das Equações 3.2-3.4, obtém-se a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada por

$$\mathbf{x} = \left[\sum_{i=1}^n \gamma_i^{1/2} \right]^2 \quad (3.5)$$

onde $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$ são as relações interferência/ruído das interferências existentes.

²As envoltórias das interferências existentes são variáveis aleatórias independentes. É importante lembrar que a densidade da soma de variáveis aleatórias independentes é a convolução de suas densidades. Portanto, da Equação 3.4, torna-se possível obter a densidade da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total, para os sistemas de adição linear.

3.2.2 Sistemas de Adição Quadrática

Os sistemas de adição quadrática são aqueles nos quais a envoltória, \mathbf{y} , da interferência total é dada por

$$\mathbf{y} = \left[\sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

onde $\{\mathbf{r}_i : i = 1, \dots, n\}$ são as envoltórias das interferências existentes. Das Equações 3.2, 3.3 e 3.6, obtém-se a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada por

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad (3.7)$$

onde $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$ são as relações interferência/ruído.³

3.2.3 Definição de Interferência Cocanal

A interferência cocanal pode ser definida de duas formas. Estas definições são chamadas, apenas a título de identificação, de Definição A e Definição B.

Definição A: O rádio móvel considerado sofre interferência cocanal sempre que a envoltória, \mathbf{r} , do sinal desejado não exceder simultaneamente:

- a envoltória, \mathbf{y} , da interferência total, por uma razão de proteção, R_r , e
- a mínima envoltória, r_0 , necessária à sua recepção adequada.

Definição B: O rádio móvel considerado sofre interferência cocanal sempre que a relação sinal-desejado/ruído, γ , não exceder simultaneamente:

- a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , por uma razão de proteção, R_γ , e
- a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à sua recepção adequada.

Das Equações 3.1 e 3.3, verifica-se facilmente que a Definição A e a Definição B são análogas. Conclui-se também que a razão de proteção, R_γ , para a relação sinal/ruído e a razão de proteção, R_r , para a envoltória, se relacionam através da expressão

$$R_\gamma = R_r^2 \quad (3.8)$$

³As relações interferência/ruído são variáveis aleatórias independentes. É importante lembrar que a densidade da soma de variáveis aleatórias independentes é a convolução de suas densidades. Portanto, da Equação 3.7, torna-se possível obter a densidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , para sistemas de adição quadrática.

e que a mínima relação sinal desejado ruído, γ_0 , e a mínima envoltória, r_0 , necessárias à adequada recepção do sinal desejado, se relacionam através da expressão

$$\gamma_0 = \frac{r_0^2}{2n_0} \quad (3.9)$$

Para os sistemas móveis nos quais a interferência é a maior preocupação, despreza-se o mínimo sinal necessário à adequada recepção, ou seja, tem-se

$$r_0 = 0 \quad (3.10)$$

e

$$\gamma_0 = 0 \quad (3.11)$$

É importante observar que a Definição A e a Definição B, apesar de serem análogas, têm aplicação diferenciada. Para os sistemas de adição linear a Definição A é a mais indicada por se utilizar da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total. Observa-se, da Equação 3.4 e da Nota 2, que é possível calcular a probabilidade de interferência cocanal para os sistemas de adição linear através da Definição A. Para os sistemas de adição quadrática a Definição B é a mais indicada por se utilizar da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} . Observa-se, da Equação 3.7 e da Nota 3, que é possível calcular a probabilidade de interferência cocanal para os sistemas de adição quadrática através da Definição B.

3.2.4 Probabilidade de Interferência Cocanal Total

Da definição de interferência cocanal,⁴ obtém-se a probabilidade, $P(IC)$,⁵ de interferência cocanal total expressa por⁶

$$P(IC) = \sum_{n=0}^N P(IC | \mathbf{n} = n) P(\mathbf{n} = n) \quad (3.12)$$

onde $P(IC | \mathbf{n} = n)$ é a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número, \mathbf{n} , de sinais interferentes ativos, N é o número de cocanais considerados⁷ e $P(\mathbf{n} = n)$ é a probabilidade do número, \mathbf{n} , de sinais interferentes ativos.

⁴Utilizando-se a Equação 3.4 na Definição A, ou ainda, utilizando-se a Equação 3.7 na Definição B, é possível perceber que a interferência cocanal é um evento que depende dos valores assumidos pela variável aleatória, \mathbf{n} .

⁵ $P(A)$ denota a probabilidade do evento A [15]. Assim, $P(IC)$ denota a probabilidade de interferência cocanal total ou incondicional.

⁶Do teorema da probabilidade total [15].

⁷Em geral, consideram-se apenas os seis cocanais mais próximos, ou seja, tem-se $N = 6$.

Sabendo-se que os sinais interferentes são independentes e considerando que possuam idêntica probabilidade de estar ativos, obtém-se a probabilidade, $P(\mathbf{n} = n)$, do número, \mathbf{n} , de sinais interferentes ativos, dada por⁸

$$P(\mathbf{n} = n) = \binom{N}{n} p^n (1 - p)^{N-n} \quad (3.13)$$

onde p é a probabilidade do sinal interferente estar ativo.

Para um sistema móvel com probabilidade de bloqueio de célula, B_c , e com número de canais por célula, N_c , tem-se que a probabilidade, p , do sinal interferente estar ativo, é dada por

$$p = B_c^{\frac{1}{N_c}} \quad (3.14)$$

Para sistemas nos quais a interferência é a maior preocupação, tem-se

$$P(IC | \mathbf{n} = 0) = 0 \quad (3.15)$$

A Equação 3.15 é obtida tanto utilizando-se a Definição A e as Equações 3.4 e 3.10 quanto utilizando-se a Definição B e as Equações 3.7 e 3.11. Portanto, é válida tanto para os sistemas de adição quadrática quanto para os sistemas de adição linear.

Assim obtém-se, da Equação 3.12, a probabilidade de interferência cocanal total, expressa por

$$P(IC) = \sum_{n=1}^N P(IC | \mathbf{n} = n) P(\mathbf{n} = n) \quad (3.16)$$

⁸Diz-se que uma variável aleatória \mathbf{n} tem distribuição binomial de ordem N se a probabilidade de \mathbf{n} assumir os valores $0, 1, \dots, N$ é dada pela Equação 3.13. Então, a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{n}}(\mathbf{n} = n)$, é dada por

$$f_{\mathbf{n}}(\mathbf{n} = n) = \sum_{k=0}^N \binom{N}{k} p^k (1 - p)^{N-k} \delta(n - k)$$

e a função cumulativa de probabilidade (ou distribuição de probabilidade), $F_{\mathbf{n}}(\alpha)$, é dada por

$$F_{\mathbf{n}}(\alpha) = \sum_{k=0}^m \binom{N}{k} p^k (1 - p)^{N-k} : m \leq \alpha < (m + 1)$$

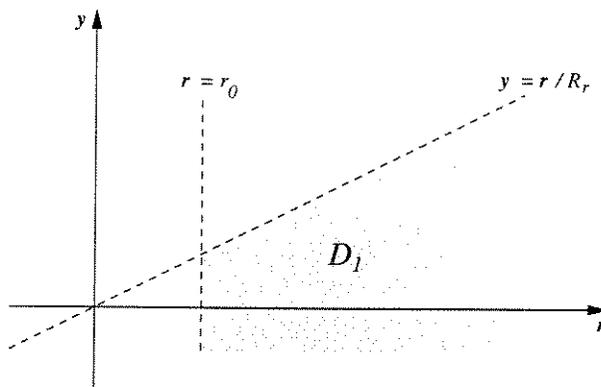


Figura 3.1: Região D_1 do plano ry .

3.2.5 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Sistemas de Adição Linear.

Da Definição A, obtém-se a probabilidade, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, de interferência cocanal condicional ao número, \mathbf{n} , de sinais interferentes existentes expressa por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - P(\mathbf{r} > r_0, \mathbf{y} \leq \mathbf{r}/R_r) \tag{3.17}$$

onde $P(\mathbf{r} > r_0, \mathbf{y} \leq \mathbf{r}/R_r)$ ⁹ é a probabilidade conjunta dos eventos $\{\mathbf{r} > r_0\}$ e $\{\mathbf{y} \leq \mathbf{r}/R_r\}$. É importante lembrar que

$$P(\mathbf{r} > r_0, \mathbf{y} \leq \mathbf{r}/R_r) = P[(\mathbf{r}, \mathbf{y}) \in D_1] \tag{3.18}$$

onde D_1 é a região do plano ry na qual $\{\mathbf{r} > r_0\}$ e $\{\mathbf{y} \leq \mathbf{r}/R_r\}$ (ver Figura 3.1).

A probabilidade de que o ponto (\mathbf{r}, \mathbf{y}) pertença a uma região, D_{ry} , do plano ry é dada por

$$P[(\mathbf{r}, \mathbf{y}) \in D] = 1 - \int_{D_{ry}} \int f_{\mathbf{r}, \mathbf{y}}(r, y) dy dr \tag{3.19}$$

onde $f_{\mathbf{r}, \mathbf{y}}(r, y)$ é a densidade conjunta da envoltória, \mathbf{r} , do sinal desejado e da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total. Sabendo-se que a envoltória, \mathbf{r} , do sinal desejado e a envoltória, \mathbf{y} , da interferência total são variáveis aleatórias independentes, assim obtém-se

$$f_{\mathbf{r}, \mathbf{y}}(r, y) = f_{\mathbf{r}}(r) f_{\mathbf{y}}(y) \tag{3.20}$$

⁹ $P(A, B)$ denota a probabilidade conjunta dos eventos A e B .

onde $f_{\mathbf{r}}(r)$ e $f_{\mathbf{y}}(y)$ são, respectivamente, as funções densidade de probabilidade das envoltórias do sinal desejado e da interferência total. Deve-se, ainda, dar atenção ao fato de que $f_{\mathbf{r}}(r) = 0$ para $r < 0$ e $f_{\mathbf{y}}(y) = 0$ para $y < 0$.

Assim,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_{r_0}^{\infty} f_{\mathbf{r}}(r) \int_0^{\frac{r}{R_r}} f_{\mathbf{y}}(y) dy dr \quad (3.21)$$

onde $f_{\mathbf{r}}(r)$ e $f_{\mathbf{y}}(y)$ são, respectivamente, as funções densidade de probabilidade das envoltórias do sinal desejado e da interferência total.

Alternativamente, é possível considerar os sinais interferentes independentemente e, portanto,

$$\int_0^{\frac{r}{R_r}} f_{\mathbf{y}}(y) dy = \int_0^{\frac{r}{R_r}} f_{\mathbf{r}_1}(r_1) \int_0^{\frac{r}{R_r} - r_1} f_{\mathbf{r}_2}(r_2) \dots \int_0^{\frac{r}{R_r} - r_1 - \dots - r_{n-1}} f_{\mathbf{r}_n}(r_n) dr_n \dots dr_2 dr_1 \quad (3.22)$$

onde $\{f_{\mathbf{r}_i}(r_i) : i = 1, \dots, n\}$ são as funções densidade de probabilidade das envoltórias das interferências existentes. O termo da direita da Equação 3.22 apresenta dificuldades na obtenção da função densidade de probabilidade da interferência total. Por outro lado, o termo da esquerda da Equação 3.22 apresenta dificuldades devido ao fato de serem necessárias sucessivas integrações. Entretanto, considerando que é possível utilizar aproximações para a função densidade de probabilidade da interferência total, tornou-se muito pouco útil considerar os sinais independentemente.

Para sistemas móveis nos quais a interferência é a maior preocupação, ou seja, considerando $r_0 = 0$, obtém-se, da Equação 3.17,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - P(\mathbf{y} \leq \mathbf{r}/R_r) \quad (3.23)$$

onde $P(\mathbf{y} \leq \mathbf{r}/R_r)$ é a probabilidade do evento $\{\mathbf{y} \leq \mathbf{r}/R_r\}$. É importante lembrar que

$$P(\mathbf{y} \leq \mathbf{r}/R_r) = P[(\mathbf{r}, \mathbf{y}) \in D_2] \quad (3.24)$$

onde D_2 é a região do plano ry na qual $\{\mathbf{y} \leq \mathbf{r}/R_r\}$ (ver Figura 3.2).

Deve-se, ainda, lembrar que $f_{\mathbf{r}}(r) = 0$ para $r < 0$ e $f_{\mathbf{y}}(y) = 0$ para $y < 0$. Assim,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^{\infty} f_{\mathbf{r}}(r) \int_0^{\frac{r}{R_r}} f_{\mathbf{y}}(y) dy dr \quad (3.25)$$

Ou ainda,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^{\infty} f_{\mathbf{y}}(y) \int_y^{\infty} f_{\mathbf{r}}(r) dr dy \quad (3.26)$$

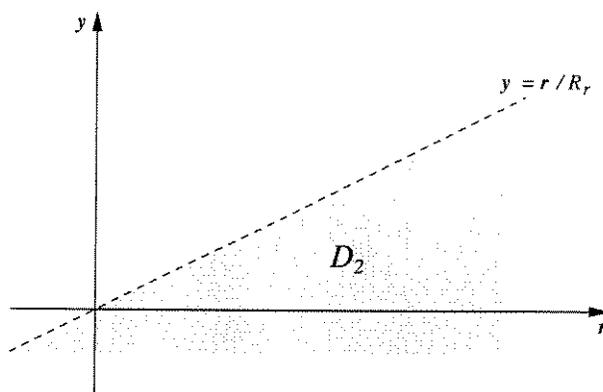


Figura 3.2: Região D_2 do plano ry .

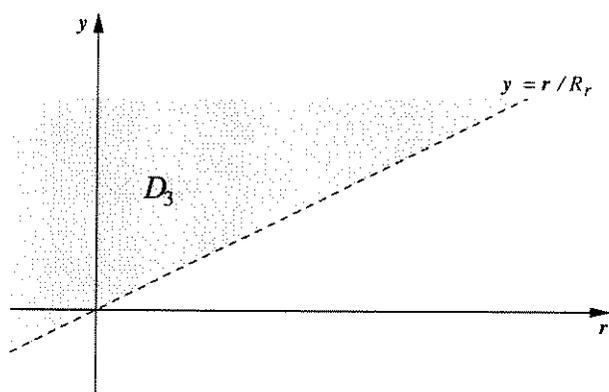


Figura 3.3: Região D_3 do plano ry .

Alternativamente à Equação 3.23, tem-se ainda,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = P(\mathbf{r} \leq \mathbf{y} R_r) \tag{3.27}$$

onde $P(\mathbf{r} \leq \mathbf{y} R_r)$ é a probabilidade do evento $\{\mathbf{r} \leq \mathbf{y} R_r\}$. É importante lembrar que

$$P(\mathbf{r} \leq \mathbf{y} R_r) = P[(\mathbf{r}, \mathbf{y}) \in D_3] \tag{3.28}$$

onde D_3 é a região do plano ry na qual $\{\mathbf{r} \leq \mathbf{y} R_r\}$ (ver Figura 3.3).

Deve-se, ainda, lembrar que $f_{\mathbf{r}}(r) = 0$ para $r < 0$ e $f_{\mathbf{y}}(y) = 0$ para $y < 0$. Assim,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{y}}(y) \int_0^{R_r y} f_{\mathbf{r}}(r) dr dy \tag{3.29}$$

Ou ainda,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{r}}(r) \int_{\frac{r}{R_r}}^\infty f_{\mathbf{y}}(y) dy dr \tag{3.30}$$

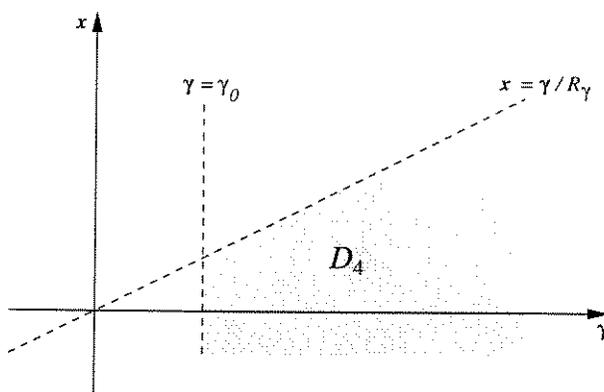


Figura 3.4: Região D_4 do plano γx .

3.2.6 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Sistemas de Adição Quadrática

Da Definição B, obtém-se a probabilidade, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, de interferência cocanal condicional ao número, \mathbf{n} , de sinais interferentes existentes expressa por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - P(\gamma > \gamma_0, \mathbf{x} \leq \gamma/R_\gamma) \tag{3.31}$$

onde $P(\gamma > \gamma_0, \mathbf{x} \leq \gamma/R_\gamma)$ é a probabilidade conjunta dos eventos $\{\gamma > \gamma_0\}$ e $\{\mathbf{x} \leq \gamma/R_\gamma\}$. É importante lembrar que

$$P(\gamma > \gamma_0, \mathbf{x} \leq \gamma/R_\gamma) = P[(\gamma, \mathbf{x}) \in D_4] \tag{3.32}$$

onde D_4 é a região do plano γx na qual $\{\gamma > \gamma_0\}$ e $\{\mathbf{x} \leq \gamma/R_\gamma\}$ (ver Figura 3.4).

A probabilidade de que o ponto (γ, \mathbf{x}) pertença a uma região, $D_{\gamma x}$, do plano γx é dada por

$$P[(\gamma, \mathbf{x}) \in D] = 1 - \int_{D_{\gamma x}} \int f_{\gamma, \mathbf{x}}(\gamma, x) dx d\gamma \tag{3.33}$$

onde $f_{\gamma, \mathbf{x}}(\gamma, x)$ é a densidade conjunta da relação sinal-desejado/ruído, γ , e da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} . Sabendo-se que a relação sinal-desejado/ruído, γ , e a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , são variáveis aleatórias independentes, obtém-se

$$f_{\gamma, \mathbf{x}}(\gamma, x) = f_\gamma(\gamma) f_{\mathbf{x}}(x) \tag{3.34}$$

onde $f_\gamma(\gamma)$ e $f_{\mathbf{x}}(x)$ são, respectivamente, as funções densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído e da relação interferência-total/ruído. Deve-se, ainda, dar atenção ao fato de que $f_\gamma(\gamma) = 0$ para $\gamma < 0$ e $f_{\mathbf{x}}(x) = 0$ para $x < 0$.

Assim,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_{\gamma_0}^{\infty} f_{\gamma}(\gamma) \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}}} f_{\mathbf{x}}(x) dx d\gamma \quad (3.35)$$

onde $f_{\gamma}(\gamma)$ e $f_{\mathbf{x}}(x)$ são, respectivamente, as funções densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído e da relação interferência-total/ruído.

Alternativamente, é possível considerar os sinais interferentes independentemente e, portanto,

$$\int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}}} f_{\mathbf{x}}(x) = \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}} - \gamma_1} f_{\gamma_2}(\gamma_2) \dots \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}} - \gamma_1 - \dots - \gamma_{n-1}} f_{\gamma_n}(\gamma_n) d\gamma_n \dots d\gamma_2 d\gamma_1 \quad (3.36)$$

onde $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$ são as funções densidade de probabilidade das relações interferência/ruído. O termo da direita da Equação 3.36 apresenta dificuldades na obtenção da função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído. Por outro lado, o termo da esquerda da Equação 3.36 apresenta dificuldades devido ao fato de serem necessárias sucessivas integrações. Entretanto, considerando que é possível utilizar aproximações para a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, tornou-se muito pouco útil considerar os sinais independentemente.

Para sistemas móveis nos quais a interferência é a maior preocupação, ou seja, considerando $\gamma_0 = 0$, obtém-se, da Equação 3.31,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - P(\mathbf{x} \leq \gamma/R_{\gamma}) \quad (3.37)$$

onde $P(\mathbf{x} \leq \gamma/R_{\gamma})$ é a probabilidade do evento $\{\mathbf{x} \leq \gamma/R_{\gamma}\}$. É importante lembrar que

$$P(\mathbf{x} \leq \gamma/R_{\gamma}) = P[(\gamma, \mathbf{x}) \in D_5] \quad (3.38)$$

onde D_5 é a região do plano γx na qual $\{\mathbf{x} \leq \gamma/R_{\gamma}\}$ (ver Figura 3.5).

Deve-se, ainda, lembrar que $f_{\gamma}(\gamma) = 0$ para $\gamma < 0$ e $f_{\mathbf{x}}(x) = 0$ para $x < 0$.

Assim,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^{\infty} f_{\gamma}(\gamma) \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}}} f_{\mathbf{x}}(x) dx d\gamma \quad (3.39)$$

Ou ainda,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^{\infty} f_{\mathbf{x}}(x) \int_{R_{\gamma} x}^{\infty} f_{\gamma}(\gamma) d\gamma dx \quad (3.40)$$

Alternativamente à Equação 3.37, tem-se ainda,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = P(\gamma \leq \mathbf{x} R_{\gamma}) \quad (3.41)$$

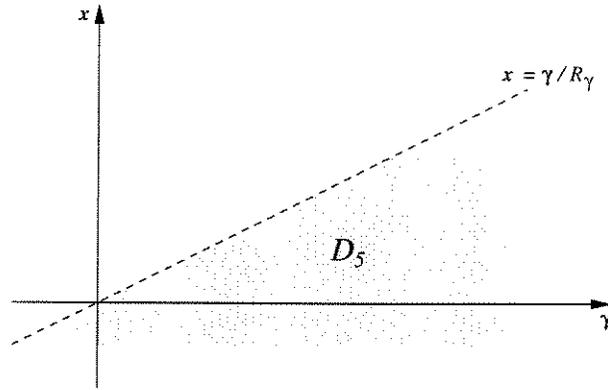


Figura 3.5: Região D_5 do plano γx .

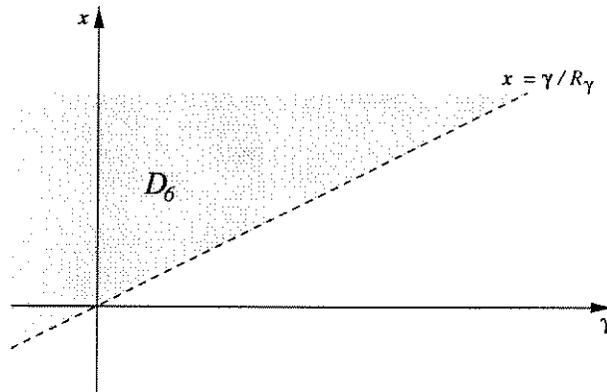


Figura 3.6: Região D_6 do plano γx .

onde $P(\gamma \leq x R_\gamma)$ é a probabilidade do evento $\{\gamma \leq x R_\gamma\}$. É importante lembrar que

$$P(\gamma \leq x R_\gamma) = P[(\gamma, x) \in D_6] \tag{3.42}$$

onde D_6 é a região do plano γx na qual $\{\gamma \leq x R_\gamma\}$ (ver Figura 3.6).

Deve-se, ainda, lembrar que $f_\gamma(\gamma) = 0$ para $\gamma < 0$ e $f_x(x) = 0$ para $x < 0$.

Assim,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_x(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \tag{3.43}$$

Ou ainda,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_\gamma(\gamma) \int_{\frac{\gamma}{R_\gamma}}^\infty f_x(x) dx d\gamma \tag{3.44}$$

Sabendo-se que a relação sinal-desejado/interferência-total, s , é definida por

$$s \triangleq \frac{\gamma}{x} \tag{3.45}$$

obtem-se, das Equações 3.37 e 3.45, a probabilidade, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, de interferência cocanal condicional ao número, \mathbf{n} , de sinais interferentes existentes expressa por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - P(\mathbf{s} > R_\gamma) \quad (3.46)$$

onde $P(\mathbf{s} > R_\gamma)$ é a probabilidade do evento $\{\mathbf{s} > R_\gamma\}$. É importante lembrar que

$$P(\mathbf{s} > R_\gamma) = F_{\mathbf{s}}(\infty) - F_{\mathbf{s}}(R_\gamma) \quad (3.47)$$

onde $F_{\mathbf{s}}(\alpha)$ é a a função cumulativa de probabilidade (ou distribuição de probabilidade) da relação sinal-desejado/interferência-total, \mathbf{s} .

Assim,¹⁰

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_{R_\gamma}^{\infty} f_{\mathbf{s}}(s) ds \quad (3.48)$$

Ainda, da Equação 3.46 (ou das Equações 3.41 e 3.45), obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = P(\mathbf{s} \leq R_\gamma) \quad (3.49)$$

onde $P(\mathbf{s} \leq R_\gamma)$ é a probabilidade do evento $\{\mathbf{s} \leq R_\gamma\}$. É importante lembrar que

$$P(\mathbf{s} \leq R_\gamma) = F_{\mathbf{s}}(R_\gamma) \quad (3.50)$$

onde $F_{\mathbf{s}}(\alpha)$ é a a função cumulativa de probabilidade (ou distribuição de probabilidade) da relação sinal-desejado/interferência-total, \mathbf{s} .

Assim,¹⁰

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_{-\infty}^{R_\gamma} f_{\mathbf{s}}(s) ds \quad (3.51)$$

3.3 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rayleigh/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é calculada em ambiente Rayleigh/Rayleigh, ou seja, em um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh.

¹⁰A distribuição de probabilidade, $F_{\mathbf{s}}(\alpha)$, da relação sinal-desejado/interferência-total, \mathbf{s} , é dada por

$$F_{\mathbf{s}}(\alpha) \triangleq \int_{-\infty}^{\alpha} f_{\mathbf{s}}(s) ds$$

onde $f_{\mathbf{s}}(s)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/interferência-total, \mathbf{s} .

Cinco métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rayleigh/Rayleigh são mostrados. Estes métodos são chamados, apenas a título de identificação, de Método A, Método B, Método C, Método D e Método E.

No Método A, no Método B, no Método C e no Método D, consideram-se os sistemas de adição quadrática. Para o desenvolvimento destes métodos, é necessário notar que, para o ambiente Rayleigh/Rayleigh:

- a relação sinal-desejado/ruído, γ , é modelada pela densidade Exponencial. Portanto, da Equação 2.206, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad \gamma \geq 0 \quad (3.52)$$

onde $\bar{\gamma}$ e $var(\gamma) = (\bar{\gamma})^2$ são, respectivamente, a média e a variância da relação sinal-desejado/ruído, γ .

- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, também são modeladas pela densidade Exponencial. Portanto, da Equação 2.206, tem-se

$$f_{\gamma_i}(\gamma_i) = \frac{1}{\bar{\gamma}_i} \exp\left(-\frac{\gamma_i}{\bar{\gamma}_i}\right) \quad \gamma_i \geq 0 : i = 1, \dots, n \quad (3.53)$$

onde $\{\bar{\gamma}_i : i = 1, \dots, n\}$ e $\{var(\gamma_i) = (\bar{\gamma}_i)^2 : i = 1, \dots, n\}$ são, respectivamente, as médias e as variâncias das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$.

No Método E, consideram-se os sistemas de adição linear. Para o desenvolvimento deste método, é necessário notar que, para o ambiente Rayleigh/Rayleigh:

- a envoltória do sinal desejado, r , é modelada pela densidade Rayleigh. Portanto, das Equações 2.4 e 2.5, tem-se

$$f_r(r) = \frac{\pi r}{2(\bar{r})^2} \exp\left[-\frac{\pi r^2}{4(\bar{r})^2}\right] \quad r \geq 0 \quad (3.54)$$

onde \bar{r} e $var(r) = \left(\frac{4}{\pi} - 1\right) (\bar{r})^2$ são, respectivamente, a média e a variância da envoltória, r , do sinal desejado.

- as envoltórias, $\{r_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências existentes, são também modeladas pela densidade Rayleigh. Portanto, das Equações 2.4 e 2.5, tem-se

$$f_{r_i}(r_i) = \frac{\pi r_i}{2(\bar{r}_i)^2} \exp\left[-\frac{\pi r_i^2}{4(\bar{r}_i)^2}\right] \quad r_i \geq 0 : i = 1, \dots, n \quad (3.55)$$

onde $\{\bar{r}_i : i = 1, \dots, n\}$ e $\{var(\mathbf{r}_i) = \left(\frac{4}{\pi} - 1\right) (\bar{r}_i)^2 : i = 1, \dots, n\}$ são, respectivamente, as médias e as variâncias das envoltórias, $\{\mathbf{r}_i : i = 1, \dots, n\}$.

3.3.1 Método A

Uma solução analítica [17] para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rayleigh/Rayleigh, é obtida a partir das Equações 3.35 e 3.36, ou seja,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_{\gamma_0}^{\infty} f_{\gamma}(\gamma) \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) \times \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}} - \gamma_1} f_{\gamma_2}(\gamma_2) \dots \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}} - \gamma_1 - \dots - \gamma_{n-1}} f_{\gamma_n}(\gamma_n) d\gamma_n \dots d\gamma_2 d\gamma_1 d\gamma \quad (3.56)$$

onde γ_0 é a mínima relação sinal-desejado/ruído necessária à recepção adequada do sinal desejado; R_{γ} é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_{\gamma}(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$ são as funções densidade de probabilidade das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$.

Considerando um sistema sem interferências, obtém-se, da Equação 3.56,

$$P(IC | \mathbf{n} = 0) = 1 - \int_{\gamma_0}^{\infty} f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (3.57)$$

Das Equações 3.52 e 3.57, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = 0) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}\right) \quad (3.58)$$

Considerando um sistema com uma interferência, obtém-se, da Equação 3.56,

$$P(IC | \mathbf{n} = 1) = 1 - \int_{\gamma_0}^{\infty} f_{\gamma}(\gamma) \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 d\gamma \quad (3.59)$$

Das Equações 3.52, 3.53 e 3.57, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = 1) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}\right) + \frac{1}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma}\bar{\gamma}_1}} \exp\left[-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma}\bar{\gamma}_1}\right)\right] \quad (3.60)$$

Ainda, das Equações 3.58 e 3.60, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = 1) = P(IC | \mathbf{n} = 0) + \Delta P_1 \quad (3.61)$$

onde ΔP_1 é dado por

$$\Delta P_1 = \frac{1}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma}\bar{\gamma}_1}} \exp\left[-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma}\bar{\gamma}_1}\right)\right] \quad (3.62)$$

De forma semelhante, considerando um ambiente com duas interferências, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = 2) = P(IC | \mathbf{n} = 1) + \Delta P_2 \quad (3.63)$$

onde ΔP_2 é dado por

$$\Delta P_2 = \frac{1}{1 - \frac{\bar{\gamma}_1}{\bar{\gamma}_2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_2}} \exp \left[-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_2} \right) \right] - \Delta P_1 \right] \quad (3.64)$$

onde ΔP_1 é dado pela Equação 3.62.

Ainda, das Equações 3.61 e 3.63, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = 2) = P(IC | \mathbf{n} = 0) + \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (3.65)$$

Em geral, para múltiplas interferências, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = P(IC | \mathbf{n} = n - 1) + \Delta P_n \quad (3.66)$$

onde ΔP_n é dado por¹¹

$$\begin{aligned} \Delta P_n &= \frac{1}{1 - \frac{\bar{\gamma}_{n-1}}{\bar{\gamma}_n}} \left[\dots \left[\frac{1}{1 - \frac{\bar{\gamma}_1}{\bar{\gamma}_n}} \right. \right. \\ &\quad \times \left. \left. \left[\frac{1}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_n}} \exp \left[-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_n} \right) \right] - \Delta P_1 \right] \dots \right] - \Delta P_{n-1} \right] \end{aligned} \quad (3.67)$$

onde ΔP_1 é dado pela Equação 3.62.

Ainda, tem-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = P(IC | \mathbf{n} = 0) + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_n \quad (3.68)$$

Definem-se os parâmetros, $\{Z_i : i = 1, \dots, n\}$, como sendo as margens, dadas em decibéis, pelas quais o valor médio, $\bar{\gamma}$, da relação sinal desejado/ruído excede os valores médios, $\{\bar{\gamma}_i : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, multiplicados pela razão de proteção R_γ . Assim, as margens, $\{Z_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas em decibéis, são expressas por

$$Z_i = 10 \log \left(\frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}_i R_\gamma} \right) : i = 1, \dots, n \quad (3.69)$$

Obtém-se também,

$$Z_i = \bar{\Gamma} - \bar{\Gamma}_i - R_\Gamma : i = 1, \dots, n \quad (3.70)$$

¹¹A Equação 3.67 é válida para $n = 2, \dots, N$.

onde $\bar{\Gamma}$ é a média, dada em decibéis, da relação sinal-desejado/ruído, γ ; $\{\bar{\Gamma}_i : i = 1, \dots, n\}$ são as médias, dadas em decibéis, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, e $R_\Gamma = 10 \log R_\gamma$ é a razão de proteção, dada em decibéis, para a relação sinal/ruído.

Assim, obtém-se ΔP_n dado por¹²

$$\Delta P_n = \frac{1}{1 - 10^{\frac{z_n - z_{n-1}}{10}}} \left[\dots \left[\frac{1}{1 - 10^{\frac{z_n - z_1}{10}}} \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[\frac{1}{1 + 10^{\frac{z_n}{10}}} \exp \left[-\frac{1}{10^{\frac{R_0}{10}}} \left(1 + 10^{\frac{z_n}{10}} \right) \right] - \Delta P_1 \right] \dots \right] - \Delta P_{n-1} \right] \quad (3.71)$$

onde ΔP_1 é dado por

$$\Delta P_1 = \frac{1}{1 + 10^{\frac{z_1}{10}}} \exp \left[-\frac{1}{10^{\frac{R_0}{10}}} \left(1 + 10^{\frac{z_1}{10}} \right) \right] \quad (3.72)$$

Obtém-se também

$$P(IC | \mathbf{n} = 0) = 1 - \exp \left(-\frac{1}{10^{\frac{R_0}{10}}} \right) \quad (3.73)$$

e R_0 é a relação sinal-médio/sinal-mínimo, dada em decibéis, dada por

$$R_0 = 10 \log \left(\frac{\bar{\gamma}}{\gamma_0} \right) \quad (3.74)$$

Portanto, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, levando-se em conta a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, é dada pela Equação 3.68 onde ΔP_n é dado pela Equação 3.71; ΔP_1 é dado pela Equação 3.72; a probabilidade de interferência cocanal para sistemas sem interferência, $P(IC | \mathbf{n} = 0)$, é dada pela Equação 3.73, e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis, é dada pela Equação 3.74.

Considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$, não é possível utilizar as Equações 3.62, 3.64 e 3.67. Entretanto, deve-se utilizar¹³

$$\Delta P_n = \frac{1}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I}} \left[\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I} \Delta P_{n-1} + \frac{1}{(n-1)!} \left[\frac{\gamma_0}{R_\gamma \bar{\gamma}_I} \right]^{n-1} \exp \left[-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I} \right) \right] \right] \quad (3.75)$$

onde $\Delta P_0 = 0$.

Define-se o parâmetro, Z , como sendo a margem, dada em decibéis, pela qual o valor médio, $\bar{\gamma}$, da relação sinal desejado/ruído, γ , excede o valor médio, $\bar{\gamma}_I$, das igualmente distribuídas relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, multiplicado pela razão de proteção

¹²A Equação 3.71 é válida para $n = 2, \dots, N$.

¹³A Equação 3.75 é válida para $n = 1, \dots, N$.

R_γ . Assim, a margem, Z , dada em decibéis, é expressa por

$$Z = 10 \log \left(\frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}_I R_\gamma} \right) \quad (3.76)$$

Obtém-se também,

$$Z = \bar{\Gamma} - \bar{\Gamma} - R_\Gamma \quad (3.77)$$

onde $\bar{\Gamma}$ é a média, dada em decibéis, da relação sinal-desejado/ruído, γ ; $\bar{\Gamma}_I$ é a média, dada em decibéis, das igualmente distribuídas relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, e R_Γ é a razão de proteção, dada em decibéis, para a relação sinal/ruído.

Assim, obtém-se ΔP_n dado por¹⁴

$$\Delta P_n = \frac{1}{1 + 10^{\frac{Z}{10}}} \left[10^{\frac{Z}{10}} \Delta P_{n-1} + \frac{1}{(n-1)!} \left[\frac{10^{\frac{Z}{10}}}{10^{\frac{R_0}{10}}} \right]^{n-1} \exp \left[-\frac{1}{10^{\frac{R_0}{10}}} \left(1 + 10^{\frac{Z}{10}} \right) \right] \right] \quad (3.78)$$

onde $\Delta P_0 = 0$.

Portanto, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, levando-se em conta a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, é dada pela Equação 3.68 onde ΔP_n é dado pela Equação 3.78; a probabilidade de interferência cocanal para sistemas sem interferências, $P(IC | \mathbf{n} = 0)$, é dada pela Equação 3.73, e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis, é dada pela Equação 3.74.

Das Equações 3.68, 3.78, 3.73 e 3.74, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas na Figura 3.7 e 3.8.

As curvas mostradas na Figura 3.7 têm como parâmetro o número, n , de interferências existentes. Considera-se, ainda, $R_0 = 20$ dB.

As curvas mostradas na Figura 3.8 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis.

Nos sistemas móveis nos quais a interferência é a maior preocupação, ignora-se a mínima relação sinal-desejado/ruído necessária à adequada recepção do sinal desejado, ou seja, tem-se $\gamma_0 = 0$. Para os sistemas móveis nos quais a interferência é a maior preocupação, considerando um ambiente sem interferências, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = 0) = 0 \quad (3.79)$$

¹⁴A Equação 3.78 é válida para $n = 1, \dots, N$.

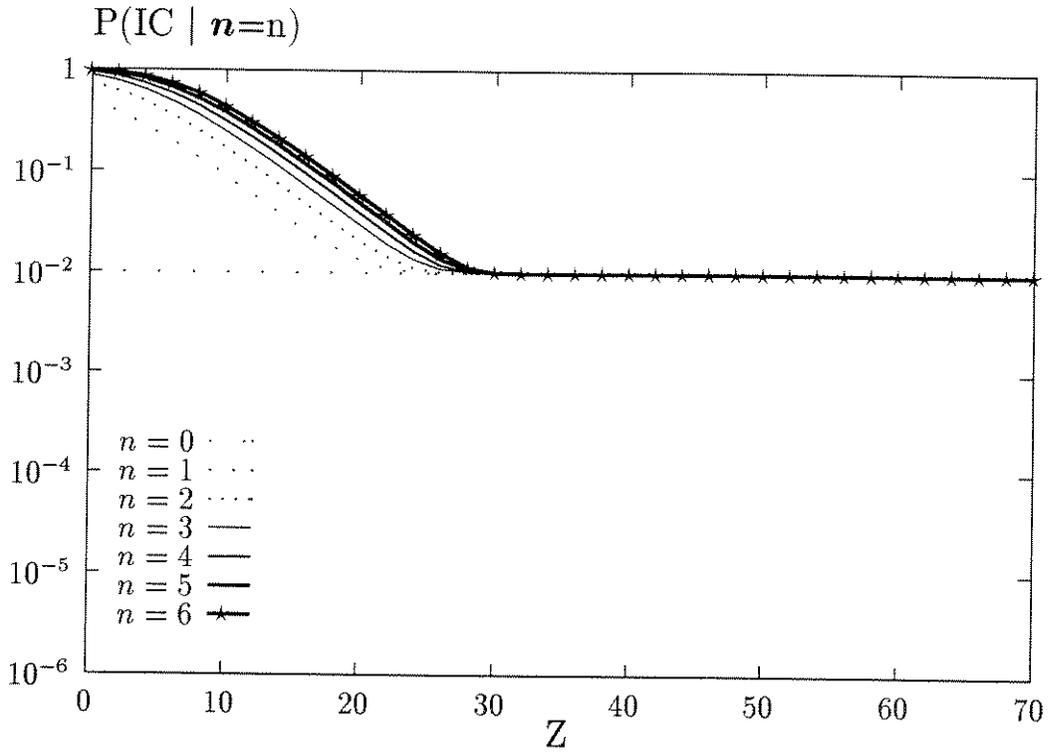


Figura 3.7: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $R_0 = 20$ dB, tendo como parâmetro o número, n , de sinais interferentes - Método A.

Ainda, considerando um ambiente com uma interferência, obtém-se

$$P(IC | n = 1) = \Delta P_1 \quad (3.80)$$

onde ΔP_1 é dado por

$$\Delta P_1 = \frac{1}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_1}} \quad (3.81)$$

Considerando um ambiente com duas interferências, obtém-se

$$P(IC | n = 2) = \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (3.82)$$

onde ΔP_2 é dado por

$$\Delta P_2 = \frac{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_1}}{\left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_1}\right) \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_2}\right)} \quad (3.83)$$

e ΔP_1 é dado pela Equação 3.81.

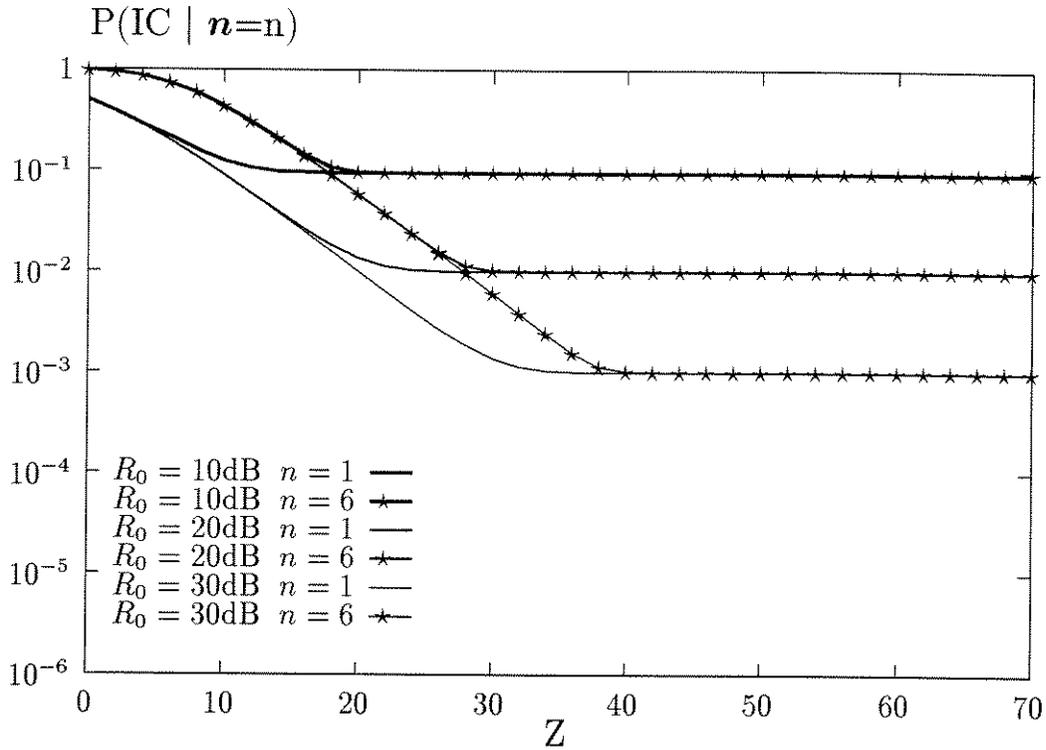


Figura 3.8: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis- Método A.

Em geral, para múltiplas interferências, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_n \quad (3.84)$$

onde ΔP_n é dado por¹⁵

$$\Delta P_n = \frac{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_1} \dots \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_{n-1}}}{\left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_1}\right) \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_2}\right) \dots \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_n}\right)} \quad (3.85)$$

e ΔP_1 é dado pela Equação 3.81

Após algumas manipulações matemáticas, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_1} \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_2} \dots \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_n}}{\left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_1}\right) \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_2}\right) \dots \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_n}\right)} \quad (3.86)$$

¹⁵A Equação 3.85 é válida para $n = 2, \dots, N$.

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{10^{\frac{Z_1}{10}} 10^{\frac{Z_2}{10}} \dots 10^{\frac{Z_n}{10}}}{\left(1 + 10^{\frac{Z_1}{10}}\right) \left(1 + 10^{\frac{Z_2}{10}}\right) \dots \left(1 + 10^{\frac{Z_n}{10}}\right)} \quad (3.87)$$

onde $\{Z_i : i = 1, \dots, n\}$ são as margens, dadas em decibéis, dadas pela Equação 3.69.

Considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$, obtém-se, da Equação 3.86,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \left[\frac{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I}}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I}} \right]^n \quad (3.88)$$

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \left[\frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1 + 10^{\frac{Z}{10}}} \right]^n \quad (3.89)$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Assim, da Equação 3.89, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetro o número, n , de interferências existentes, mostradas na Figura 3.9.

3.3.2 Método B

Um outro método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rayleigh/Rayleigh, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.90)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Das Equações 3.52 e 3.90, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^\infty \exp\left(-\frac{R_\gamma x}{\bar{\gamma}}\right) f_{\mathbf{x}}(x) dx \quad (3.91)$$

onde

$$\int_0^\infty \exp\left(-\frac{R_\gamma x}{\bar{\gamma}}\right) f_{\mathbf{x}}(x) dx = L\left[f_{\mathbf{x}}(x), \frac{R_\gamma}{\bar{\gamma}}\right] \quad (3.92)$$

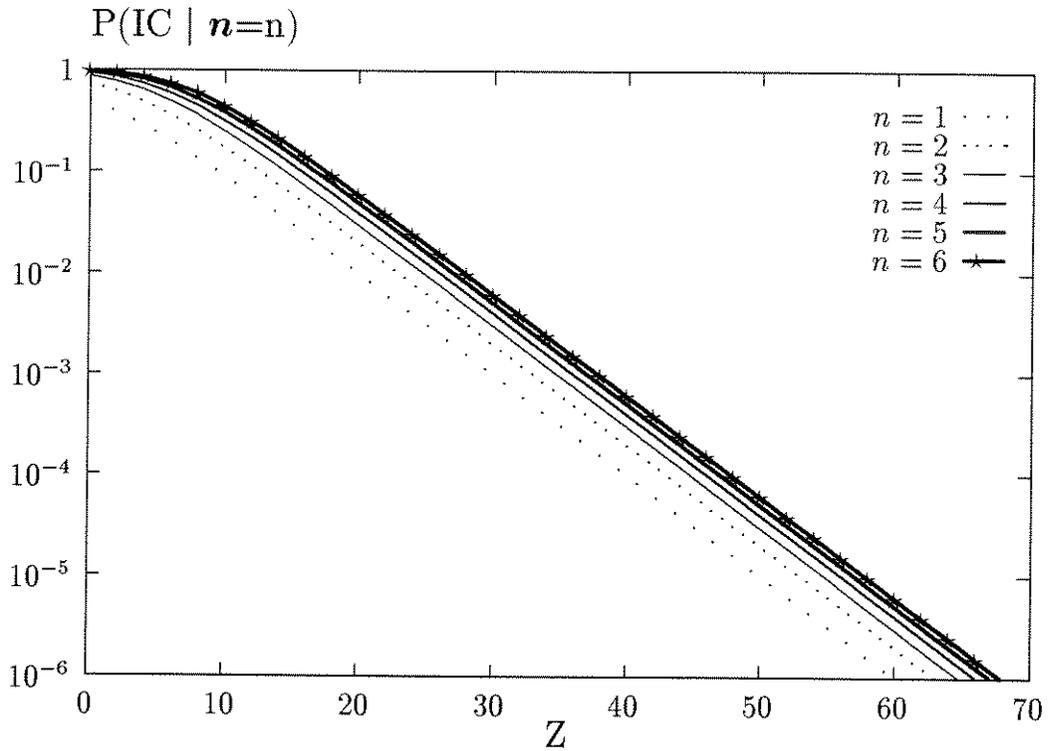


Figura 3.9: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetro o número, n , de sinais interferentes - Método A.

é a transformada de Laplace, no ponto $R_\gamma/\bar{\gamma}$, da função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, pode então ser escrita na forma de um produto de imagens Laplacianas,¹⁶ ou seja,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \prod_{i=1}^n L \left[f_{\gamma_i}(\gamma_i), \frac{R_\gamma}{\bar{\gamma}} \right] \tag{3.93}$$

onde $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$ são as funções densidade de probabilidade das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$.

As transformadas de Laplace, $\{L[f_{\gamma_i}(\gamma_i), R_\gamma/\bar{\gamma}] : i = 1, \dots, n\}$, no ponto $R_\gamma/\bar{\gamma}$, das funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferên-

¹⁶Da Nota 3 e do teorema da convolução [18].

cia/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas por

$$L \left[f_{\gamma_i}(\gamma_i), \frac{R_\gamma}{\bar{\gamma}} \right] = \int_0^\infty \exp \left(-\frac{R_\gamma \gamma_i}{\bar{\gamma}} \right) f_{\gamma_i}(\gamma_i) d\gamma_i : i = 1, \dots, n \quad (3.94)$$

Das Equações 3.53 e 3.94, obtém-se

$$L \left[f_{\gamma_i}(\gamma_i), \frac{R_\gamma}{\bar{\gamma}} \right] = \frac{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_i}}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_i}} : i = 1, \dots, n \quad (3.95)$$

Logo, das Equações 3.93 e 3.95, tem-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_i}}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_i}} \quad (3.96)$$

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{10^{\frac{Z_i}{10}}}{1 + 10^{\frac{Z_i}{10}}} \quad (3.97)$$

onde $\{Z_i : i = 1, \dots, n\}$ são as margens, dadas em decibéis, dadas pela Equação 3.69.

Considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$, obtém-se, da Equação 3.96,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \left[\frac{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I}}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I}} \right]^n \quad (3.98)$$

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \left[\frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1 + 10^{\frac{Z}{10}}} \right]^n \quad (3.99)$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

As soluções do Método B, dadas pelas Equações 3.97 e 3.99, coincidem com as soluções particulares equivalentes do Método A, dadas pelas Equações 3.87 e 3.89.

3.3.3 Método C

Um outro método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rayleigh/Rayleigh, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.100)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.53;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$;

obtém-se uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela densidade Gama [19], ou seja,

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{(\bar{\gamma}_I)^n} \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} \exp\left(-\frac{x}{\bar{\gamma}_I}\right) \quad x \geq 0 \quad (3.101)$$

Assim, das Equações 3.52, 3.100 e 3.101, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^\infty \frac{1}{(\bar{\gamma}_I)^n} \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} \exp\left(-\frac{x}{\bar{\gamma}_I}\right) \exp\left(-\frac{R_\gamma x}{\bar{\gamma}}\right) dx \quad (3.102)$$

Da Equação 3.102, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \left[\frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1 + 10^{\frac{Z}{10}}} \right]^n \quad (3.103)$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

A solução do Método C, dada pela Equação 3.103, coincide com a solução particular equivalente do Método A, dada pela Equação 3.89.

3.3.4 Método D

Um outro método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rayleigh/Rayleigh, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.104)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.53;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$;

obtem-se uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela densidade Normal [20], ou seja,

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad x \geq 0 \quad (3.105)$$

onde

$$\bar{x} = n\bar{\gamma}_I \quad (3.106)$$

e

$$\sigma_x^2 = n(\bar{\gamma}_I)^2 \quad (3.107)$$

são, respectivamente, a média e a variância da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Das Equações 3.52, 3.104 e 3.105, tem-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \left[1 - \exp\left(-\frac{R_\gamma x}{\bar{\gamma}}\right)\right] \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right] dx \quad (3.108)$$

Portanto, após algumas manipulações matemáticas, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{\sqrt{2}\bar{x}}{2\sigma_x}\right) - \frac{1}{2} \exp\left[\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\bar{x}}{\sigma_x} - \frac{R_\gamma\sigma_x}{\bar{\gamma}}\right)^2 - \left(\frac{\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2\right]\right] \\ &\times \operatorname{erfc}\left[-\frac{\sqrt{2}}{2}\left(\frac{\bar{x}}{\sigma_x} - \frac{R_\gamma\sigma_x}{\bar{\gamma}}\right)\right] \end{aligned} \quad (3.109)$$

onde $\operatorname{erfc}(\alpha)$ é a função erro complementar dada por [9]

$$\operatorname{erfc}(\alpha) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_\alpha^\infty \exp(-u^2) du \quad (3.110)$$

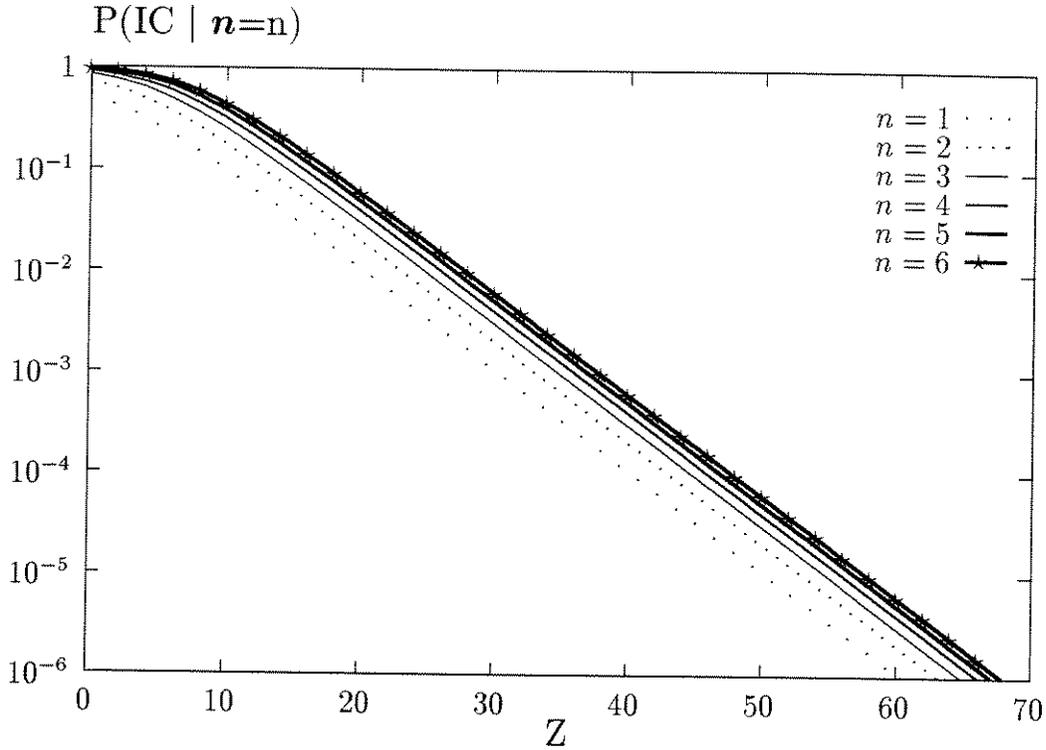


Figura 3.10: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetro o número, n , de sinais interferentes - Método D.

Das Equações 3.106, 3.107 e 3.109, obtém-se ainda

$$\begin{aligned}
 P(IC | n = n) &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{\sqrt{2n}}{2} \right) \\
 &\quad - \frac{1}{2} \exp \left[\frac{n}{2} \left[\left(1 - \frac{1}{10^{\frac{Z}{10}}} \right)^2 - 1 \right] \right] \operatorname{erfc} \left[-\frac{\sqrt{2n}}{2} \left(1 - \frac{1}{10^{\frac{Z}{10}}} \right) \right] \quad (3.111)
 \end{aligned}$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76, e $\operatorname{erfc}(x)$ é a função erro complementar dada pela Equação 3.110.

Assim, da Equação 3.111, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetro o número, n , de interferências existentes, mostradas na Figura 3.10.

3.3.5 Método E

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição linear, em um ambiente Rayleigh/Rayleigh, é obtido a partir da Equação 3.30, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{r}}(r) \int_{\frac{r}{R_r}}^\infty f_{\mathbf{y}}(y) dy dr \quad (3.112)$$

onde R_r é a razão de proteção para a envoltória, $f_{\mathbf{r}}(r)$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{r} , do sinal desejado, e $f_{\mathbf{y}}(y)$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total.

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\mathbf{r}_i}(r_i) : i = 1, \dots, n\}$, das envoltórias, $\{\mathbf{r}_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências existentes, são dadas pela Equação 3.55;
- para sistemas de adição linear, a envoltória, \mathbf{y} , da interferência total, é dada pela Equação 3.6;
- as envoltórias, $\{\mathbf{r}_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{r}_i = \bar{r}_I : i = 1, \dots, n\}$;

obtém-se uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{y}}(y)$, da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total, dada pela densidade Normal [16], ou seja,¹⁷

$$f_{\mathbf{y}}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{(y - \bar{y})^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad y \geq 0 \quad (3.113)$$

onde

$$\bar{y} = n\bar{r}_I \quad (3.114)$$

e

$$\sigma_y^2 = n\left(\frac{4}{\pi} - 1\right) (\bar{r}_I)^2 \quad (3.115)$$

são, respectivamente, a média e a variância da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total.

Das Equações 3.54, 3.112 e 3.113, tem-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \left[1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{R_r y}{\bar{r}}\right)^2\right]\right] \exp\left[-\frac{(y - \bar{y})^2}{2\sigma_y^2}\right] dy \quad (3.116)$$

¹⁷É importante dar relembrar que $f_{\mathbf{y}}(y) = 0$ para $y < 0$. Por este motivo foi imposta a restrição $x \geq 0$ à densidade Normal da Equação 3.113.

Das Equações 3.114, 3.115 e 3.109, obtém-se ainda

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} \int_0^\infty \left[1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{R_r y}{\bar{r}} \right)^2 \right] \right] \exp \left[-\frac{[y - n \bar{r}_I]^2}{2n \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right) (\bar{r}_I)^2} \right] dy \quad (3.117)$$

Fazendo $u = y / \left[n \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right) (\bar{r}_I)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ e substituindo na Equação 3.117, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} \int_0^\infty \left[1 - \exp \left[-\frac{\pi R_r^2 n \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right) (\bar{r}_I)^2}{(4\bar{r})^2} \right] \right] \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left[u - \sqrt{\frac{n}{\left(\frac{4}{\pi} - 1 \right)}} \right]^2 \right] du \quad (3.118)$$

Das Equações 2.11 e 2.196, obtém-se

$$\bar{\gamma} = \frac{2}{\pi n_0} (\bar{r})^2 \quad (3.119)$$

e

$$\bar{\gamma}_I = \frac{2}{\pi n_0} (\bar{r}_I)^2 \quad (3.120)$$

Das Equações 3.76, 3.119 e 3.120, obtém-se¹⁸

$$Z = 20 \log \left(\frac{\bar{r}}{\bar{r}_I R_r} \right) \quad (3.121)$$

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} \int_0^\infty \left[1 - \exp \left[-\frac{\pi n \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right)}{4 \cdot 10^{\frac{Z}{10}}} \right] \right] \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left[u - \sqrt{\frac{n}{\left(\frac{4}{\pi} - 1 \right)}} \right]^2 \right] dy \quad (3.122)$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.121.

Assim, da Equação 3.122, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetro o número, n , de interferências existentes, mostradas na Figura 3.11.

¹⁸É importante ressaltar que a Equação 3.121 não é válida para os demais ambientes de rádio móvel.



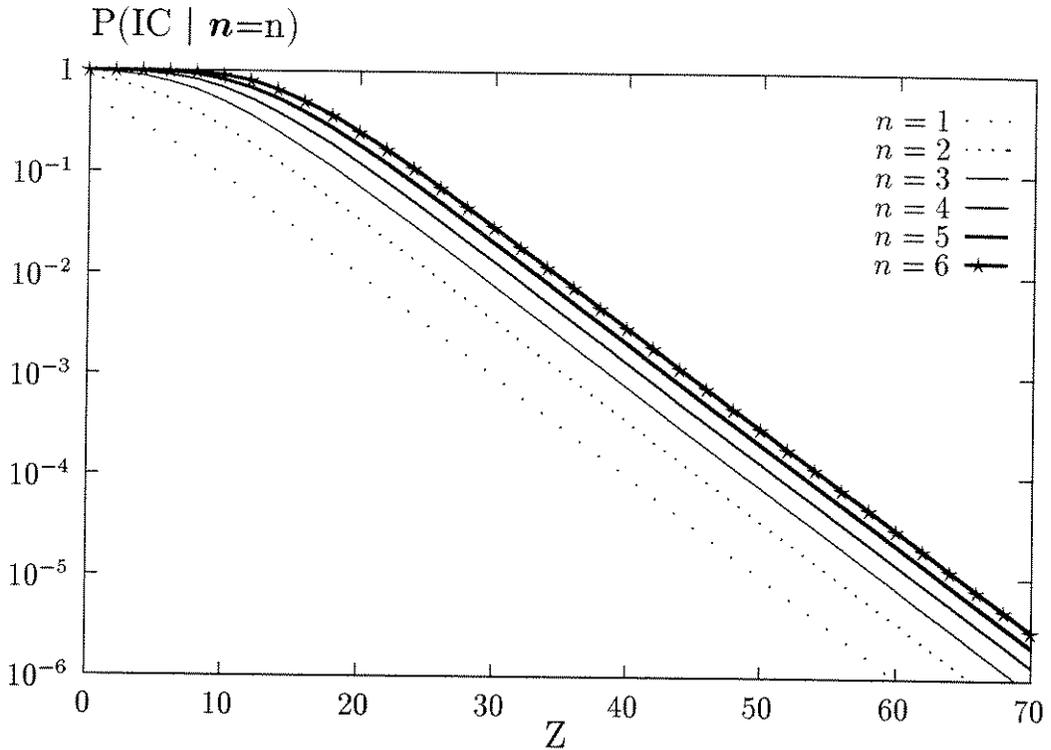


Figura 3.11: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, para os sistemas de adição linear, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetro o número, n , de sinais interferentes - Método E.

3.3.6 Comentários e Conclusões

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi calculada em ambiente Rayleigh/Rayleigh, ou seja, em um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh.

Cinco métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rayleigh/Rayleigh foram mostrados. Estes métodos foram chamados, apenas a título de identificação, de Método A, Método B, Método C, Método D e Método E.

No Método A, no Método B, no Método C e no Método D, consideram-se os sistemas de adição quadrática. No Método E, consideram-se os sistemas de adição linear.

O Método A:

- É um método analítico e complexo, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rayleigh/Rayleigh, a partir
 - da Equação 3.56 - na qual os sinais interferentes são considerados independentemente, o que implica dificuldades devido ao fato de serem necessárias sucessivas integrações.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.52.
 - das funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.53.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Levando-se em conta a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado - dada Equação 3.68 onde ΔP_n é dado pela Equação 3.71; ΔP_1 é dado pela Equação 3.72; a probabilidade de interferência cocanal para sistemas sem interferências, $P(IC | \mathbf{n} = 0)$, é dada pela Equação 3.73, e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis, é dada pela Equação 3.74.¹⁹
 - Levando-se em conta a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada Equação 3.68 onde ΔP_n é dado pela Equação 3.78; a probabilidade de interferência cocanal para sistemas sem interferências, $P(IC | \mathbf{n} = 0)$, é dada pela Equação 3.73, e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis, é dada pela Equação 3.74.¹⁹
 - Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado - dada pela Equação 3.87.
 - Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído,

¹⁹Uma vantagem deste método é apresentar soluções levando-se em conta a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado.

$\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.89.

A partir da segunda solução descrita para este método foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.7 e 3.8. A partir da quarta solução descrita para este método foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.9. Percebe-se, das Figuras 3.7, 3.8 e 3.9, que a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes aumenta com o aumento do número de interferências ativas. Este fato se repetirá para todos os demais métodos e ambientes. Observa-se ainda, da Figura 3.7 e 3.8, que ao especificar uma mínima relação sinal-desejado/ruído necessária à adequada recepção do sinal desejado, obtém-se um valor limite inferior para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes. Este valor limite inferior independe do número de sinais interferentes existentes e aumenta com a diminuição da relação sinal-médio/sinal-mínimo.²⁰ Ainda, da Figura 3.7, observa-se que, para os sistemas móveis nos quais a mínima relação sinal-desejado/ruído necessária à recepção adequada do sinal desejado é considerada, a probabilidade de interferência cocanal condicional a não existência de sinais interferentes é uma constante que coincide com o valor limite inferior.²¹

- Foi publicado previamente [17].

O Método B:

- É um método exato e simples, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rayleigh/Rayleigh, a partir
 - da Equação 3.90.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.52.

²⁰Ou seja, este valor limite inferior aumenta com o aumento da mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e diminui com o aumento da média da relação sinal-desejado/ruído.

²¹Esta curva foi suprimida nas demais figuras nas quais considera-se a mínima relação sinal-desejado/ruído necessária à recepção adequada do sinal desejado.

- das funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.53.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado - dada pela Equação 3.97.
 - Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.99.

Estas soluções do Método B coincidem com as soluções particulares equivalentes do Método A.

- É contribuição deste trabalho de tese.

O Método C:

- É um método exato e simples, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rayleigh/Rayleigh, a partir
 - da Equação 3.100.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.52.
 - de uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.101.²²
- Apresenta a seguinte solução para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:

²²Esta expressão será novamente utilizada em ambiente Rice/Rayleigh, no qual os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh.

- Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.103.

Esta solução do Método C coincide com a solução particular equivalente do Método A.

- Foi publicado previamente [19].

O Método D:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rayleigh/Rayleigh, a partir
 - da Equação 3.104.
 - da função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.52.
 - de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_x(x)$, da relação interferência-total/ruído, x , dada pela Equação 3.105.²²
- Apresenta a seguinte solução para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.111.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.10. Da comparação das Figuras 3.9 e 3.10, observa-se que esta solução do Método D apresenta resultados muito aproximados aos da solução particular equivalente do Método A.²³

- É contribuição deste trabalho de tese.

²³Esta comparação valida o Método D e, portanto, valida a utilização da Equação 3.105.

O Método E:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição linear, em um ambiente Rayleigh/Rayleigh, a partir
 - da Equação 3.112.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória, \mathbf{r} , do sinal desejado, dada pela Equação 3.54.
 - de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{y}}(y)$, da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total, dada pela Equação 3.113.
- Apresenta a seguinte solução para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Desprezando-se a mínima envoltória, r_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as envoltórias, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.122.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.11.

- Foi publicado previamente [16].

3.4 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Nakagami/Nakagami

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é calculada em ambiente Nakagami/Nakagami, ou seja, em um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Nakagami. É conveniente lembrar que a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Nakagami/Nakagami inclui a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes nos ambientes Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh.

Dois métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Nakagami/Nakagami são mostrados.²⁴ Estes métodos são chamados, apenas a título de identificação, de Método F e Método G.

No Método F e no Método G, consideram-se os sistemas de adição quadrática. Para o desenvolvimento destes métodos, é necessário notar que, para o ambiente Nakagami/Nakagami:

- a relação sinal-desejado/ruído, γ , é modelada pela densidade Gama. Portanto, da Equação 2.208, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad \gamma \geq 0 \quad (3.123)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a média da relação sinal/ruído, γ ; $var(\gamma) = [\Gamma(m+2) / [m^2 \Gamma(m)] - 1] (\bar{\gamma})^2$ é a variância da relação sinal-desejado/ruído, γ ; m é o parâmetro de desvanecimento do sinal desejado, e $\Gamma(\alpha)$ é a função Gama, dada pela Equação 2.17.

- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, também são modeladas pela densidade Gama. Portanto, da Equação 2.208, tem-se

$$f_{\gamma_i}(\gamma_i) = \left(\frac{m_i}{\bar{\gamma}_i}\right)^{m_i} \frac{\gamma_i^{m_i-1}}{\Gamma(m_i)} \exp\left(-\frac{m_i \gamma_i}{\bar{\gamma}_i}\right) \quad \gamma_i \geq 0 : i = 1, \dots, n \quad (3.124)$$

onde $\{\bar{\gamma}_i : i = 1, \dots, n\}$ são as médias das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$; $\{var(\gamma_i) = [\Gamma(m_i+2) / [m_i^2 \Gamma(m_i)] - 1] (\bar{\gamma}_i)^2 : i = 1, \dots, n\}$ são as variâncias das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$; $\{m_i : i = 1, \dots, n\}$ são os parâmetros de desvanecimento das interferências, e $\Gamma(\alpha)$ é a função Gama, dada pela Equação 2.17.

Para o caso particular em que $\{m_i = 1 : i = 1, \dots, n\}$, as densidades Gama, dadas pela Equação 3.124, degeneram-se para as densidades dadas pela Equação 3.53, ou seja, tem-se um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Nakagami e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh, ou seja, tem-se o ambiente Nakagami/Rayleigh.

Para o caso particular em que $m = 1$ e $\{m_i = 1 : i = 1, \dots, n\}$, as densidades Gama, dadas pelas Equações 3.123 e 3.124, degeneram-se, respectivamente, para as densidades dadas pelas Equações 3.52 e 3.53, ou seja, tem-se um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh/Rayleigh.

²⁴Estes dois métodos podem, portanto, ser utilizados em ambiente Nakagami/Rayleigh e em ambiente Rayleigh/Rayleigh, sendo necessário apenas utilizar valores adequados para o parâmetro de desvanecimento do sinal desejado e para o parâmetro de desvanecimento das interferências.

3.4.1 Método F

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Nakagami-Rayleigh, é obtido a partir da Equação 3.35, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_{\gamma_0}^{\infty} f_{\gamma}(\gamma) \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}}} f_{\mathbf{x}}(x) dx d\gamma \quad (3.125)$$

onde γ_0 é a mínima relação sinal-desejado/ruído necessária à recepção adequada do sinal desejado; R_{γ} é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_{\gamma}(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.124;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{m_i = \mu : i = 1, \dots, n\}$;

obtem-se uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela densidade Gama [5] [6], ou seja,

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \left(\frac{\mu}{\bar{\gamma}_I}\right)^{\mu n} \frac{x^{\mu n - 1}}{\Gamma(\mu n)} \exp\left(-\frac{\mu x}{\bar{\gamma}_I}\right) \quad x \geq 0 \quad (3.126)$$

onde $\Gamma(\alpha)$ é a função Gama, dada pela Equação 2.17.

Assim, das Equações 3.123, 3.125 e 3.126, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_{\gamma_0}^{\infty} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \times \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}}} \left(\frac{\mu}{\bar{\gamma}_I}\right)^{\mu n} \frac{x^{\mu n - 1}}{\Gamma(\mu n)} \exp\left(-\frac{\mu x}{\bar{\gamma}_I}\right) dx d\gamma \quad (3.127)$$

Para o caso particular em que o parâmetro μ é inteiro, obtém-se [6]

$$\int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}}} \left(\frac{\mu}{\bar{\gamma}_I}\right)^{\mu n} \frac{x^{\mu n - 1}}{\Gamma(\mu n)} \exp\left(-\frac{\mu x}{\bar{\gamma}_I}\right) dx = 1 - \exp\left(-\frac{\mu \gamma}{\bar{\gamma}_I R_{\gamma}}\right) \sum_{k=0}^{\mu n - 1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\mu \gamma}{\bar{\gamma}_I R_{\gamma}}\right)^k \quad (3.128)$$

Das Equações 3.127 e 3.128, tem-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{1}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m \int_{\gamma_0}^{\infty} \gamma^{m-1} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) d\gamma + \frac{1}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m \times \int_{\gamma_0}^{\infty} \gamma^{m-1} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \exp\left(-\frac{\mu}{\bar{\gamma}_I} \frac{\gamma}{R_\gamma}\right) \sum_{k=0}^{\mu n-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\mu}{\bar{\gamma}_I} \frac{\gamma}{R_\gamma}\right)^k d\gamma \quad (3.129)$$

Para o caso particular em que o parâmetro m é inteiro, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \exp\left(-\frac{m\gamma_0}{\bar{\gamma}}\right) \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{m\gamma_0}{\bar{\gamma}}\right)^k + \frac{m^m}{\Gamma(m)} \exp\left[-\frac{\gamma_0 \left(\mu \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I} + m\right)}{\bar{\gamma}}\right] \times \sum_{k=0}^{\mu n-1} \frac{\left(\mu \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I}\right)^k}{k!} \sum_{j=0}^{k+m-1} \frac{\gamma_0^j (k+m-1)!}{j! (\bar{\gamma})^j \left(\mu \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I} + m\right)^{k+m-j}} \quad (3.130)$$

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \exp\left(-\frac{m}{10 \frac{R_0}{10}}\right) \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{m}{10 \frac{R_0}{10}}\right)^k + \frac{m^m}{\Gamma(m)} \exp\left[-\frac{\left(\mu 10 \frac{Z}{10} + m\right)}{10 \frac{R_0}{10}}\right] \times \sum_{k=0}^{\mu n-1} \frac{\left(\mu 10 \frac{Z}{10}\right)^k}{k!} \sum_{j=0}^{k+m-1} \frac{(k+m-1)!}{j! 10 \frac{j R_0}{10} \left(\mu 10 \frac{Z}{10} + m\right)^{k+m-j}} \quad (3.131)$$

onde R_0 é a relação sinal-médio/sinal-mínimo, dada em decibéis, dado pela Equação 3.74, e Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que $\mu = 1$, ou seja, para o ambiente Nakagami/Rayleigh, obtém-se, da Equação 3.131, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \exp\left(-\frac{m}{10 \frac{R_0}{10}}\right) \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{m}{10 \frac{R_0}{10}}\right)^k + \frac{m^m}{\Gamma(m)} \exp\left[-\frac{\left(10 \frac{Z}{10} + m\right)}{10 \frac{R_0}{10}}\right] \times \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\left(10 \frac{Z}{10}\right)^k}{k!} \sum_{j=0}^{k+m-1} \frac{(k+m-1)!}{j! 10 \frac{j R_0}{10} \left(10 \frac{Z}{10} + m\right)^{k+m-j}} \quad (3.132)$$

Para o caso particular em que $m = 1$ e $\mu = 1$, ou seja, para o ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtém-se, da Equação 3.131, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{10 \frac{R_0}{10}}\right) + \exp\left[-\frac{\left(10 \frac{Z}{10} + 1\right)}{10 \frac{R_0}{10}}\right] \times \sum_{k=0}^{n-1} \left(10 \frac{Z}{10}\right)^k \sum_{j=0}^k \frac{1}{j! 10 \frac{j R_0}{10} \left(10 \frac{Z}{10} + 1\right)^{k+1-j}} \quad (3.133)$$

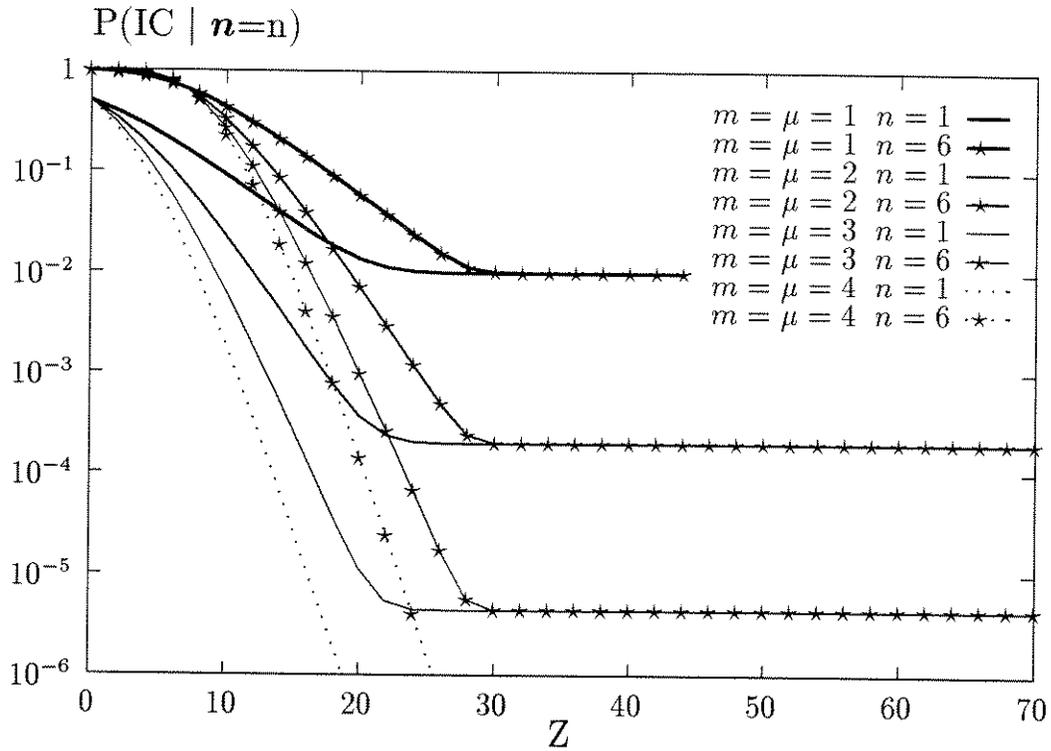


Figura 3.12: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Nakagami, para $R_0 = 20$ dB, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes - Método F.

Assim, da Equação 3.131, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.12 e 3.13.

As curvas mostradas na Figura 3.12 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes. O grau de desvanecimento do sinal desejado e o grau de desvanecimento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $m = \mu$. Considera-se, ainda, $R_0 = 20$ dB.

As curvas mostradas na Figura 3.13 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis. Considera-se,

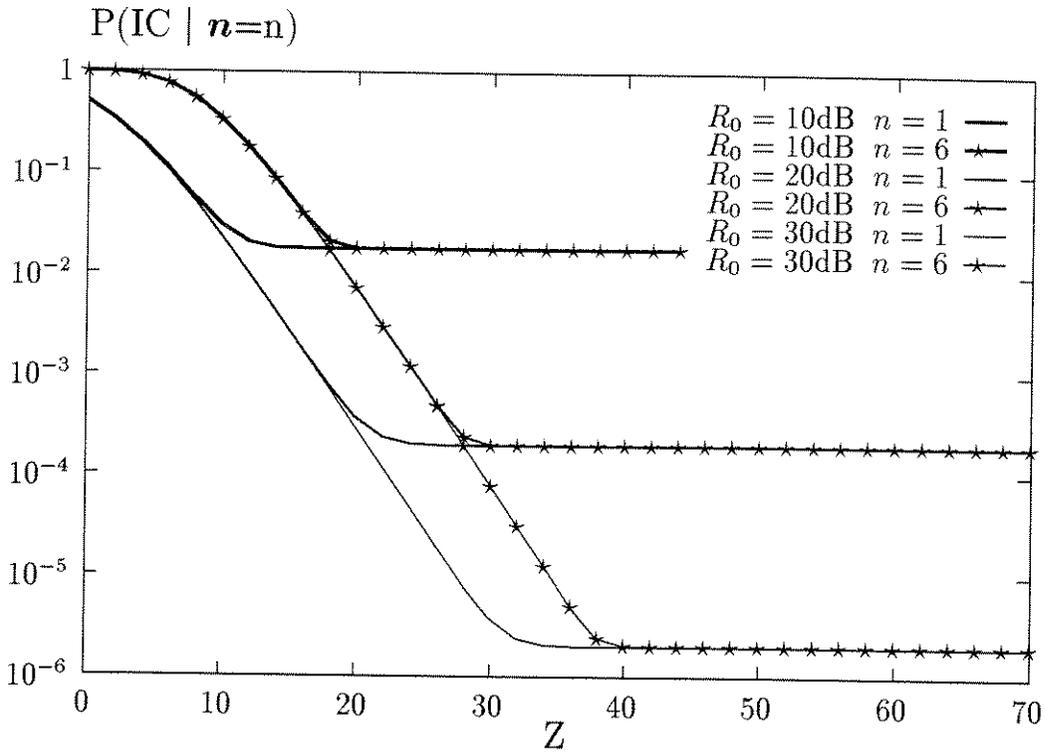


Figura 3.13: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Nakagami, para $m = \mu = 2$, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis - Método F.

ainda, $m = \mu = 2$.

Da Equação 3.132, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.14 e 3.15.

As curvas mostradas na Figura 3.14 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado. Considera-se, ainda, $R_0 = 20$ dB.

As curvas mostradas na Figura 3.15 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis. Considera-se, ainda, $m = 2$.

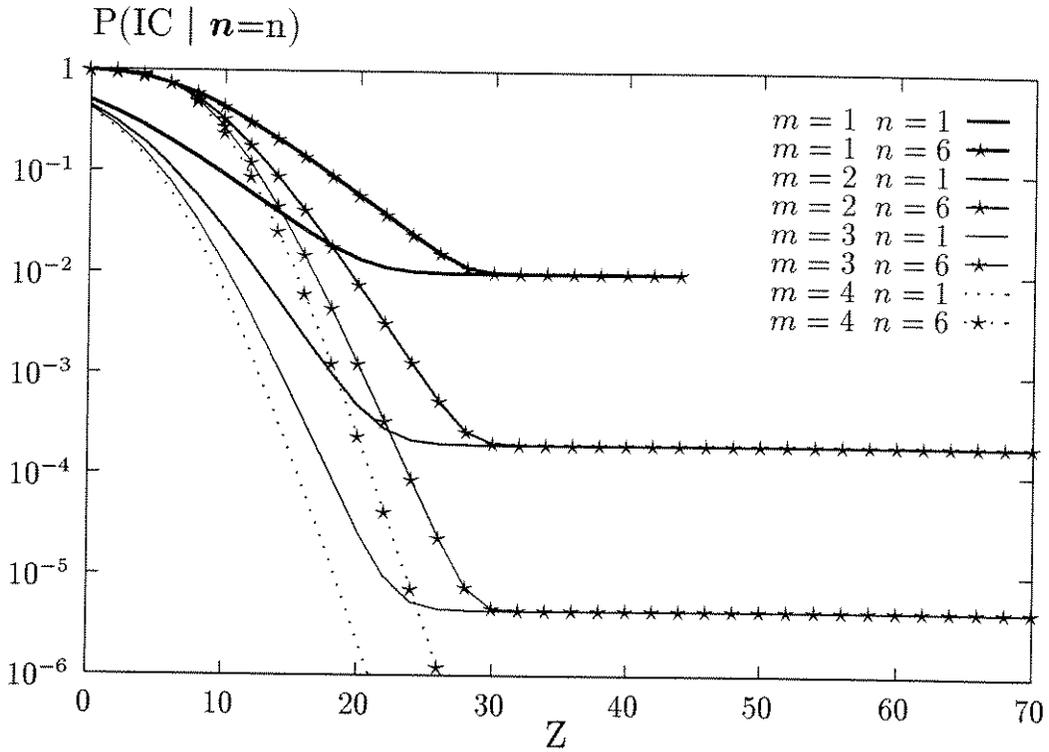


Figura 3.14: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Rayleigh, para $R_0 = 20$ dB, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado - Método F.

Da Equação 3.133, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis tendo como parâmetro o número, n , de interferências existentes e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis, mostradas na Figura 3.16.

Nos sistemas móveis nos quais a interferência é a maior preocupação, ignora-se a mínima relação sinal-desejado/ruído necessária à recepção adequada do sinal desejado, ou seja, tem-se $\gamma_0 = 0$. Para os sistemas móveis nos quais a interferência é a maior preocupação, considerando um ambiente sem interferências, obtém-se, da Equação 3.130,

$$P(IC | n = n) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} \sum_{k=0}^{\mu n - 1} \frac{(k + m - 1)! \left(\mu \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I} \right)^k}{k! \left(\mu \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \bar{\gamma}_I} + m \right)^{k+m}} \quad (3.134)$$

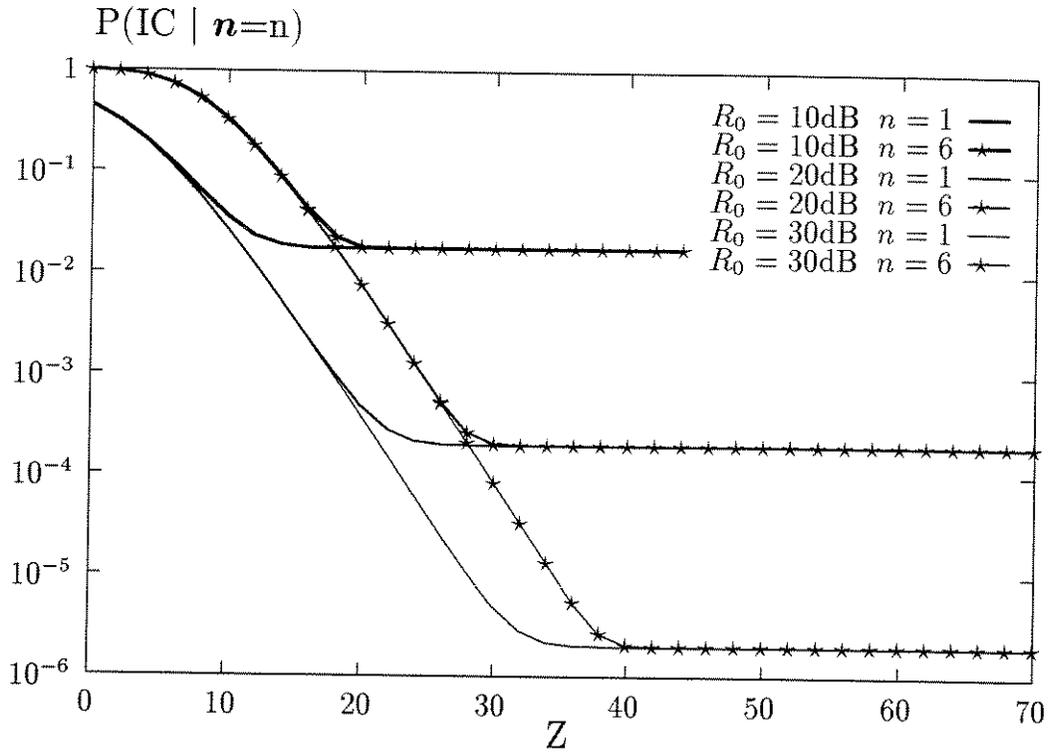


Figura 3.15: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Rayleigh, para $m = 2$, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis - Método F.

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} \sum_{k=0}^{\mu n - 1} \frac{(k + m - 1)! \left(\mu 10^{\frac{Z}{10}}\right)^k}{k! \left(\mu 10^{\frac{Z}{10}} + m\right)^{k+m}} \quad (3.135)$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que $\mu = 1$, ou seja, para o ambiente Nakagami/Rayleigh, obtém-se, da Equação 3.135, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(k + m - 1)! \left(10^{\frac{Z}{10}}\right)^k}{k! \left(10^{\frac{Z}{10}} + m\right)^{k+m}} \quad (3.136)$$

Para o caso particular em que $m = 1$ e $\mu = 1$, ou seja, para o ambiente Rayleigh/Ray-

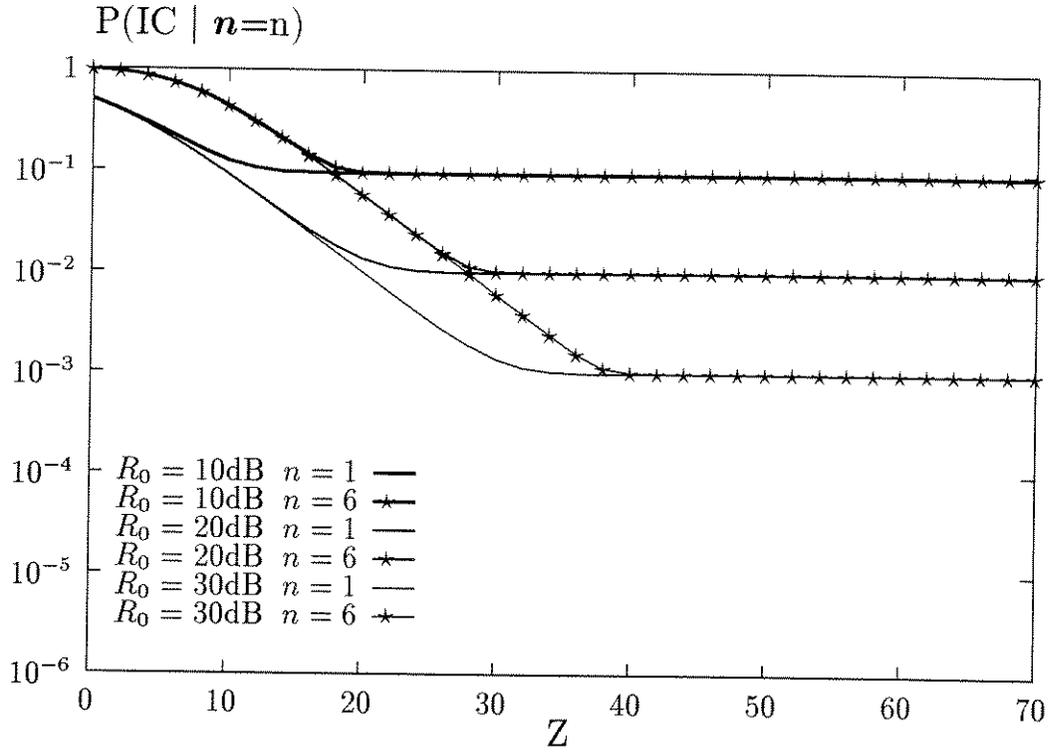


Figura 3.16: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis - Método F.

leigh, obtém-se, da Equação 3.132, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes dada por

$$P(IC | n = n) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\left(10^{\frac{Z}{10}}\right)^k}{\left(10^{\frac{Z}{10}} + 1\right)^{k+1}} \quad (3.137)$$

Após algumas manipulações matemáticas, obtém-se

$$P(IC | n = n) = 1 - \left[\frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1 + 10^{\frac{Z}{10}}} \right]^n \quad (3.138)$$

A solução do Método F, dada pela Equação 3.138, coincide com a solução particular equivalente do Método A, dada pela Equação 3.89.

Assim, da Equação 3.135, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, em

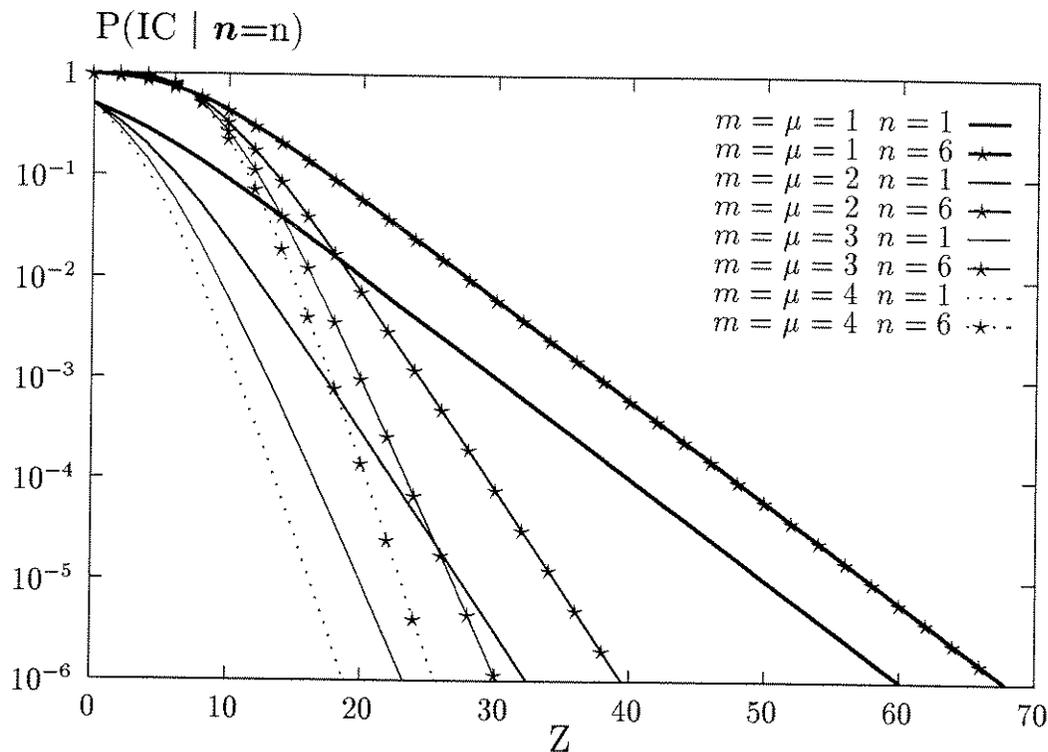


Figura 3.17: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes; o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes - Método F.

ambiente Nakagami/Nakagami, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes, mostradas na Figura 3.17. O grau de desvanecimento do sinal desejado e o grau de desvanecimento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $m = \mu$.

Da Equação 3.136, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetro o número, n , de interferências existentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, mostradas na Figura 3.18.

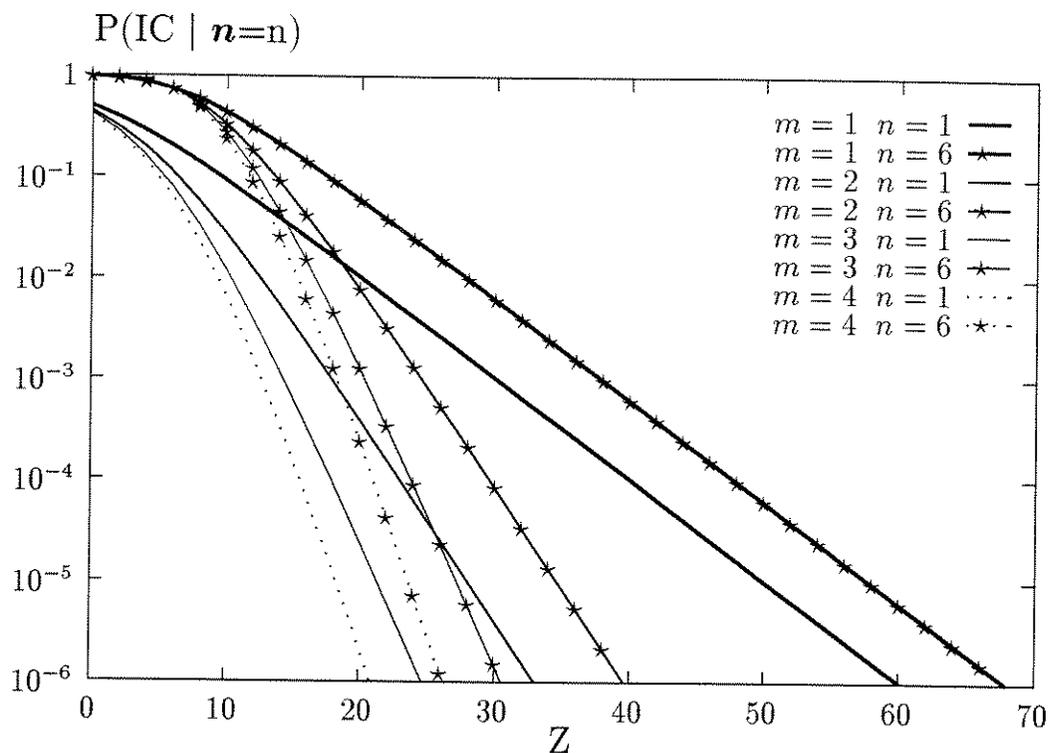


Figura 3.18: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado - Método F.

3.4.2 Método G

Um outro método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Nakagami/Nakagami, é obtido a partir da Equação 3.44, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_\gamma(\gamma) \int_{\frac{\gamma}{R_\gamma}}^\infty f_{\mathbf{x}}(x) dx d\gamma \quad (3.139)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.124;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{m_i = \mu : i = 1, \dots, n\}$;

obtem-se uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.126.

Assim, das Equações 3.123, 3.126 e 3.139, após algumas manipulações, obtém-se [5]

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = I_t(m, \mu n)|_t = \frac{m}{m + \frac{\mu \bar{\gamma}}{R_{\gamma} \bar{\gamma}_I}} \quad (3.140)$$

onde $I_t(\alpha, \beta)$ é a função Beta incompleta expressa por [5]

$$I_t(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \int_0^t u^{\alpha-1} (1-u)^{\beta-1} du \quad (3.141)$$

Ou seja, das Equações 3.140 e 3.141, tem-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{\Gamma(m + \mu n)}{\Gamma(m) \Gamma(\mu n)} \int_0^{\frac{m}{m + \mu 10^{\frac{Z}{10}}}} u^{m-1} (1-u)^{\mu n-1} du \quad (3.142)$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que $\mu = 1$, ou seja, para o ambiente Nakagami/Rayleigh, obtém-se, da Equação 3.142, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{\Gamma(m + n)}{\Gamma(m) \Gamma(n)} \int_0^{\frac{m}{m + 10^{\frac{Z}{10}}}} u^{m-1} (1-u)^{n-1} du \quad (3.143)$$

Para o caso particular em que $m = 1$ e $\mu = 1$, ou seja, para o ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtém-se, da Equação 3.142, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \left[\frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1 + 10^{\frac{Z}{10}}} \right]^n \quad (3.144)$$

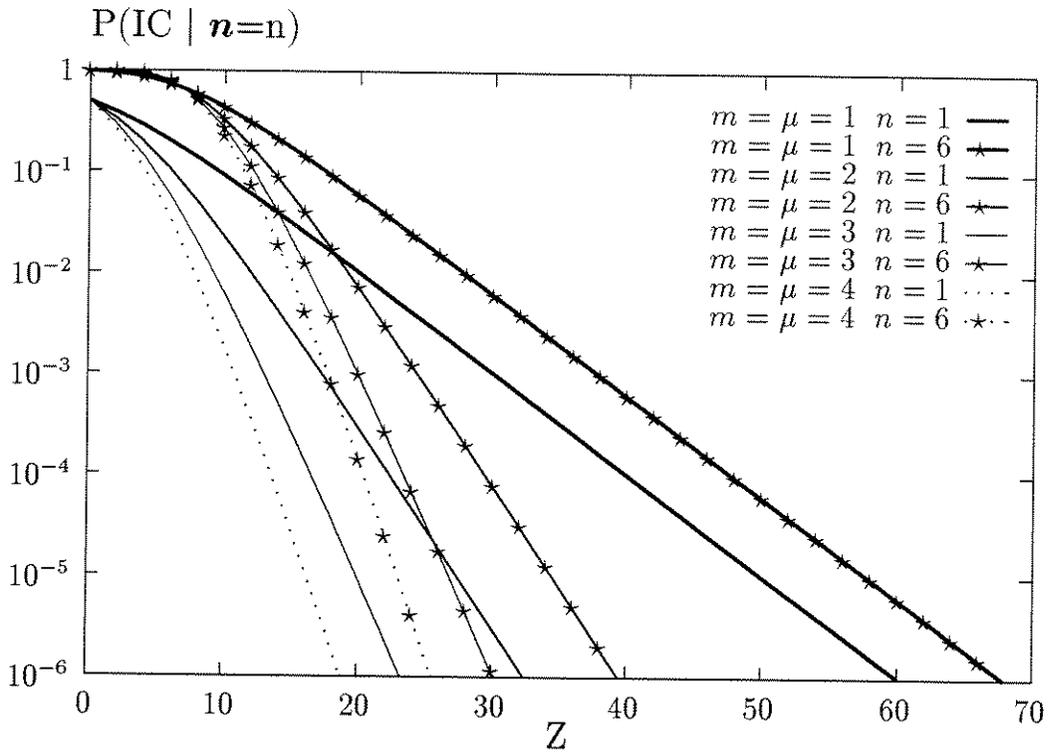


Figura 3.19: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes; o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes - Método G.

A solução do Método G, dada pela Equação 3.144, coincide com a solução particular equivalente do Método A, dada pela Equação 3.89.

Assim, da Equação 3.142, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes, mostradas na Figura 3.19. O grau de desvanecimento do sinal desejado e o grau de desvanecimento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $m = \mu$.

Da Equação 3.143, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente

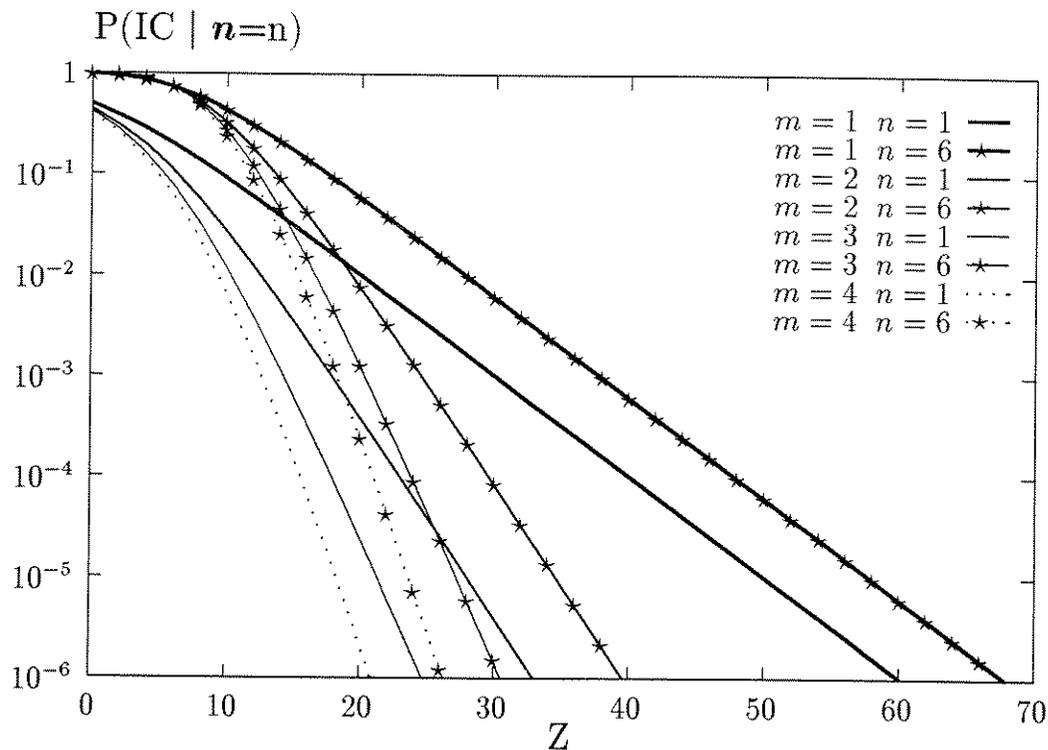


Figura 3.20: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado - Método G.

Nakagami/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, mostradas na Figura 3.20.

3.4.3 Comentários e Conclusões

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi calculada em ambiente Nakagami/Nakagami, ou seja, em um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Nakagami.

Dois métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Nakagami/Nakagami foram mostrados. Os dois métodos que foram mostrados podem também ser utilizados em ambiente Naka-

gami/Rayleigh e em ambiente Rayleigh/Rayleigh. Estes métodos foram chamados, apenas a título de identificação, de Método F e Método G.

No Método F e no Método G, consideram-se os sistemas de adição quadrática.

O Método F:

- É um método exato, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Nakagami/Nakagami, a partir
 - da Equação 3.125.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.123.
 - de uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.126.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Em ambiente Nakagami/Nakagami:²⁵
 - * Levando-se em conta a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada Equação 3.131 onde a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis, é dada pela Equação 3.74.²⁶
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.135.

A partir da primeira solução descrita para o ambiente Nakagami/Nakagami foram obtidas as curvas mostradas nas Figuras 3.12 e 3.13. A partir da segunda solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.17.

²⁵Estas soluções são restritas ao caso particular em que o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes sejam inteiros. Esta é uma desvantagem deste método.

²⁶Uma vantagem deste método é apresentar soluções levando-se em conta a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado.

- Em ambiente Nakagami/Rayleigh:²⁷
 - * Levando-se em conta a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada Equação 3.132 onde a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis, é dada pela Equação 3.74.²⁶
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.136.

A partir da primeira solução descrita para o ambiente Nakagami/Rayleigh foram obtidas as curvas mostradas nas Figuras 3.14 e 3.15. A partir da segunda solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.18.

- Em ambiente Rayleigh/Rayleigh:
 - * Levando-se em conta a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada Equação 3.133 onde a relação sinal-médio/sinal-mínimo, R_0 , dada em decibéis, é dada pela Equação 3.74.²⁶
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.137. Esta solução do Método F coincide com a solução particular equivalente do Método A.

A partir da primeira solução descrita para o ambiente Rayleigh/Rayleigh particular foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.16. Da comparação das Figuras 3.8 e 3.16, observa-se que a primeira solução descrita para este caso particular apresenta resultados muito aproximados aos da solução particular equivalente do Método A.

Da Figura 3.18, observa-se que, para o ambiente Nakagami/Rayleigh, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes sofre forte

²⁷Estas soluções são restritas ao caso particular em que o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado seja inteiro. Esta é uma desvantagem deste método.

influência do parâmetro de desvanecimento do sinal desejado, ou seja, diminui consideravelmente com o aumento do grau de desvanecimento do sinal desejado. Da comparação das Figuras 3.12 e 3.14; das Figuras 3.13, e 3.15 e das Figuras 3.17 e 3.18, pode-se perceber que, para o ambiente Nakagami/Nakagami, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quase não depende do grau de desvanecimento dos sinais interferentes.²⁸ Portanto, conclui-se que, para o ambiente Nakagami/Nakagami, o grau de desvanecimento do sinal desejado é o parâmetro que mais fortemente exerce influência sobre a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes. Assim, é interessante ressaltar que, em relação a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes ativos, o ambiente Rayleigh/Rayleigh é muito mais crítico que o ambiente Nakagami/Rayleigh, e que o ambiente Nakagami/Rayleigh é quase tão crítico quanto o ambiente Nakagami/Nakagami.²⁹

Das conclusões acerca do Método A, observou-se que ao especificar uma mínima relação sinal-desejado/ruído necessária à adequada recepção do sinal desejado, obtém-se um valor limite inferior para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes que independe do número de sinais interferentes existentes e aumenta com a diminuição da relação sinal-médio/sinal-mínimo. Ainda, das Figuras 3.12 e 3.14, percebe-se que, para os ambientes Nakagami/Nakagami e Nakagami/Rayleigh, o valor de limite inferior é fortemente influenciado pelo grau de desvanecimento do sinal desejado, ou seja, diminui consideravelmente com o aumento do grau de desvanecimento do sinal desejado. Da comparação das Figuras 3.12 e 3.14, e das Figuras 3.13 e 3.15, observa-se que, para o ambiente Nakagami/Nakagami, o valor limite inferior independe do parâmetro de desvanecimento do sinais interferentes. Da comparação das Figuras 3.13 e 3.16 e das Figuras 3.15 e 3.16, observa-se que, para os ambientes Nakagami/Nakagami e Nakagami/Rayleigh, a forte influência exercida pelo grau de desvanecimento do sinal desejado sobre o valor limite inferior é ainda maior com o aumento a relação sinal-médio/sinal-mínimo. Das Figuras 3.12 e 3.14 pode-se perceber também que existe um valor de limiar da margem a partir do qual obtém-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes dada pelo valor limite inferior, e que este valor

²⁸Quanto maior número de sinais interferentes ativos, menor é a influência do grau de desvanecimento dos sinais interferentes.

²⁹Esta comparação entre os ambientes Nakagami/Rayleigh e Nakagami/Nakagami considera graus iguais de desvanecimento do sinal desejado.

de limiar independe do parâmetro de desvanecimento do sinal desejado e do parâmetro de desvanecimento dos sinais interferentes, e aumenta com o aumento do número de sinais interferentes existentes. Das Figuras 3.13, 3.15 e 3.16, pode-se perceber que este valor de limiar aumenta consideravelmente com o aumento da relação sinal-médio/sinal-mínimo.

- Foi publicado previamente [5].

O Método G:

- É um método exato, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Nakagami/Nakagami, a partir
 - da Equação 3.139.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.123.
 - de uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.126.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Em ambiente Nakagami/Nakagami:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.142.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.19.
 - Em ambiente Nakagami/Rayleigh:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.143.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.20.

– Em ambiente Rayleigh/Rayleigh:

- * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.144.

Esta solução do Método G coincide com a solução particular equivalente do Método A.

Os resultados mostrados nas Figuras 3.19 e 3.20 são semelhantes aos resultados particulares equivalentes do Método F, mostrados nas Figuras 3.17 e 3.18.

- Foi publicado previamente [6].

3.5 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rice/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é calculada em ambiente Rice/Rayleigh, ou seja, em um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rice e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh. É conveniente relembrar que a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Rayleigh inclui a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rayleigh/Rayleigh.

Três métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Rayleigh são mostrados.³⁰ Estes métodos são chamados, apenas a título de identificação, de Método H, Método I e Método J.

No Método H, no Método I e no Método J, consideram-se os sistemas de adição quadrática. Para o desenvolvimento destes métodos, é necessário notar que, para o ambiente Rice/Rayleigh:

³⁰Estes dois métodos podem, portanto, ser utilizados em ambiente Rayleigh/Rayleigh, sendo necessário apenas utilizar valor adequado para o fator de Rice do sinal desejado.

- a relação sinal-desejado/ruído, γ , é modelada pela densidade Chi-quadrada não Central. Portanto, da Equação 2.210, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}}\right] \exp(-k) I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\bar{\gamma}}}\right] \quad \gamma \geq 0 \quad (3.145)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a média da relação sinal/ruído, γ ; $var(\gamma) = [(1+2k)/(1+k)^2 - 1](\bar{\gamma})^2$ é a variância da relação sinal-desejado/ruído, γ ; k é o fator de Rice do sinal desejado e $I_0(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero, que é dada pela Equação 2.23.

- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são modeladas pelas densidades dadas pela Equação 3.53.

Para o caso particular em que $k = 0$, a densidade Chi-quadrada não Central, dada pela Equação 3.145, degenera-se para a densidade dada pela Equação 3.52, ou seja, tem-se um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh/Rayleigh.

3.5.1 Método H

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice/Rayleigh, é obtido a partir da Equação 3.39, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^{\infty} f_{\gamma}(\gamma) \int_0^{\frac{\gamma}{R_{\gamma}}} f_{\mathbf{x}}(x) dx d\gamma \quad (3.146)$$

onde R_{γ} é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_{\gamma}(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.53;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$;

obtem-se uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela densidade Gama, dada pela Equação 3.101.

Assim, das Equações 3.145, 3.101 e 3.146, obtém-se após algumas manipulações matemáticas [21],

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma} \bar{\gamma}_I (1+k)}} \exp \left[-k \frac{\frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma} \bar{\gamma}_I (1+k)}}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma} \bar{\gamma}_I (1+k)}} \right] \times \sum_{l=0}^{n-1} \left[\frac{\frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma} \bar{\gamma}_I (1+k)}}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma} \bar{\gamma}_I (1+k)}} \right]^l L_l \left[\frac{-k}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma} \bar{\gamma}_I (1+k)}} \right] \quad (3.147)$$

onde $L_t(\alpha)$ é o Polinômio de Laguerre, que é dado por [25]

$$L_t(\alpha) = \sum_{m=0}^t (-1)^m \binom{t}{t-m} \frac{\alpha^m}{m!} \quad (3.148)$$

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{1 + \frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1+10^{\frac{K}{10}}}} \exp \left[-10^{\frac{K}{10}} \frac{\frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1+10^{\frac{K}{10}}}}{1 + \frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1+10^{\frac{K}{10}}}} \right] \times \sum_{l=0}^{n-1} \left[\frac{\frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1+10^{\frac{K}{10}}}}{1 + \frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1+10^{\frac{K}{10}}}} \right]^l L_l \left[\frac{-10^{\frac{K}{10}}}{1 + \frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1+10^{\frac{K}{10}}}} \right] \quad (3.149)$$

onde K é o fator de Rice, dado em decibéis, do sinal desejado, e Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que se tem obstrução da linha de visada, isto é, para $K = -\infty$ dB, ou seja, para o ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtém-se, da Equação 3.149, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \sum_{l=0}^{n-1} \frac{\left(10^{\frac{Z}{10}}\right)^l}{\left(10^{\frac{Z}{10}} + 1\right)^{l+1}} \quad (3.150)$$

Após algumas manipulações matemáticas, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \left[\frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1 + 10^{\frac{Z}{10}}} \right]^n \quad (3.151)$$

A solução do Método H, dada pela Equação 3.151, coincide com a solução particular equivalente do Método A, dada pela Equação 3.89.

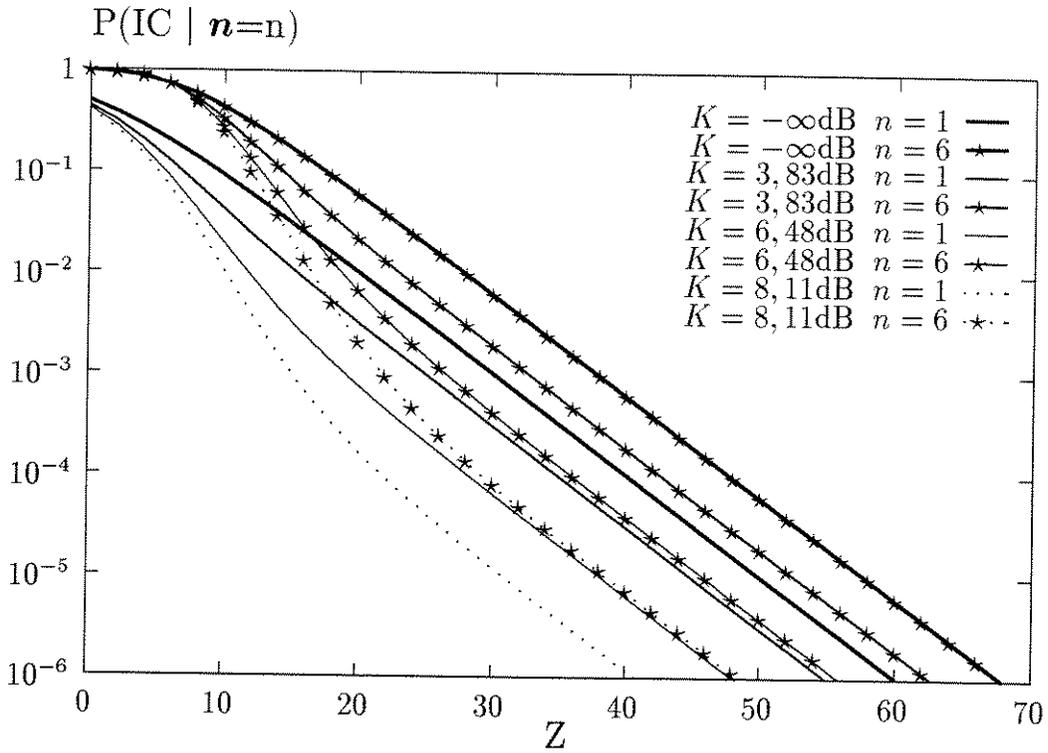


Figura 3.21: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis do sinal desejado - Método H.

Da Equação 3.149, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, em ambiente Rice/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado, mostradas na Figura 3.21.

3.5.2 Método I

Um outro método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um

ambiente Rice/Rayleigh, é obtido a partir da Equação 3.39, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^\infty f_\gamma(\gamma) \int_0^{\frac{x}{R_\gamma}} f_{\mathbf{x}}(x) dx d\gamma \quad (3.152)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.53;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$;

obtem-se uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela densidade Gama, dada pela Equação 3.101.

Assim, das Equações 3.145, 3.101 e 3.152, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^\infty \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}}\right] \exp(-k) I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\bar{\gamma}}}\right] \times \int_0^{\frac{x}{R_\gamma}} \frac{1}{(\bar{\gamma}_I)^n} \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} \exp\left(-\frac{x}{\bar{\gamma}_I}\right) dx d\gamma \quad (3.153)$$

Obtém-se ainda,

$$\int_0^{\frac{x}{R_\gamma}} \frac{1}{(\bar{\gamma}_I)^n} \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} \exp\left(-\frac{x}{\bar{\gamma}_I}\right) dx = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{R_\gamma \bar{\gamma}_I}\right) \sum_{m=0}^{n-1} \frac{1}{m!} \left(\frac{\gamma}{R_\gamma \bar{\gamma}_I}\right)^m \quad (3.154)$$

Das Equações 3.153 e 3.154, tem-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}}\right] \exp(-k) I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\bar{\gamma}}}\right] \times \exp\left(-\frac{\gamma}{R_\gamma \bar{\gamma}_I}\right) \sum_{m=0}^{n-1} \frac{1}{m!} \left(\frac{\gamma}{R_\gamma \bar{\gamma}_I}\right)^m d\gamma \quad (3.155)$$

Sabe-se que $I_0(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero, dada pela Equação 2.23, que pode alternativamente ser expressa por [9]

$$I_0(\alpha) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{(l!)^2} \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{2l} \quad (3.156)$$

Das Equações 3.155 e 3.156, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \exp(-k) \sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{(l!)^2} \left[\frac{k(1+k)}{\bar{\gamma}} \right]^l \sum_{m=0}^{n-1} \frac{1}{m!} \left(\frac{1}{R_{\gamma} \bar{\gamma}_I} \right)^m \times \int_0^{\infty} \gamma^{l+m} \exp \left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}} \left[1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma} \bar{\gamma}_I (1+k)} \right] \right] d\gamma \quad (3.157)$$

Após algumas manipulações matemáticas, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \exp(-k) \sum_{l=0}^{\infty} \frac{k^l}{(l!)^2} \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(l+m)! \left[\frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma} \bar{\gamma}_I (1+k)} \right]^m}{m! \left[1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_{\gamma} \bar{\gamma}_I (1+k)} \right]^{l+m+1}} \quad (3.158)$$

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \exp \left(-10 \frac{K}{10} \right) \sum_{l=0}^{\infty} \frac{10 \frac{lK}{10}}{(l!)^2} \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(l+m)! \left(\frac{10 \frac{Z}{10}}{1+10 \frac{K}{10}} \right)^m}{l! \left(1 + \frac{10 \frac{Z}{10}}{1+10 \frac{K}{10}} \right)^{l+m+1}} \quad (3.159)$$

onde K é o fator de Rice, dado em decibéis, do sinal desejado, e Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que se tem obstrução da linha de visada, isto é, para $K = -\infty$ dB, ou seja, para o ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtém-se, da Equação 3.159, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \sum_{m=0}^{n-1} \frac{\left(10 \frac{Z}{10} \right)^m}{\left(1 + 10 \frac{Z}{10} \right)^{m+1}} \quad (3.160)$$

Após algumas manipulações matemáticas, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \left[\frac{10 \frac{Z}{10}}{1 + 10 \frac{Z}{10}} \right]^n \quad (3.161)$$

A solução do Método I, dada pela Equação 3.161, coincide com a solução particular equivalente do Método A, dada pela Equação 3.89.

Da Equação 3.159, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Rice/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado, mostradas na Figura 3.22.

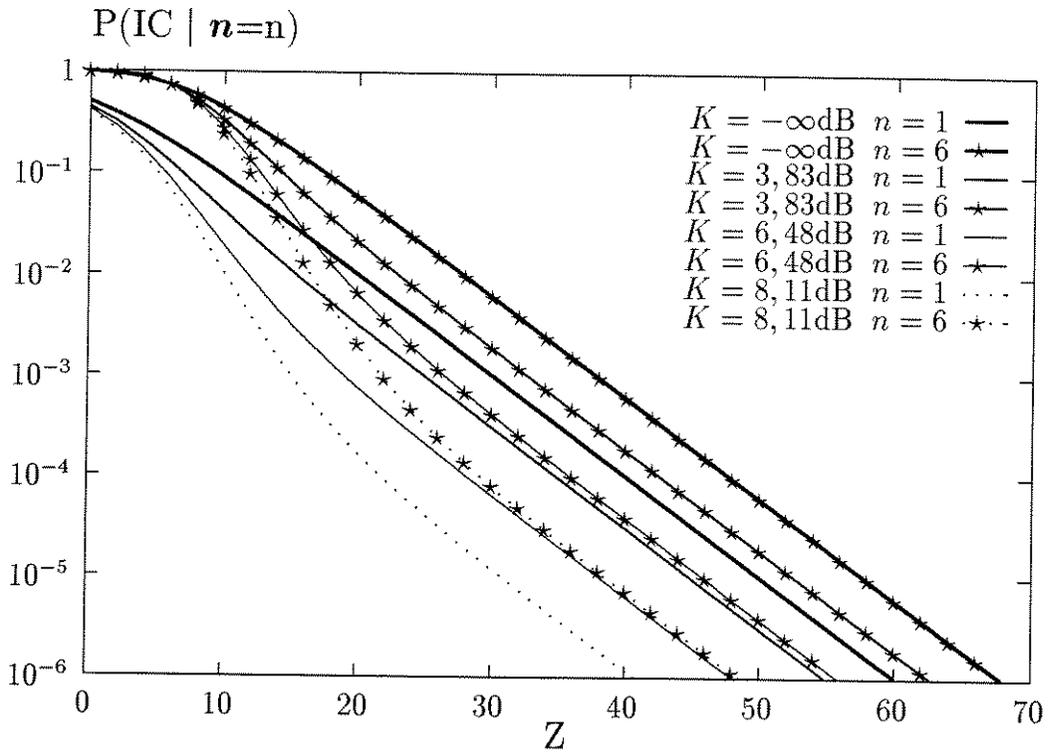


Figura 3.22: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis do sinal desejado - Método I.

3.5.3 Método J

Um outro método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice/Rayleigh, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.162)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferên-

cia/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.53;

- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$;

obtem-se uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela densidade Normal, dada pela Equação 3.105, aqui repetida por conveniência,

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad x \geq 0 \quad (3.163)$$

onde

$$\bar{x} = n \bar{\gamma}_I \quad (3.164)$$

e

$$\sigma_x^2 = n (\bar{\gamma}_I)^2 \quad (3.165)$$

são, respectivamente, a média e a variância da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Das Equações 3.145, 3.162 e 3.163, tem-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right] \int_0^{R_\gamma x} \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}}\right] \\ &\times \exp(-k) I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\bar{\gamma}}}\right] d\gamma dx \end{aligned} \quad (3.166)$$

Sabe-se que $I_0(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero, que pode alternativamente ser expressa pela Equação 3.156.

Da Equação 3.156, obtém-se

$$\begin{aligned} \int_0^{R_\gamma x} \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}}\right] \exp(-k) I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\bar{\gamma}}}\right] d\gamma = \\ \exp(-k) \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \sum_{l=0}^\infty \frac{1}{(l!)^2} \left[\frac{k(1+k)}{\bar{\gamma}}\right]^l \int_0^{R_\gamma x} \gamma^l \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}}\right] d\gamma \end{aligned} \quad (3.167)$$

Assim, obtém-se

$$\begin{aligned} \int_0^{R_\gamma x} \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}}\right] \exp(-k) I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\bar{\gamma}}}\right] d\gamma = \\ 1 - \exp(-k) \exp\left[-\frac{R_\gamma x(1+k)}{\bar{\gamma}}\right] \sum_{l=0}^\infty \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma x(1+k)}{\bar{\gamma}}\right]^m \end{aligned} \quad (3.168)$$

Das Equações 3.166 e 3.168, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{\sqrt{2} \bar{x}}{2 \sigma_x} \right) - \exp(-k) \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} \exp \left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2 \sigma_x^2} \right] \times \exp \left[-\frac{R_\gamma x (1+k)}{\bar{\gamma}} \right] \sum_{l=0}^\infty \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma x (1+k)}{\bar{\gamma}} \right]^m dx \quad (3.169)$$

Fazendo $t = (x - \bar{x})/\sigma_x$, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{\sqrt{2} \bar{x}}{2 \sigma_x} \right) - \frac{\exp(-k)}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\bar{x}}{\sigma_x}}^\infty \exp \left[\frac{R_\gamma (1+k)}{\bar{\gamma}} (\sigma_x t - \bar{x}) \right] \times \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) \sum_{l=0}^\infty \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma (1+k)}{\bar{\gamma}} (\sigma_x t - \bar{x}) \right]^m dt \quad (3.170)$$

onde $\operatorname{erfc}(\alpha)$ é a função erro complementar dada pela Equação 3.110.

Das Equações 3.164, 3.165 e 3.170, obtém-se ainda

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{\sqrt{2n}}{2} \right) - \frac{\exp(-k)}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\sqrt{n}}^\infty \exp \left[\frac{R_\gamma \bar{\gamma}_I (1+k)}{\bar{\gamma}} (\sqrt{n} t - n) \right] \times \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) \sum_{l=0}^\infty \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma \bar{\gamma}_I (1+k)}{\bar{\gamma}} (\sqrt{n} t - n) \right]^m dt \quad (3.171)$$

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{\sqrt{2n}}{2} \right) - \frac{\exp(-10\frac{K}{10})}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\sqrt{n}}^\infty \exp \left[\frac{1 + 10\frac{K}{10}}{10\frac{Z}{10}} (\sqrt{n} t - n) \right] \times \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) \sum_{l=0}^\infty \frac{10\frac{lK}{10}}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{1 + 10\frac{K}{10}}{10\frac{Z}{10}} (\sqrt{n} t - n) \right]^m dt \quad (3.172)$$

onde K é o fator de Rice, dado em decibéis, do sinal desejado, e Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que se tem obstrução da linha de visada, isto é, para $K = -\infty$ dB, ou seja, para o ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtém-se, da Equação 3.172, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{\sqrt{2n}}{2} \right) - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\sqrt{n}}^\infty \exp \left[\frac{(\sqrt{n} t - n)}{10\frac{Z}{10}} \right] \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt \quad (3.173)$$

Assim, da Equação 3.172, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Rice/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o

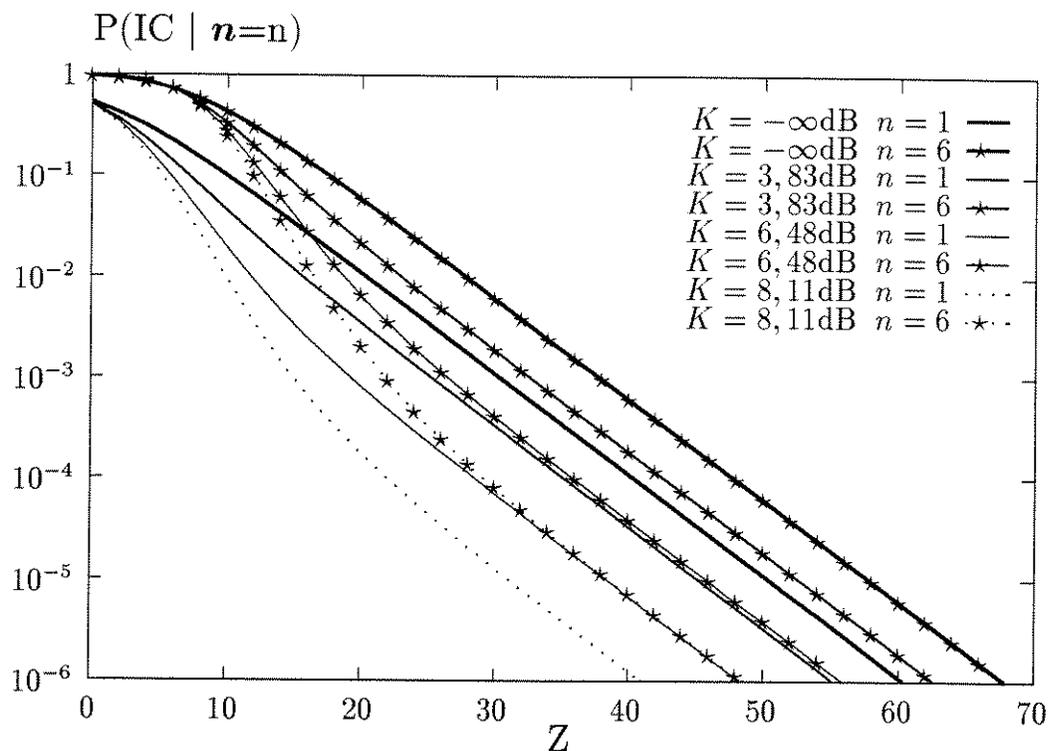


Figura 3.23: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado - Método J.

número, n , de interferências existentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado, mostradas na Figura 3.23.

Da Equação 3.173, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetro o número, n , de interferências existentes, mostradas na Figura 3.24.

3.5.4 Comentários e Conclusões

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi calculada em ambiente Rice/Rayleigh, ou seja, em um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rice e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh.

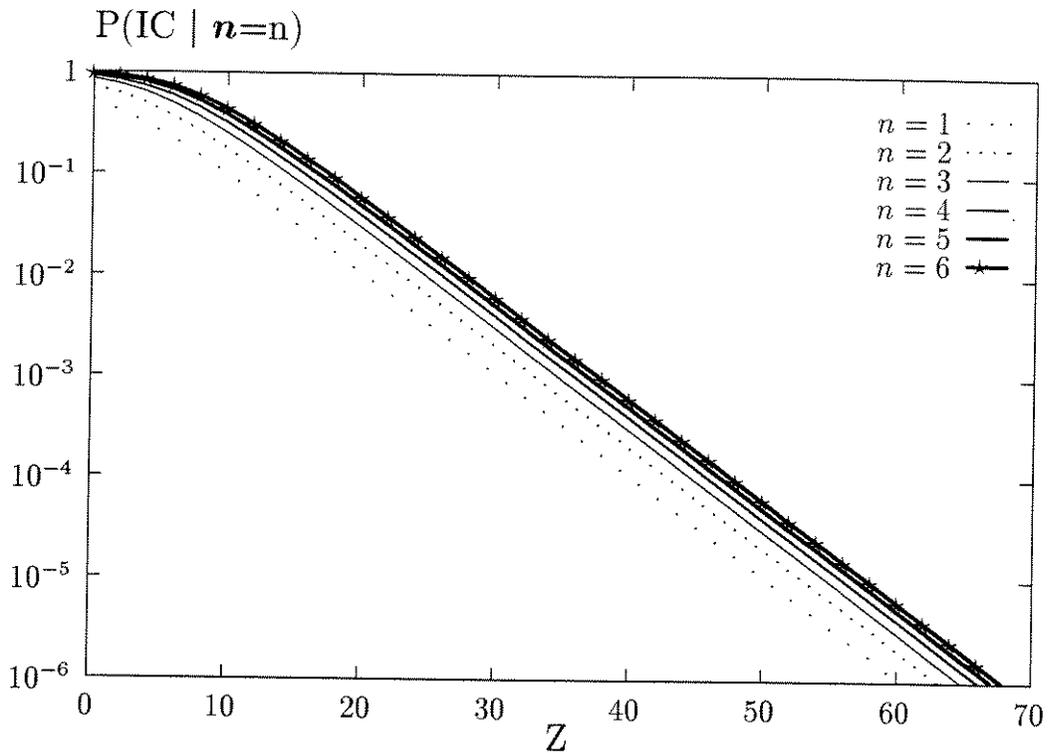


Figura 3.24: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetro o número, n , de sinais interferentes - Método J.

Três métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Rayleigh foram mostrados. Os três métodos que foram mostrados podem também ser utilizados em ambiente Rayleigh/Rayleigh. Estes métodos foram chamados, apenas a título de identificação, de Método H, Método I e Método J.

No Método H, no Método I e no Método J, consideram-se os sistemas de adição quadrática.

O Método H:

- É um método exato, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática,

em um ambiente Rice/Rayleigh, a partir

- da Equação 3.146.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.145.
 - de uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.101.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Em ambiente Rice/Rayleigh:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.149.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.21

- Em ambiente Rayleigh/Rayleigh:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.151.

Esta solução do Método H coincide com a solução particular equivalente do Método A.

Da Figura 3.21, observa-se que, para o ambiente Rice/Rayleigh, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes sofre forte influência do fator de Rice do sinal desejado, ou seja, diminui consideravelmente com o aumento do fator de Rice do sinal desejado. Assim, é interessante ressaltar que, em relação a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes ativos, o ambiente Rayleigh/Rayleigh é muito mais crítico que o ambiente Rice/Rayleigh.

- Foi publicado previamente [21].

O Método I:

- É um método exato, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice/Rayleigh, a partir
 - da Equação 3.152.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.145.
 - de uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.101.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Em ambiente Rice/Rayleigh:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.159.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.22. Os resultados mostrados na Figura 3.22 são semelhantes aos resultados do Método H, mostrados na Figura 3.21.
 - Em ambiente Rayleigh/Rayleigh:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.161.

Esta solução do Método I coincide com a solução particular equivalente do Método A.

- É contribuição deste trabalho de tese.

O Método J:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice/Rayleigh, a partir
 - da Equação 3.162.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.145.
 - de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.163.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Em ambiente Rice/Rayleigh:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.172.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.23. Os resultados mostrados na Figura 3.23 são muito aproximados aos resultados exatos do Método H, mostrados na Figura 3.21.
 - Em ambiente Rayleigh/Rayleigh:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.173.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.24. Os resultados mostrados na Figura 3.24 são muito semelhantes aos resultados exatos da solução particular equivalente do Método A.
- É contribuição deste trabalho de tese.

3.6 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rice/Rice

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é calculada em ambiente Rice/Rice, ou seja, em um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rice. É conveniente relembrar que a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Rice inclui a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes nos ambientes Rice/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh.

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Rice é mostrado.³¹ Este método é chamado, apenas a título de identificação, de Método K.

No Método K, consideram-se os sistemas de adição quadrática. Para o desenvolvimento deste método, é necessário notar que, para o ambiente Rice/Rice:

- a relação sinal-desejado/ruído, γ , é modelada pela densidade dada pela Equação 3.145.
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são modeladas pela densidade Chi-quadrada não Central. Portanto, da Equação 2.210, tem-se

$$f_{\gamma_i}(\gamma_i) = \frac{(1+k_i)}{\bar{\gamma}_i} \exp\left[-\frac{\gamma_i(1+k_i)}{\bar{\gamma}_i}\right] \exp(-k_i) \times I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma_i k_i(1+k_i)}{\bar{\gamma}_i}}\right] \quad \gamma_i \geq 0 : i = 1, \dots, n \quad (3.174)$$

onde $\{\bar{\gamma}_i : i = 1, \dots, n\}$ e $\{var(\gamma_i) = (\bar{\gamma}_i)^2 : i = 1, \dots, n\}$ são, respectivamente, as médias e as variâncias das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$; $\{k_i : i = 1, \dots, n\}$ são os fatores de Rice dos sinais interferentes, e $I_0(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero, que é dada pela Equação 2.23.

Para o caso particular em que $\{k_i = 0 : i = 1, \dots, n\}$, as densidades Chi-quadrada não Centrais, dada pela Equação 3.174, degeneram-se para a densidades dadas pela Equação 3.53, ou seja, tem-se um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rice e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh, ou seja, tem-se o ambiente Rice/Rayleigh.

³¹Este método pode, portanto, ser utilizado em ambiente Rice/Rayleigh e em ambiente Rayleigh/Rayleigh, sendo necessário apenas utilizar valores adequados para o fator de Rice do sinal desejado e para o fator de Rice das interferências.

Para o caso particular em que $k = 0$ e $\{k_i = 0 : i = 1, \dots, n\}$, as densidades Chi-quadrada não Centrais, dadas pelas Equações 3.145 e 3.174, degeneram-se, respectivamente, para as densidades dadas pelas Equações 3.52 e 3.53, ou seja, tem-se um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rayleigh, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh/Rayleigh.

3.6.1 Método K

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice/Rice, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.175)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.174;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{k_i = k_I : i = 1, \dots, n\}$;

obtem-se uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada por [11]

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{(1+k_I)}{\bar{\gamma}_I} \left[\frac{x(1+k_I)}{n k_I \bar{\gamma}_I} \right]^{\frac{n-1}{2}} \exp \left[-\frac{x(1+k_I)}{\bar{\gamma}_I} \right] \times \exp(-n k_I) I_{n-1} \left[2 \sqrt{\frac{x n k_I (1+k_I)}{\bar{\gamma}_I}} \right] \quad x \geq 0 \quad (3.176)$$

onde $I_t(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem t , que é dada por [12]

$$I_t(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp[\alpha \cos(\theta)] \cos(t\theta) d\theta \quad (3.177)$$

Das Equações 3.145, 3.175 e 3.176, tem-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= \int_0^\infty \frac{(1+k_I)}{\bar{\gamma}_I} \left[\frac{x(1+k_I)}{n k_I \bar{\gamma}_I} \right]^{\frac{n-1}{2}} \exp \left[-\frac{x(1+k_I)}{\bar{\gamma}_I} \right] \exp(-n k_I) \\
 &\times I_{n-1} \left[2\sqrt{\frac{x n k_I (1+k_I)}{\bar{\gamma}_I}} \right] \int_0^{R_\gamma x} \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \exp \left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}} \right] \\
 &\times \exp(-k) I_0 \left[2\sqrt{\frac{\gamma k (1+k)}{\bar{\gamma}}} \right] d\gamma dx \quad (3.178)
 \end{aligned}$$

Das Equações 3.168 e 3.178, obtém-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \exp[-(k + n k_I)] \int_0^\infty \frac{(1+k_I)}{\bar{\gamma}_I} \left[\frac{x(1+k_I)}{n k_I \bar{\gamma}_I} \right]^{\frac{n-1}{2}} \exp \left[-\frac{x(1+k_I)}{\bar{\gamma}_I} \right] \\
 &\times I_{n-1} \left[2\sqrt{\frac{x n k_I (1+k_I)}{\bar{\gamma}_I}} \right] \exp \left[-\frac{R_\gamma x (1+k)}{\bar{\gamma}} \right] \\
 &\times \sum_{l=0}^\infty \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma x (1+k)}{\bar{\gamma}} \right]^m dx \quad (3.179)
 \end{aligned}$$

Fazendo $v = x(1+k_I)/\bar{\gamma}_I$, obtém-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \exp[-(k + n k_I)] \int_0^\infty \left(\frac{v}{n k_I} \right)^{\frac{n-1}{2}} \exp(-v) I_{n-1} \left[2\sqrt{n k_I v} \right] \\
 &\times \exp \left[-\frac{R_\gamma \bar{\gamma}_I (1+k)}{\bar{\gamma} (1+k_I)} v \right] \sum_{l=0}^\infty \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma \bar{\gamma}_I (1+k)}{\bar{\gamma} (1+k_I)} v \right]^m dv \quad (3.180)
 \end{aligned}$$

Sabe-se que $I_t(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem t , dada pela Equação 3.177, que pode alternativamente ser expressa por [9]

$$I_t(\alpha) = \sum_{j=0}^\infty \frac{1}{j!(t+j)!} \left(\frac{\alpha}{2} \right)^{t+2j} \quad (3.181)$$

Das Equações 3.180 e 3.181, tem-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \exp[-(k + n k_I)] \int_0^\infty \exp(-v) \left[\sum_{j=0}^\infty \frac{(n k_I)^j v^{n+j-1}}{j!(n+j-1)!} \right] \\
 &\times \exp \left[-\frac{R_\gamma \bar{\gamma}_I (1+k)}{\bar{\gamma} (1+k_I)} v \right] \sum_{l=0}^\infty \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma \bar{\gamma}_I (1+k)}{\bar{\gamma} (1+k_I)} v \right]^m dv \quad (3.182)
 \end{aligned}$$

Assim, obtém-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \exp \left[-\left(10^{\frac{K}{10}} + n 10^{\frac{K_I}{10}} \right) \right] \int_0^\infty \exp(-v) \left[\sum_{j=0}^\infty \frac{n^j 10^{\frac{j K_I}{10}} v^{n+j-1}}{j!(n+j-1)!} \right] \\
 &\times \exp \left[-\frac{\left(1+10^{\frac{K}{10}} \right) v}{10^{\frac{Z}{10}} \left(1+10^{\frac{K_I}{10}} \right)} \right] \sum_{l=0}^\infty \frac{10^{\frac{l K}{10}}}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{\left(1+10^{\frac{K}{10}} \right) v}{10^{\frac{Z}{10}} \left(1+10^{\frac{K_I}{10}} \right)} \right]^m dv \quad (3.183)
 \end{aligned}$$

onde K é o fator de Rice, dado em decibéis, do sinal desejado; K_I é o fator de Rice, dado em decibéis, dos sinais interferentes, e Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que se tem obstrução da linha de visada dos sinais interferentes, isto é, para $K_I = -\infty$ dB, ou seja, para o ambiente Rice/Rayleigh, obtém-se, da Equação 3.183, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \exp\left(-10^{\frac{K}{10}}\right) \int_0^\infty \exp(-v) \frac{v^{n-1}}{(n-1)!} \times \exp\left[-\frac{\left(1+10^{\frac{K}{10}}\right)v}{10^{\frac{Z}{10}}}\right] \sum_{l=0}^\infty \frac{10^{\frac{lK}{10}}}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{\left(1+10^{\frac{K}{10}}\right)v}{10^{\frac{Z}{10}}}\right]^m dv \quad (3.184)$$

Para o caso particular em que se tem obstrução das linhas de visada do sinal desejado e dos sinais interferentes, isto é, para $K = -\infty$ dB e $K_I = -\infty$ dB, ou seja, para o ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtém-se, da Equação 3.183, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^\infty \exp(-v) \frac{v^{n-1}}{(n-1)!} \exp\left[-\frac{v}{10^{\frac{Z}{10}}}\right] dv \quad (3.185)$$

Após algumas manipulações matemáticas, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \left[\frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1 + 10^{\frac{Z}{10}}}\right]^n \quad (3.186)$$

A solução do Método K, dada pela Equação 3.186, coincide com a solução particular equivalente do Método A, dada pela Equação 3.89.

Da Equação 3.183, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Rice/Rice, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado, e o fator de Rice, K_I , dado em decibéis, dos sinais interferentes, mostradas na Figura 3.25. O fator de Rice do sinal desejado e o fator de Rice dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $K = K_I$.

Da Equação 3.184, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Rice/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado, mostradas na Figura 3.26.

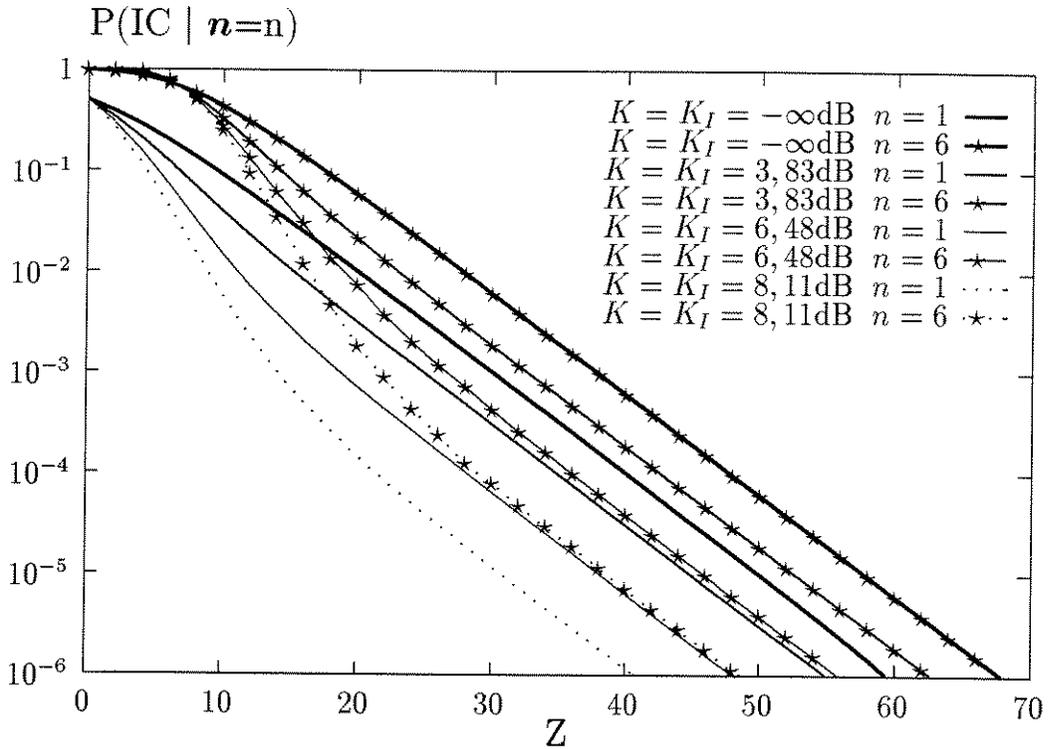


Figura 3.25: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice/Rice, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes; o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado, e o fator de Rice, K_I , dado em decibéis, dos sinais interferentes - Método K.

3.6.2 Comentários e Conclusões

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi calculada em ambiente Rice/Rice, ou seja, em um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Rice.

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Rice foi mostrado. O método que foi mostrado pode também ser utilizado em ambiente Rice/Rayleigh e em ambiente Rayleigh/Rayleigh. Este método foi chamado, apenas a título de identificação, de Método K.

No Método K, consideram-se os sistemas de adição quadrática.

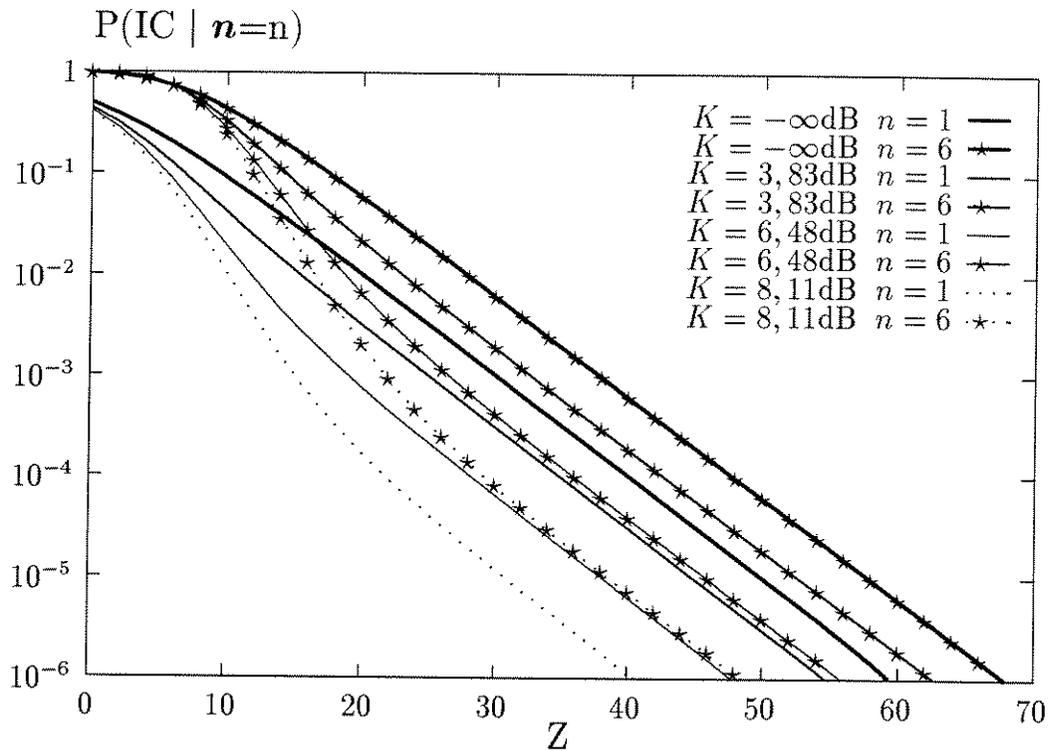


Figura 3.26: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis do sinal desejado - Método K.

O Método K:

- É um método exato, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice/Rice, a partir
 - da Equação 3.175.
 - da função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.145.
 - de uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_x(x)$, da relação interferência-total/ruído, x , dada pela Equação 3.176.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional

ao número de sinais interferentes existentes:

– Em ambiente Rice/Rice:

- * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.183.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.25.

– Em ambiente Rice/Rayleigh:

- * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.184.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.26.

– Em ambiente Rayleigh/Rayleigh:

- * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.186.

Esta solução do Método K coincide com a solução particular equivalente do Método A.

Da Figura 3.26, observa-se que, para o ambiente Rice/Rayleigh, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes sofre forte influência do fator de Rice do sinal desejado, ou seja, diminui consideravelmente com o aumento do fator de Rice do sinal desejado. Da comparação das Figuras 3.25 e 3.26, pode-se perceber que, para o ambiente Rice/Rice, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quase não depende do fator de Rice dos sinais interferentes.³² Portanto, conclui-se que, para o ambiente Rice/Rice, o fator de Rice do sinal desejado é o parâmetro que mais fortemente exerce influência sobre a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes.

³²Quanto maior número de sinais interferentes ativos, menor é a influência do fator de Rice dos sinais interferentes.

Assim, é interessante ressaltar que, em relação a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes ativos, o ambiente Rayleigh/Rayleigh é muito mais crítico que o ambiente Rice/Rayleigh, e que o ambiente Rice/Rayleigh é quase tão crítico quanto o ambiente Rice/Rice.³³

- É contribuição deste trabalho de tese.

3.7 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Log-normal/Log-normal

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é calculada em ambiente Log-normal/Log-normal, ou seja, em um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Log-normal.

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Log-normal/Log-normal é mostrado. Este método é chamado, apenas a título de identificação, de Método L.

No Método L, consideram-se os sistemas de adição quadrática. Para o desenvolvimento deste método, é necessário notar que, para o ambiente Log-normal/Log-normal:

- a relação sinal-desejado/ruído, γ , é modelada pela densidade Log-normal. Portanto, da Equação 2.223, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma\gamma} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}}\right]\right]^2\right] \quad \gamma \geq 0 \quad (3.187)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a média da relação sinal/ruído, γ ; $var(\gamma) = [\exp(4\sigma^2) - 1](\bar{\gamma})^2$ é a variância da relação sinal-desejado/ruído, γ , e σ é o desvio padrão de sombreamento, dado em neper, do sinal desejado.

- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são modeladas pela densidade Log-normal. Portanto, da Equação 2.223, tem-se

$$f_{\gamma_i}(\gamma_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_i\gamma_i} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_i^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma_i \exp(2\sigma_i^2)}{\bar{\gamma}_i}\right]\right]^2\right] \quad \gamma_i \geq 0 : i = 1, \dots, n \quad (3.188)$$

³³Esta comparação entre os ambientes Rice/Rayleigh e Rice/Rice considera iguais fatores de Rice do sinal desejado.

onde $\{\bar{\gamma}_i : i = 1, \dots, n\}$ e $\{var(\gamma_i) = [exp(4\sigma_i^2) - 1](\bar{\gamma}_i)^2 : i = 1, \dots, n\}$ são, respectivamente, as médias e as variâncias das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, e $\{\sigma_i : i = 1, \dots, n\}$ são os desvios padrão de sombreamento, dados em neper, das interferências.

3.7.1 Método L

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Log-normal/Log-normal, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.189)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.188;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$;

obtem-se uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada por [13]

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \quad x \geq 0 \quad (3.190)$$

onde \bar{x} é a média da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , e

$$var(\mathbf{x}) = [exp(4\sigma_x^2) - 1] (\bar{x})^2 \quad (3.191)$$

é a variância da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Existem dois métodos clássicos para obtenção da média e da variância da relação interferência-total/ruído: o Método de Fenton e o Método de Schwartz & Yeh. O Método de Fenton é um método simples e aproximado, enquanto que o Método de Schwartz & Yeh é um método complexo (por ser recursivo) e exato. O Método de Fenton é mais adequado a este trabalho por possibilitar a obtenção da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em função da margem, Z , dada em decibéis.

Fazendo uso do Método de Fenton [16, 22], obtém-se

$$\bar{x} = n \bar{\gamma}_I \tag{3.192}$$

e

$$var(\mathbf{x}) = n \left[\exp(4\sigma_I^2) - 1 \right] (\bar{\gamma}_I)^2 \tag{3.193}$$

Das Equações 3.191, 3.192 e 3.193, obtém-se

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.194}$$

Das Equações 3.187, 3.189 e 3.190, tem-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \times \int_0^{R_\gamma x} \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \gamma} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{\gamma \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}} \right] \right]^2 \right] d\gamma dx \tag{3.195}$$

A Equação 3.195 simplifica-se para [19]

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln \left[\frac{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2)}{R_\gamma \bar{x}} \exp(2\sigma^2) \right]}{(8\sigma_\gamma^2 + 8\sigma_x^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \tag{3.196}$$

onde $\operatorname{erfc}(\alpha)$ é a função erro complementar dada pela Equação 3.110.

Das Equações 3.192, 3.194 e 3.196, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\frac{Z}{10 \log 10} - \ln n - 2\sigma^2 + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2) \right]}{\left[8\sigma^2 + 2 \ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2) \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \tag{3.197}$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Assim, da Equação 3.197, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em

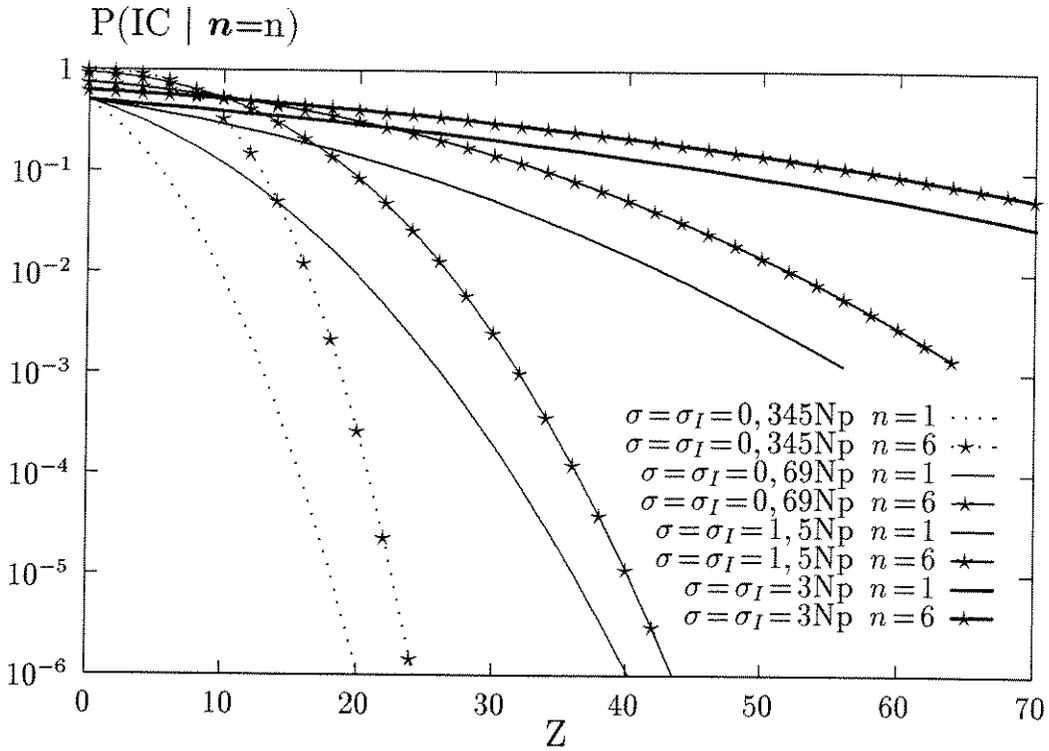


Figura 3.27: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Log-normal/Log-normal, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método L.

ambiente Log-normal/Log-normal, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.27-3.29.

As curvas mostradas na Figura 3.27 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. O desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e o desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $\sigma = \sigma_I$.

As curvas mostradas na Figura 3.28 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $\sigma = 1,5 N_p$.

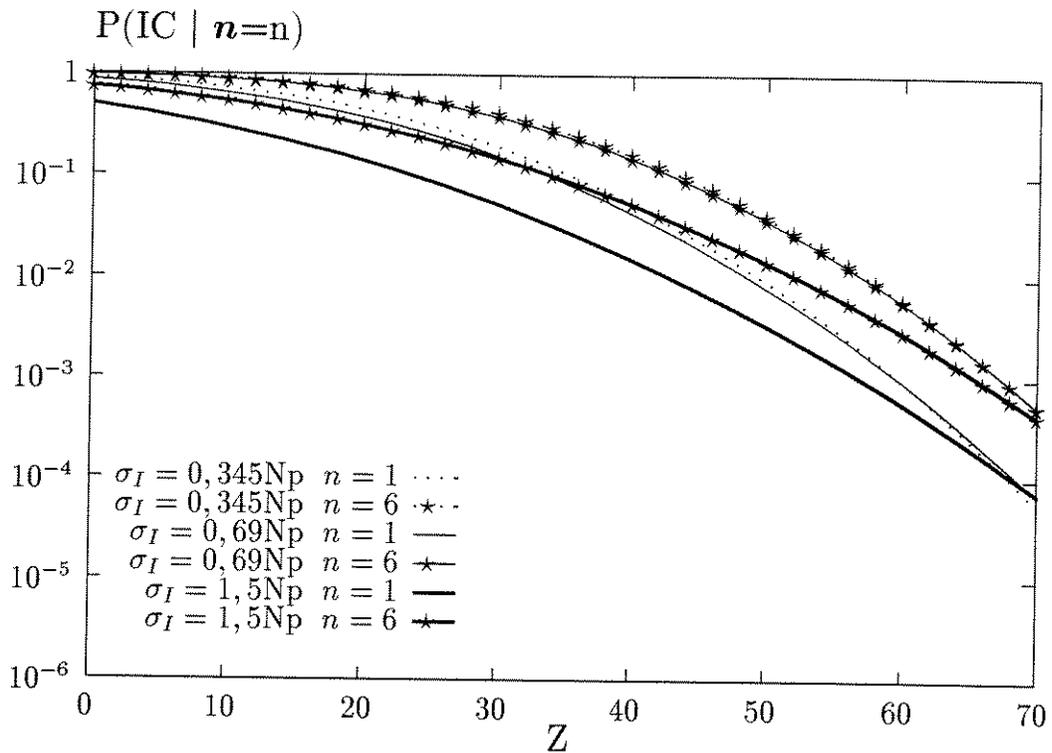


Figura 3.28: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Log-normal/Log-normal, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma = 1,5 Np$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método L.

As curvas mostradas na Figura 3.29 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\sigma_I = 1,5 Np$.

3.7.2 Comentários e Conclusões

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi calculada em ambiente Log-normal/Log-normal, ou seja, em um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Log-normal.

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Log-normal/Log-normal foi mostrado. Este método foi chamado, apenas a título de identificação, de Método L.

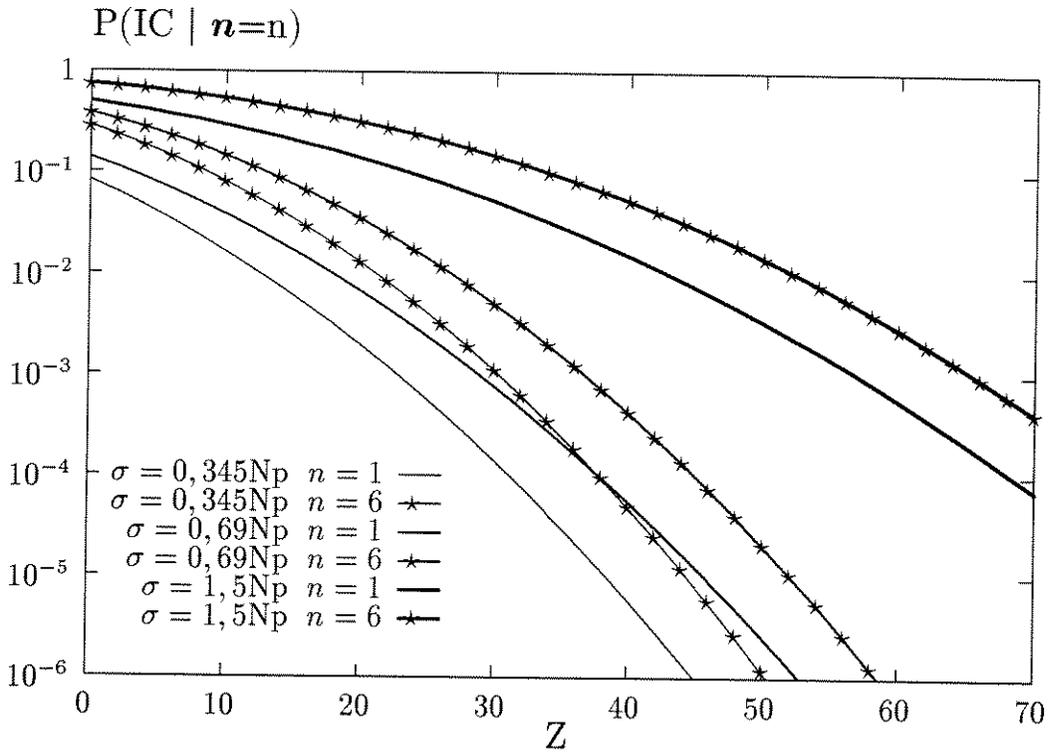


Figura 3.29: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Log-normal/Log-normal, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma_I = 1,5 \text{ Np}$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado - Método L.

No Método L, consideram-se os sistemas de adição quadrática.

O Método L:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Log-normal/Log-normal, a partir
- da Equação 3.189;
- da função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.187;

- de uma expressão exata para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.190, e
- de expressões aproximadas para a média e a variância da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , obtidas a partir do uso do Método de Fenton, que é um método aproximado, dadas, respectivamente, pelas Equações 3.192 e 3.193.
- Apresenta a seguinte solução para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.197.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas nas Figuras 3.27-3.29.³⁴ Da Figura 3.29, observa-se que, para o ambiente Log-normal/Log-normal, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes sofre forte influência do desvio padrão de sombreamento do sinal desejado, aumentando consideravelmente com o aumento desvio padrão de sombreamento do sinal desejado. Da Figura 3.28, pode-se perceber que, para o ambiente Log-normal/Log-normal, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes sofre influência do desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes, diminuindo com o aumento desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes. Conclui-se ainda que, para o ambiente Log-normal/Log-normal, o desvio padrão de sombreamento do sinal desejado é o parâmetro que mais fortemente exerce influência sobre a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes. Esta observação pode ser confirmada verificando-se, na Figura 3.27, que com igual aumento dos desvios padrão de sombreamento do sinal desejado e dos sinais interferentes, predomina a influência do desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e, portanto, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes aumenta.

- Foi publicado previamente [19].

³⁴Considerando apenas os resultados obtidos até aqui não é possível validar o Método L por ser um método aproximado, devido ao uso do Método de Fenton, e por ser o único método desenvolvido para o ambiente Log-normal/Log-normal. Entretanto, como será visto adiante na Seção 3.8.3, o uso do Método de Fenton será validado e, portanto, o Método L será validado também.

3.8 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rayleigh/Suzuki

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é calculada em ambiente Rayleigh/Suzuki, ou seja, em um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rayleigh e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki.

Dois métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rayleigh/Suzuki são mostrados. Estes métodos são chamados, apenas a título de identificação, de Método M e Método N.

No Método M e no Método N, consideram-se os sistemas de adição quadrática. Para o desenvolvimento destes métodos, é necessário notar que, para o ambiente Rayleigh/Suzuki:

- a relação sinal-desejado/ruído, γ , é modelada pela densidade dada pela Equação 3.52.
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são modeladas pela densidade composta Exponencial/Log-normal. Portanto, da Equação 2.263, tem-se

$$f_{\gamma_i}(\gamma_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_i} \int_0^\infty \frac{1}{(\gamma'_i)^2} \exp\left(-\frac{\gamma_i}{\gamma'_i}\right) \times \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_i^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma'_i \exp(2\sigma_i^2)}{\bar{\gamma}_i}\right]\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma_i \geq 0 : i = 1, \dots, n \quad (3.198)$$

onde $\{\gamma'_i : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\bar{\gamma}_i : i = 1, \dots, n\}$ são, respectivamente, as médias locais e as médias na área das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$; $\{var(\gamma_i) = [2 \exp(4\sigma_i^2) - 1] (\bar{\gamma}_i)^2 : i = 1, \dots, n\}$ são as variâncias das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, e $\{\sigma_i : i = 1, \dots, n\}$ são os desvios padrão de sombreamento, dados em neper, das interferências.

3.8.1 Método M

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um

ambiente Rayleigh/Suzuki, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.199)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Assim, das Equações 3.52 e 3.199, obtém-se a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, na forma de um produto de imagens Laplacianas, conforme a Equação 3.93.

As transformadas de Laplace, $\{L[f_{\gamma_i}(\gamma_i), R_\gamma/\bar{\gamma}] : i = 1, \dots, n\}$, no ponto $R_\gamma/\bar{\gamma}$, das funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.94.

Das Equações 3.94 e 3.198, obtém-se

$$\begin{aligned} L\left[f_{\gamma_i}(\gamma_i), \frac{R_\gamma}{\bar{\gamma}}\right] &= \int_0^\infty \frac{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \gamma_i'}}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \gamma_i'}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_i \gamma_i'} \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_i^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma_i' \exp(2\sigma_i^2)}{\bar{\gamma}_i}\right]\right]^2\right] d\gamma_i' : i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3.200)$$

Logo, das Equações 3.93 e 3.200, tem-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \prod_{i=1}^n \int_0^\infty \frac{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \gamma_i'}}{1 + \frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma \gamma_i'}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_i \gamma_i'} \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_i^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma_i' \exp(2\sigma_i^2)}{\bar{\gamma}_i}\right]\right]^2\right] d\gamma_i' \end{aligned} \quad (3.201)$$

Fazendo $\{u_i = \ln[\gamma_i' \exp(2\sigma_i^2)/\bar{\gamma}_i]/(2\sqrt{2}\sigma_i) : i = 1, \dots, n\}$, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^\infty \frac{\frac{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_i^2 - 2\sqrt{2}\sigma_i u_i)}{R_\gamma \bar{\gamma}_i}}{1 + \frac{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_i^2 - 2\sqrt{2}\sigma_i u_i)}{R_\gamma \bar{\gamma}_i}} \exp(-u_i^2) du_i \quad (3.202)$$

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^\infty \frac{10^{\frac{Z_i}{10}} \exp(2\sigma_i^2 - 2\sqrt{2}\sigma_i u_i)}{1 + 10^{\frac{Z_i}{10}} \exp(2\sigma_i^2 - 2\sqrt{2}\sigma_i u_i)} \exp(-u_i^2) du_i \quad (3.203)$$

onde $\{Z_i : i = 1, \dots, n\}$ são as margens, dadas em decibéis, dadas pela Equação 3.69.

Considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\gamma'_i = \gamma'_I : i = 1, \dots, n\}$, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$, obtém-se $u = \ln[\gamma'_I \exp(2\sigma_I^2) / \bar{\gamma}_I] / (2\sqrt{2}\sigma_I)$ e, da Equação 3.203,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{10^{\frac{Z}{10}} \exp(2\sigma_I^2 - 2\sqrt{2}\sigma_I u)}{1 + 10^{\frac{Z}{10}} \exp(2\sigma_I^2 - 2\sqrt{2}\sigma_I u)} \exp(-u^2) du \right]^n \quad (3.204)$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Assim, da Equação 3.204, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes, mostradas nas Figuras 3.30.

3.8.2 Método N

Um outro método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rayleigh/Suzuki, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^{\infty} f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_{\gamma} x} f_{\gamma}(\gamma) d\gamma dx \quad (3.205)$$

onde R_{γ} é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_{\gamma}(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

As funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.198, podem ser aproximadas por densidades Log-normal [19], dadas por

$$f_{\gamma_i}(\gamma_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_{i_a} \gamma_i} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_{i_a}^2} \left[\ln \left[\frac{\gamma_i \exp(2\sigma_{i_a}^2)}{\bar{\gamma}_i} \right] \right]^2 \right] \quad \gamma_i \geq 0 : i = 1, \dots, n \quad (3.206)$$

onde [19]

$$\sigma_{i_a} = \sqrt{\sigma_i^2 + \frac{\ln 2}{4}} \quad (3.207)$$

são os desvio padrão de sombreamento, dados em neper, das densidades aproximadas.

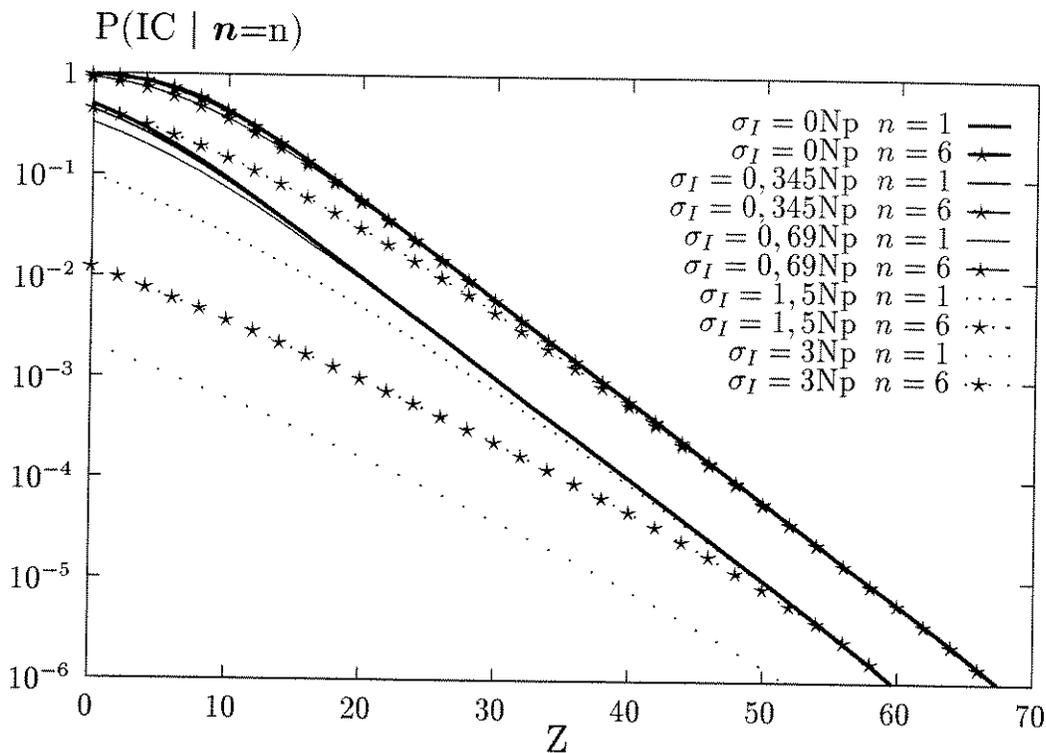


Figura 3.30: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método M.

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$ são dadas pela Equação 3.206;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$, e portanto, $\{\sigma_{i_a} = \sigma_{I_a} : i = 1, \dots, n\}$;

obtém-se uma expressão aproximada³⁵ para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da

³⁵Esta expressão é uma expressão exata para a soma de densidades Log-normal, entretanto, as densidades

relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada por [13]

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \quad x \geq 0 \quad (3.208)$$

onde \bar{x} é a média da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , e

$$\text{var}(\mathbf{x}) = \left[\exp(4\sigma_x^2) - 1 \right] (\bar{x})^2 \quad (3.209)$$

é a variância da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Fazendo uso do Método de Fenton [16, 22], obtém-se

$$\bar{x} = n \bar{\gamma}_I \quad (3.210)$$

e

$$\text{var}(\mathbf{x}) = n \left[\exp(4\sigma_{I_a}^2) - 1 \right] (\bar{\gamma}_I)^2 \quad (3.211)$$

Das Equações 3.209, 3.210 e 3.211, obtém-se

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_{I_a}^2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.212)$$

e portanto,

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.213)$$

Assim, das Equações 3.52, 3.205 e 3.208, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \int_0^\infty \exp\left(-\frac{R_\gamma x}{\bar{\gamma}}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \\ &\times \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] dx \end{aligned} \quad (3.214)$$

Fazendo $t = \ln[x \exp(2\sigma_x^2) / \bar{x}] / (2\sigma_x)$, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty \exp \left[-\frac{R_\gamma \bar{x} \exp(2\sigma_x t)}{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2)} \right] \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt \quad (3.215)$$

Das Equações 3.210, 3.213 e 3.215, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty \exp \left[-\frac{n \exp \left[\left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} t \right]}{10^{\frac{Z}{10}} \exp \left[\frac{1}{2} \ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]} \right] \\ &\times \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt \end{aligned} \quad (3.216)$$

Log-normal utilizadas são aproximações das densidades compostas Exponencial/Log-normal. Portanto, esta é uma expressão aproximada para a soma de densidades compostas Exponencial/Log-normal.

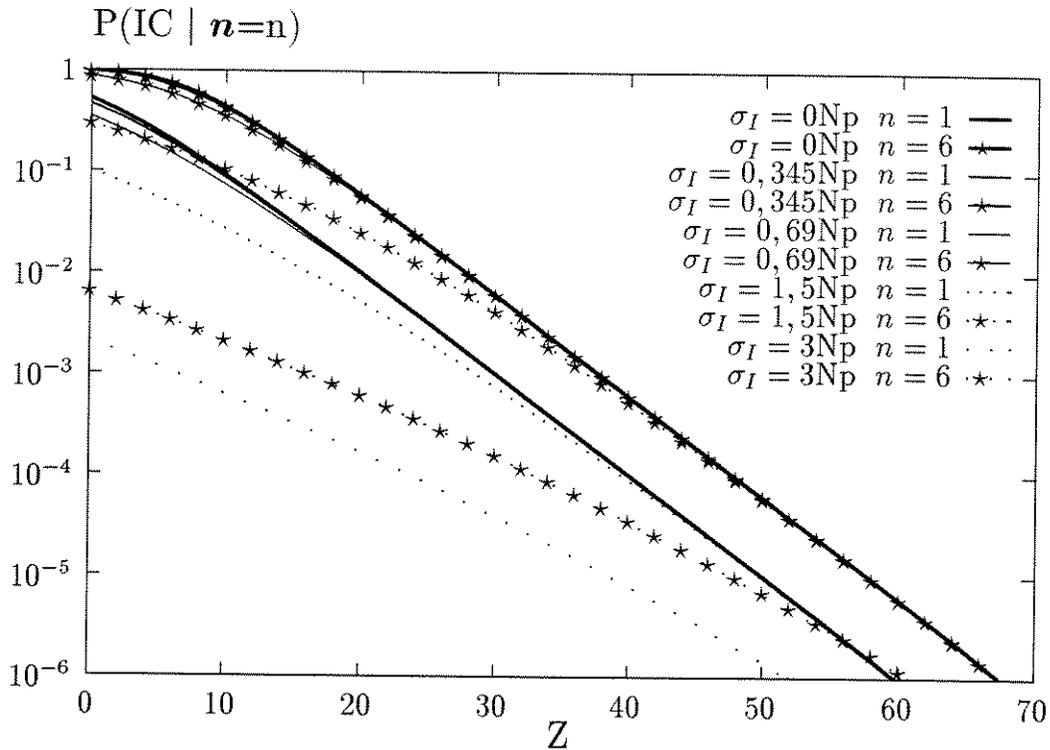


Figura 3.31: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método N.

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Assim, da Equação 3.216, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes, mostradas nas Figuras 3.31.

3.8.3 Comentários e Conclusões

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi calculada em ambiente Rayleigh/Suzuki, ou seja, em um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rayleigh e os sinais interferentes sofrem desvanecimento

Suzuki.

Dois métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rayleigh/Suzuki foram mostrados. Estes métodos foram chamados, apenas a título de identificação, de Método M e Método N.

No Método M e no Método N, consideram-se os sistemas de adição quadrática.

O Método M:

- É um método exato e simples, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rayleigh/Suzuki, a partir
 - da Equação 3.199.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.52.
 - das funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.198.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado - dada pela Equação 3.203.
 - Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.204.

A partir da segunda solução descrita para este método foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.30. Da Figura 3.30, pode-se perceber que, para o ambiente Rayleigh/Suzuki, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes diminui com o aumento desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes.

- É contribuição deste trabalho de tese.

O Método N:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rayleigh/Suzuki, a partir
 - da Equação 3.205.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.52.
 - de expressões aproximadas para as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.206;³⁶
 - de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dadas pelas Equações 3.208.³⁶
 - de expressões aproximadas para a média e a variância da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , obtidas a partir do uso do Método de Fenton, que é um método aproximado, dadas, respectivamente, pela Equação 3.210³⁶ e 3.211.³⁶
- Apresenta a seguinte solução para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.216.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.31. Da comparação das Figuras 3.30 e 3.31, observa-se que esta solução do Método N apresenta resultados muito aproximados aos da solução particular equivalente do Método M, para $\sigma_I \leq 0,69 N_p$, e apresenta resultados um pouco mais otimistas, aos da solução particular equivalente do Método M para $\sigma_I > 0,69 N_p$.³⁷

³⁶Esta expressão será novamente utilizada nos ambientes Nakagami/Suzuki, Rice/Suzuki, Suzuki/Suzuki, Nakagami Sombreado/Suzuki e Rice Sombreado/Suzuki, nos quais os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki.

³⁷Estas comparações validam o Método N e, portanto, validam a utilização da Equações 3.206 e 3.208 e o uso do Método de Fenton.

- É contribuição deste trabalho de tese.

3.9 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Nakagami/Suzuki

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é calculada em ambiente Nakagami/Suzuki, ou seja, em um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Nakagami e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki. É conveniente lembrar que a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Nakagami/Suzuki inclui a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rayleigh/Suzuki.

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Nakagami/Suzuki é mostrado.³⁸ Este método é chamado, apenas a título de identificação, de Método O.

No Método O, consideram-se os sistemas de adição quadrática. Para o desenvolvimento destes métodos, é necessário notar que, para o ambiente Nakagami/Suzuki:

- a relação sinal-desejado/ruído, γ , é modelada pela densidade dada pela Equação 3.123.
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são modeladas pelas densidades dadas pela Equação 3.248.

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade Gama, dada pela Equação 3.123, degenera-se para a densidade dada pela Equação 3.52, ou seja, tem-se um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rayleigh e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh/Suzuki.

3.9.1 Método O

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um

³⁸Este método pode, portanto, ser utilizado em ambiente Rayleigh/Suzuki, sendo necessário apenas utilizar valor adequado para o parâmetro de desvanecimento do sinal desejado.

ambiente Nakagami/Suzuki, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.217)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

As funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.198, podem ser aproximadas por densidades dadas pela Equação 3.206.

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$ são dadas pela Equação 3.206;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$, e portanto, $\{\sigma_{i_a} = \sigma_{I_a} : i = 1, \dots, n\}$;

obtém-se uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.208, aqui repetida por conveniência,

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \quad x \geq 0 \quad (3.218)$$

onde

$$\bar{x} = n \bar{\gamma}_I \quad (3.219)$$

e

$$\text{var}(\mathbf{x}) = n \left[\exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) - 1 \right] (\bar{\gamma}_I)^2 \quad (3.220)$$

Obtém-se também

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.221)$$

Assim, das Equações 3.123, 3.217 e 3.218, obtém-se, para o caso particular em que o parâmetro m é inteiro,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^\infty \exp\left(-\frac{m R_\gamma x}{\bar{\gamma}}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln\left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}}\right]\right]^2\right] \times \sum_{l=0}^{m-1} \frac{1}{l!} \left(\frac{m R_\gamma x}{\bar{\gamma}}\right)^l dx \quad (3.222)$$

Fazendo $t = \ln[x \exp(2\sigma_x^2) / \bar{x}] / (2\sigma_x)$, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty \exp\left[-\frac{m R_\gamma \bar{x}}{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2 - 2\sigma_x t)}\right] \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \times \sum_{l=0}^{m-1} \frac{1}{l!} \left[\frac{m R_\gamma \bar{x}}{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2 - 2\sigma_x t)}\right]^l dt \quad (3.223)$$

Das Equações 3.219, 3.221 e 3.223, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty \exp\left[-\frac{m n \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} t\right]}{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]}\right] \times \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \sum_{l=0}^{m-1} \frac{1}{l!} \times \left[\frac{m n \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} t\right]}{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]}\right]^l dt \quad (3.224)$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que $m = 1$, ou seja, para o ambiente Rayleigh/Suzuki, obtém-se, da Equação 3.224, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty \exp\left[-\frac{n \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} t\right]}{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]}\right] \times \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (3.225)$$

A solução do Método O, dada pela Equação 3.225, coincide com a solução do Método N, dada pela Equação 3.216.

Assim, da Equação 3.224, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em

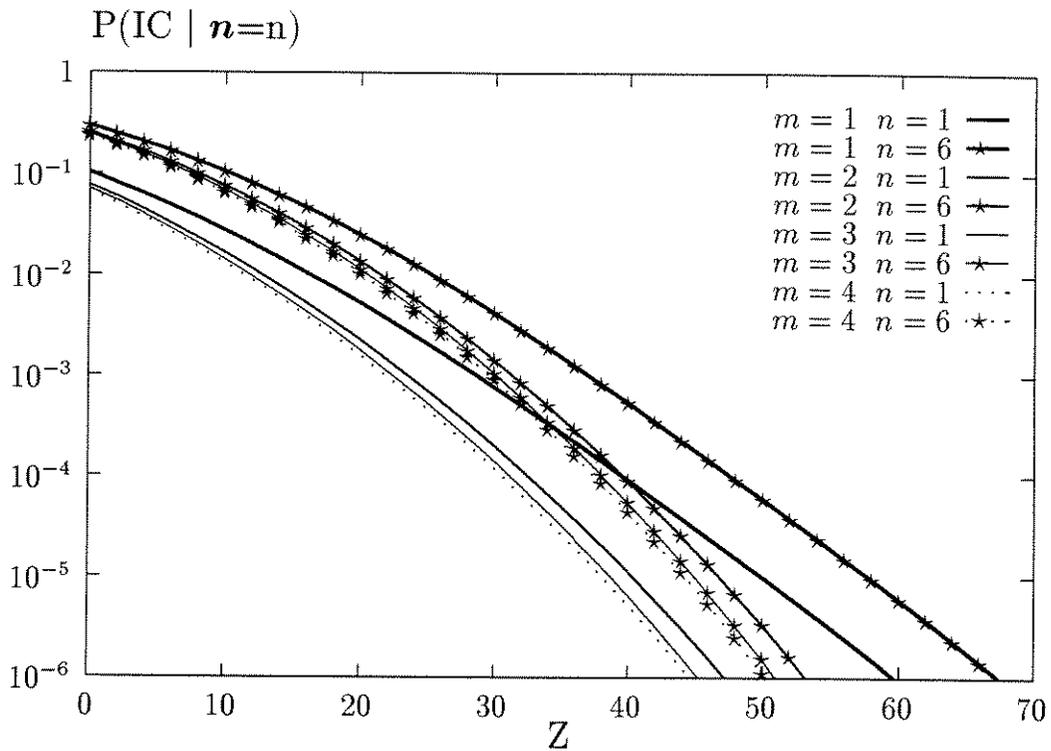


Figura 3.32: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma_I = 1,5$ Np, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado - Método O.

ambiente Nakagami/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.32 e 3.33.

As curvas mostradas na Figura 3.32 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\sigma_I = 1,5$ Np.

As curvas mostradas nas Figuras 3.33 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $m = 3$.

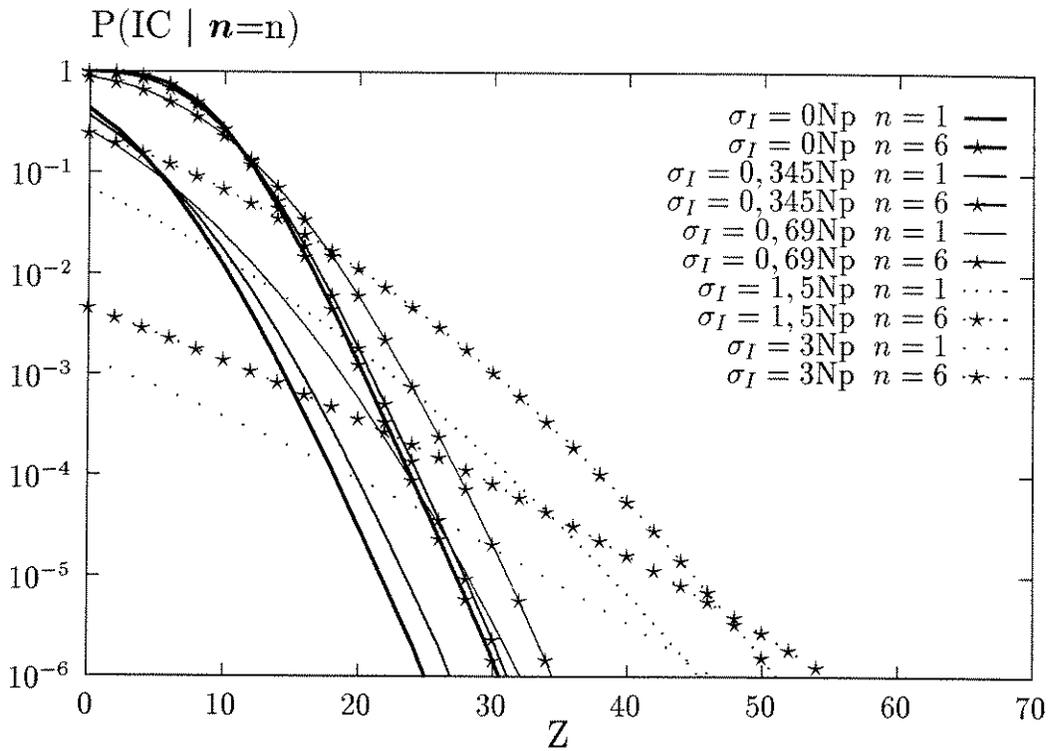


Figura 3.33: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $m = 3$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método O.

3.9.2 Comentários e Conclusões

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi calculada em ambiente Nakagami/Suzuki, ou seja, em um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rayleigh e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki.

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Nakagami/Suzuki foi mostrado. O método que foi mostrado pode também ser utilizado em ambiente Rayleigh/Suzuki. Este método foi chamado, apenas a título de identificação, de Método O.

No Método O consideram-se os sistemas de adição quadrática.

O Método O:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Nakagami/Suzuki, a partir
 - da Equação 3.217;
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.123;
 - de expressões aproximadas para as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.206;
 - de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.218, e
 - de expressões aproximadas para a média e a variância da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , obtidas a partir do uso do Método de Fenton, que é um método aproximado, dadas, respectivamente, pelas Equações 3.219 e 3.220.
- Apresenta a seguinte solução para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Em ambiente Nakagami/Suzuki:³⁹
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.224.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.32 e 3.33.
 - Em ambiente Rayleigh/Suzuki:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.225.

³⁹Esta solução é restrita ao caso particular em que o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado seja inteiro. Esta é uma desvantagem deste método.

Esta solução do Método O coincide com a solução do Método N.

Da Figura 3.32, observa-se que, para o ambiente Nakagami/Suzuki, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes diminui com o aumento do parâmetro de desvanecimento do sinal desejado. Entretanto, percebe-se da comparação da Figura 3.18 (ou 3.20) com a Figura 3.32 que a influência do parâmetro de desvanecimento do sinal desejado diminui muito com o aumento do desvio padrão de sombreamento. Esta conclusão é reforçada pela comparação das Figuras 3.30 (ou 3.31) com a Figura 3.33. Assim, é interessante ressaltar que, em relação a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes ativos, o ambiente Rayleigh/Suzuki é tanto mais crítico que o ambiente Nakagami/Suzuki quanto menor for desvio padrão de sombreamento das interferências.

- É contribuição deste trabalho de tese.

3.10 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rice/Suzuki

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é calculada em ambiente Rice/Suzuki, ou seja, em um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rice e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki. É conveniente lembrar que a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/suzuki inclui a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rayleigh/Suzuki.

Dois métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Suzuki são mostrados.⁴⁰ Estes métodos são chamados, apenas a título de identificação, de Método P e Método Q.

No Método P e no Método Q, consideram-se os sistemas de adição quadrática. Para o desenvolvimento destes métodos, é necessário notar que, para o ambiente Rice/Suzuki:

- a relação sinal-desejado/ruído, γ , é modelada pela densidade dada pela Equação 3.145.

⁴⁰Estes métodos podem, portanto, ser utilizados em ambiente Rayleigh/Suzuki, sendo necessário apenas utilizar valor adequado para o fator de Rice do sinal desejado.

- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são modeladas pelas densidades dadas pela Equação 3.198.

Para o caso particular em que $k = 0$, a densidade Chi-quadrada não Central, dada pela Equação 3.145, degenera-se para a densidade dada pela Equação 3.52, ou seja, tem-se um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rayleigh e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh/Suzuki.

3.10.1 Método P

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice/Suzuki, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.226)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

As funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.198, podem ser aproximadas por densidades dadas pela Equação 3.206.

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.206;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$, e portanto, $\{\sigma_{i_a} = \sigma_{I_a} : i = 1, \dots, n\}$;

obtem-se uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.208, aqui repetida por conveniência,

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \quad x \geq 0 \quad (3.227)$$

onde

$$\bar{x} = n \bar{\gamma}_I \tag{3.228}$$

e

$$var(\mathbf{x}) = n \left[\exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) - 1 \right] (\bar{\gamma}_I)^2 \tag{3.229}$$

Obtém-se também

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.230}$$

Assim, das Equações 3.145, 3.226 e 3.227, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2 \sigma_x x} \exp \left[-\frac{1}{8 \sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2 \sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \int_0^{R_\gamma x} \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \\ &\times \exp \left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}} \right] \exp(-k) I_0 \left[2 \sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\bar{\gamma}}} \right] d\gamma dx \end{aligned} \tag{3.231}$$

Das Equações 3.168 e 3.231, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \exp(-k) \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2 \sigma_x x} \exp \left[-\frac{1}{8 \sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2 \sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \\ &\times \exp \left[-\frac{R_\gamma x(1+k)}{\bar{\gamma}} \right] \sum_{l=0}^\infty \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma x(1+k)}{\bar{\gamma}} \right]^m dx \end{aligned} \tag{3.232}$$

Fazendo $t = \ln[x \exp(2 \sigma_x^2) / \bar{x}] / (2 \sigma_x)$, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \exp(-k) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty \exp \left[-\frac{R_\gamma \bar{x}(1+k)}{\bar{\gamma} \exp(2 \sigma_x^2 - 2 \sigma_x t)} \right] \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) \\ &\times \sum_{l=0}^\infty \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma \bar{x}(1+k)}{\bar{\gamma} \exp(2 \sigma_x^2 - 2 \sigma_x t)} \right]^m dt \end{aligned} \tag{3.233}$$

Das Equações 3.228, 3.230 e 3.233, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \frac{\exp(-10 \frac{K}{10})}{\sqrt{2\pi}} \\ &\times \int_{-\infty}^\infty \exp \left[-\frac{n(1+10 \frac{K}{10}) \exp \left[\left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} t \right]}{10 \frac{Z}{10} \exp \left[\frac{1}{2} \ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]} \right] \\ &\times \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) \sum_{l=0}^\infty \frac{10 \frac{lK}{10}}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \\ &\times \left[\frac{n(1+10 \frac{K}{10}) \exp \left[\left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} t \right]}{10 \frac{Z}{10} \exp \left[\frac{1}{2} \ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]} \right]^m dt \end{aligned} \tag{3.234}$$

onde K é o fator de Rice, dado em decibéis, e Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que $k = 0$, ou seja, para o ambiente Rayleigh/Suzuki, obtém-se, da Equação 3.234, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{n \exp \left[\left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} t \right]}{10^{\frac{Z}{10}} \exp \left[\frac{1}{2} \ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]} \right] \times \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt \quad (3.235)$$

A solução do Método P, dada pela Equação 3.235, coincide com a solução do Método N, dada pela Equação 3.216.

Assim, da Equação 3.234, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Rice/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.34 e 3.35.

As curvas mostradas na Figura 3.34 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\sigma_I = 1,5 \text{ Np}$.

As curvas mostradas nas Figuras 3.35 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $K = 6,48 \text{ dB}$.

3.10.2 Método Q

Um outro método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice/Suzuki, é obtido a partir da Equação 3.44, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^{\infty} f_{\gamma}(\gamma) \int_{\frac{\gamma}{R_{\gamma}}}^{\infty} f_{\mathbf{x}}(x) dx d\gamma \quad (3.236)$$

onde R_{γ} é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_{\gamma}(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

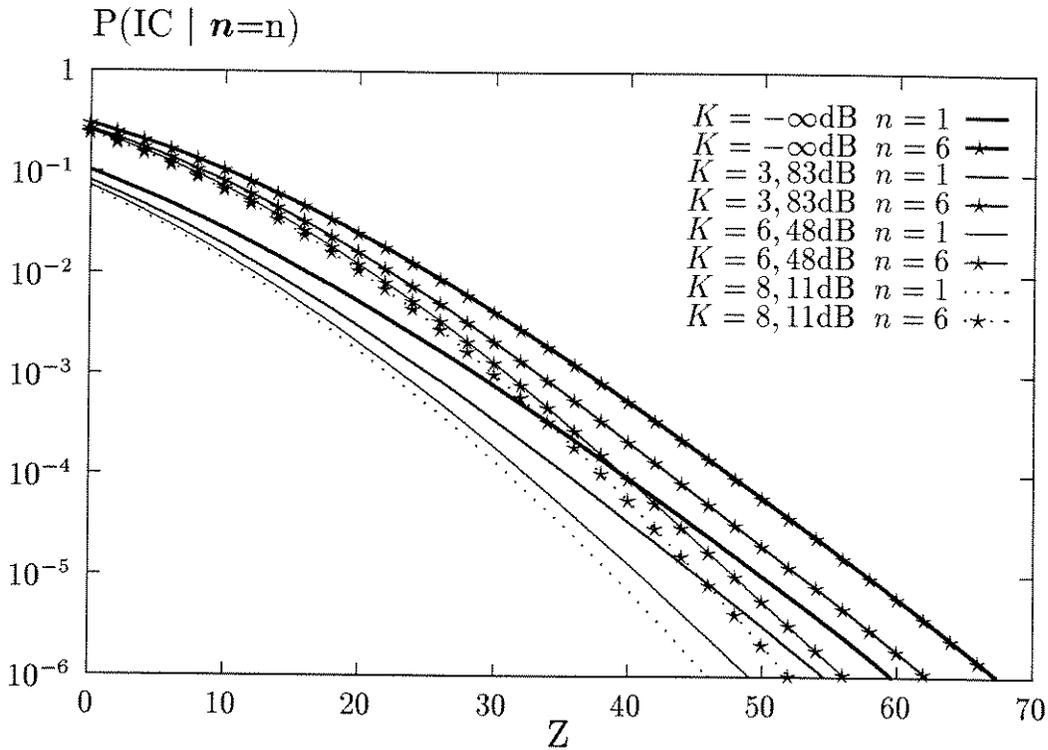


Figura 3.34: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma_I = 1,5 N_p$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado - Método P.

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.198;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, α , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$;

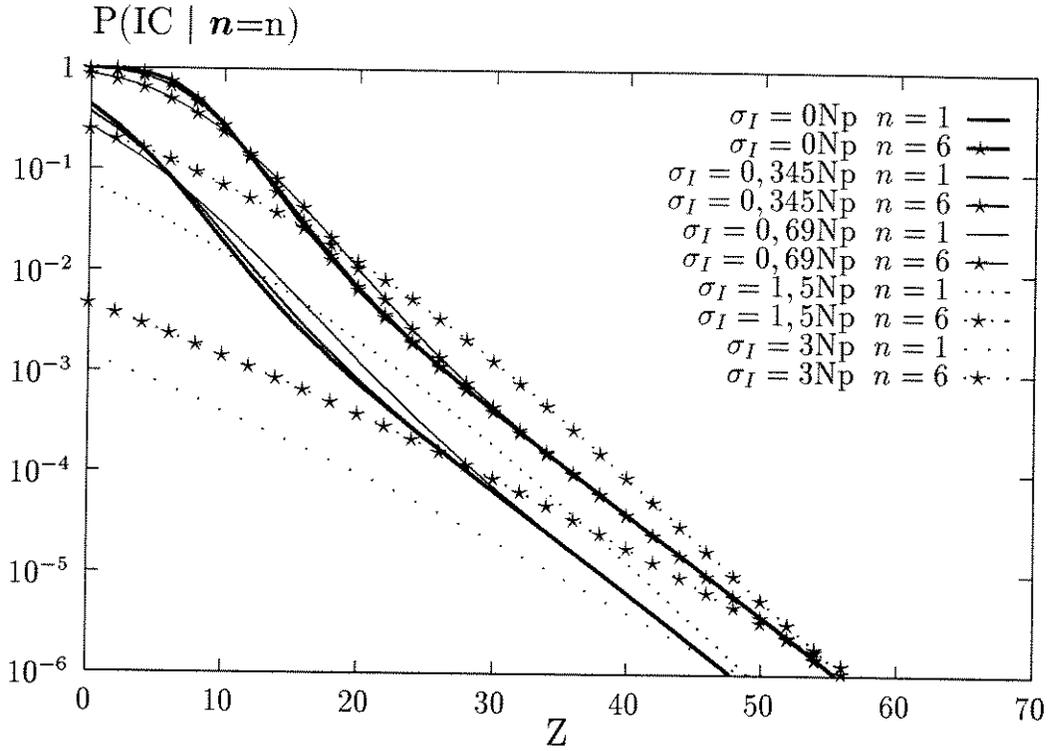


Figura 3.35: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $K = 6,48$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método P.

obtem-se uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada por [19]

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x} \int_0^\infty \frac{1}{(x')^2} \exp\left(-\frac{x}{x'}\right) \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln\left[\frac{x' \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}}\right]\right]^2\right] dx' \quad x \geq 0 \quad (3.237)$$

onde

$$\bar{x} = n \bar{\gamma}_I \quad (3.238)$$

é a média da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , e

$$var(\mathbf{x}) = [\exp(4\sigma_x^2) - 1] (\bar{x})^2 = n [\exp(4\sigma_I^2) - 1] (\bar{\gamma}_I)^2 \quad (3.239)$$

é a variância da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Da Equações 3.239, obtém-se ainda,

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.240)$$

Das Equações 3.236 e 3.237, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x} \int_0^\infty \frac{1}{x'} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x' \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \\ &\times \int_0^\infty \exp \left(-\frac{\gamma}{R_\gamma x'} \right) f_\gamma(\gamma) d\gamma dx' \end{aligned} \quad (3.241)$$

onde

$$\int_0^\infty \exp \left(-\frac{\gamma}{R_\gamma x'} \right) f_\gamma(\gamma) d\gamma = L \left[f_\gamma(\gamma), \frac{R_\gamma}{x'} \right] \quad (3.242)$$

é a transformada de Laplace, no ponto $1/(R_\gamma x')$, da função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ .

Das Equações 3.145 e 3.242, tem-se [11]

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \exp \left(-\frac{\gamma}{R_\gamma x'} \right) \frac{(1+k)}{\bar{\gamma}} \exp \left[-\frac{\gamma(1+k)}{\bar{\gamma}} \right] \exp(-k) I_0 \left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\bar{\gamma}}} \right] d\gamma = \\ \left[\frac{1}{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma x'(1+k)} + 1} \right] \exp \left[-\frac{k\bar{\gamma}}{R_\gamma x'(1+k)} \frac{1}{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma x'(1+k)} + 1} \right] \end{aligned} \quad (3.243)$$

Das Equações 3.241 e 3.243, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x} \int_0^\infty \frac{1}{x'} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x' \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \\ &\times \left[\frac{1}{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma x'(1+k)} + 1} \right] \exp \left[-\frac{k\bar{\gamma}}{R_\gamma x'(1+k)} \frac{1}{\frac{\bar{\gamma}}{R_\gamma x'(1+k)} + 1} \right] dx' \end{aligned} \quad (3.244)$$

Fazendo $t = \ln[x' \exp(2\sigma_x^2)/\bar{x}]/(2\sigma_x)$, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) \left[\frac{1}{\frac{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2 - 2\sigma_x t)}{R_\gamma \bar{x}(1+k)} + 1} \right] \\ &\times \exp \left[-\frac{k\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2 - 2\sigma_x t)}{R_\gamma \bar{x}(1+k)} \frac{1}{\frac{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2 - 2\sigma_x t)}{R_\gamma \bar{x}(1+k)} + 1} \right] dt \end{aligned} \quad (3.245)$$

Das Equações 3.238, 3.240 e 3.245, obtém-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \left[\frac{1}{\frac{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]}{n \left(1 + 10^{\frac{K}{10}}\right) \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} t\right]} + 1} \right] \\
 &\times \exp\left[-\frac{\frac{10^{\frac{K+Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]}{n \left(1 + 10^{\frac{K}{10}}\right) \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} t\right]}}{\frac{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]}{n \left(1 + 10^{\frac{K}{10}}\right) \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} t\right]} + 1} \right] dt \quad (3.246)
 \end{aligned}$$

onde K é o fator de Rice, dado em decibéis, e Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que $k = 0$, ou seja, para o ambiente Rayleigh/Suzuki, obtém-se, da Equação 3.246, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \left[\frac{1}{\frac{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]}{n \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} t\right]} + 1} \right] dt \quad (3.247)$$

Assim, da Equação 3.246, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Rice/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.36 e 3.37.

As curvas mostradas na Figura 3.36 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\sigma_I = 1,5 \text{ Np}$.

As curvas mostradas nas Figuras 3.37 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $K = 6,48 \text{ dB}$.

Da Equação 3.247, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes, mostradas nas Figuras 3.38.

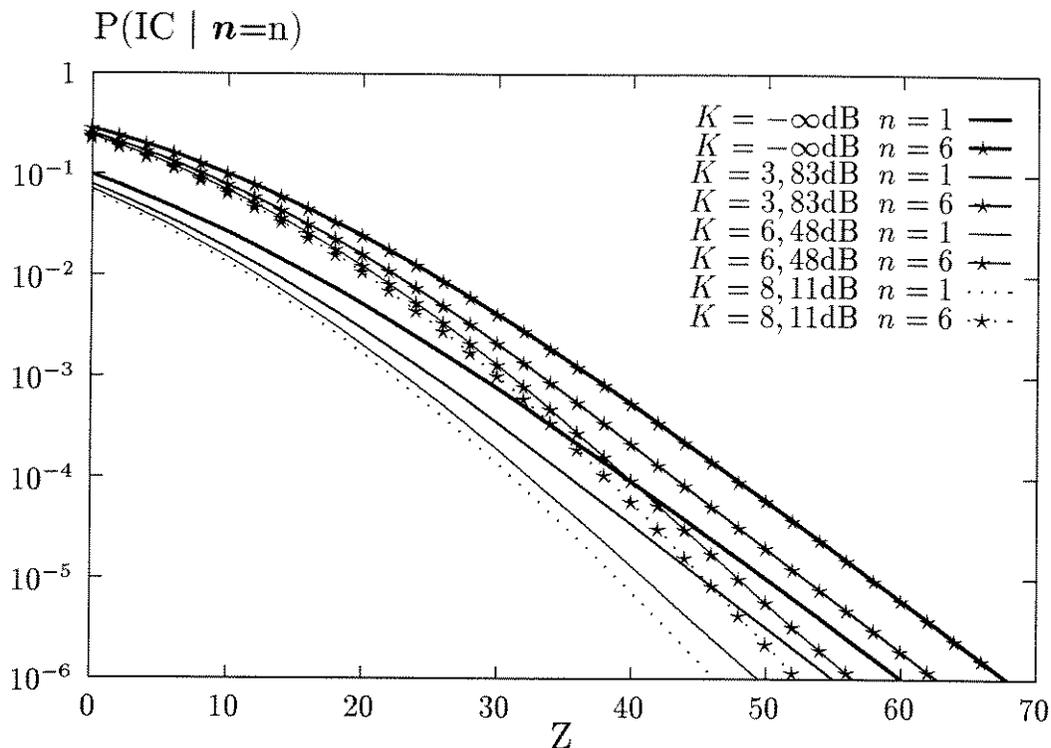


Figura 3.36: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma_I = 1, 5$ Np, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado - Método Q.

3.10.3 Comentários e Conclusões

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi calculada em ambiente Rice/Suzuki, ou seja, em um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rice e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki.

Dois métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Suzuki foram mostrados. Os métodos mostrados podem também ser utilizados em ambiente Rayleigh/Suzuki. Estes métodos foram chamados, apenas a título de identificação, de Método P e Método Q.

No Método P e no Método Q, consideram-se os sistemas de adição quadrática.

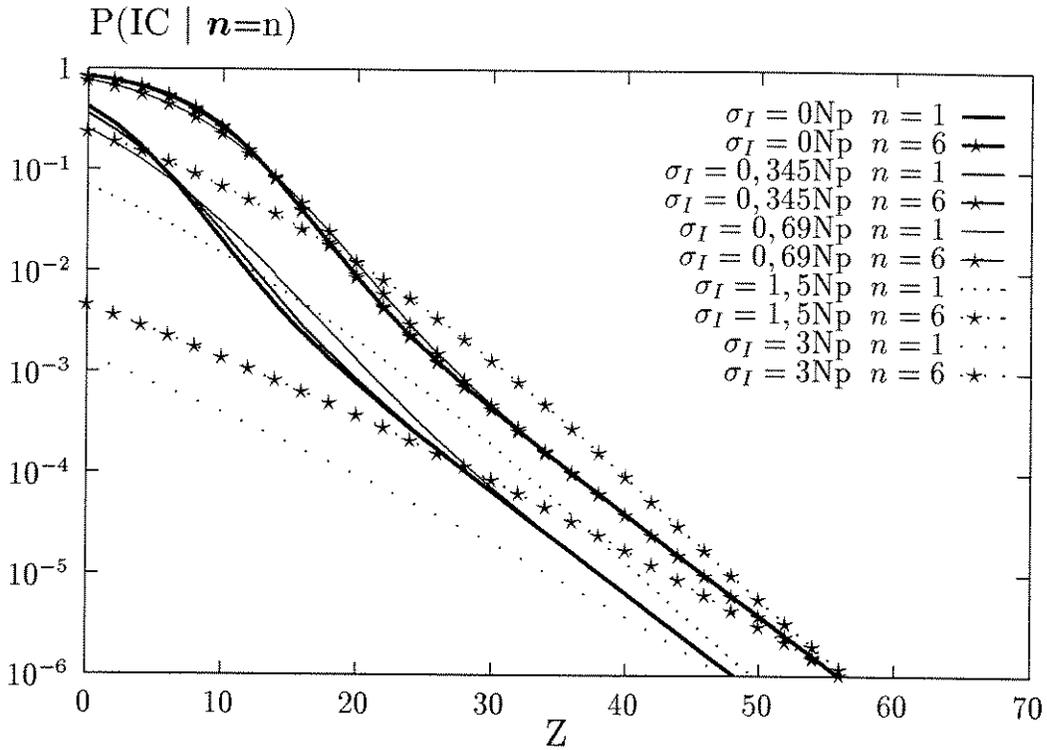


Figura 3.37: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $K = 6,48$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método Q.

O Método P:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice/Suzuki, a partir
 - da Equação 3.226.
 - da função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.145.

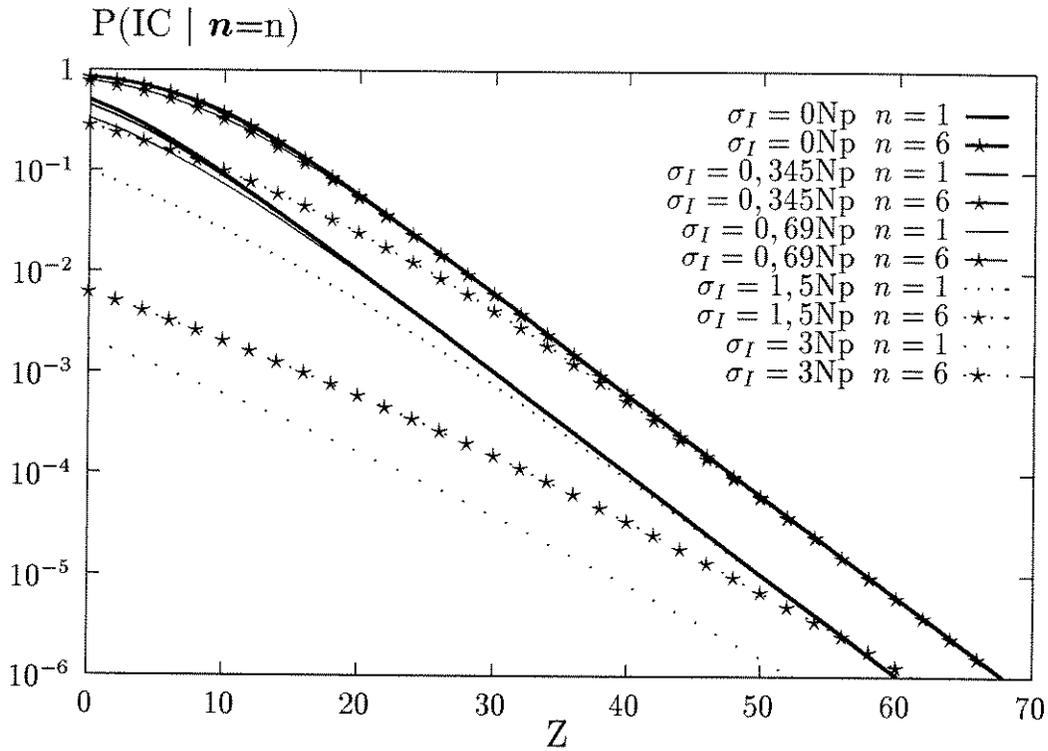


Figura 3.38: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rayleigh/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método Q.

- de expressões aproximadas para as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.206.
 - de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.227.
 - de expressões aproximadas para a média e a variância da relação interferência total/ruído, \mathbf{x} , dadas, respectivamente, pela Equação 3.228 e 3.229.
- Apresenta a seguinte solução para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:

– Em ambiente Rice/Suzuki:

- * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.234.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.34 e 3.35.

– Em ambiente Rayleigh/Suzuki:

- * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.235.

Esta solução do Método P coincide com a solução do Método N.

Da Figura 3.34, observa-se que, para o ambiente Rice/Suzuki, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes diminui com o aumento do fator de Rice do sinal desejado. Entretanto, percebe-se da comparação da Figura 3.21 (ou 3.22, ou 3.26) com a Figura 3.34 que a influência do fator de Rice do sinal desejado diminui muito com o aumento do desvio padrão de sombreamento. Esta conclusão é reforçada pela comparação das Figuras 3.30 (ou 3.31) com a Figura 3.35. Assim, é interessante ressaltar que, em relação a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes ativos, o ambiente Rayleigh/Suzuki é tanto mais crítico que o ambiente Rice/Suzuki, quanto menor for desvio padrão de sombreamento das interferências.

- É contribuição deste trabalho de tese.

O Método Q:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice/Suzuki, a partir

- da Equação 3.236.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.145.
 - de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.237.⁴¹
 - de expressões aproximadas para a média e a variância da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dadas, respectivamente, pela Equação 3.238⁴¹ e 3.239.⁴¹
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Em ambiente Rice/Suzuki:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.246.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.36 e 3.37.

- Em ambiente Rayleigh/Suzuki:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.247.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.38.

Os resultados mostrados nas Figuras 3.36 e 3.37 são semelhantes aos resultados particulares equivalentes do Método P, mostrados nas Figuras 3.34 e 3.35, e os resultados mostrados nas Figura 3.38 são semelhantes aos resultados do Método N, mostrados nas Figuras 3.30.⁴²

- Foi publicado previamente [11].

⁴¹Esta expressão será novamente utilizada em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, no qual os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki.

⁴²Estas comparações validam o Método Q e, portanto, validam a utilização das Equações 3.237, 3.238 e 3.240.

3.11 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Suzuki/Suzuki

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é calculada em ambiente Suzuki/Suzuki, ou seja, em um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki.

Três métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Suzuki/Suzuki são mostrados. Estes métodos são chamados, apenas a título de identificação, de Método R, Método S e Método T.

No Método R e no Método S, consideram-se os sistemas de adição quadrática. Para o desenvolvimento destes métodos, é necessário notar que, para o ambiente Suzuki/Suzuki:

- a relação sinal-desejado/ruído, γ , é modelada pela densidade composta Exponencial/Log-normal. Portanto, da Equação 2.263, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^{\infty} \frac{1}{(\gamma')^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma'}\right) \times \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}}\right]\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (3.248)$$

onde γ' e $\bar{\gamma}$ são, respectivamente, a média local e a média na área da relação sinal-desejado/ruído, γ ; $var(\gamma) = [2 \exp(4\sigma^2) - 1] (\bar{\gamma})^2$ é a variância da relação sinal-desejado/ruído, γ , e σ é o desvio padrão de sombreamento, dado em neper, do sinal desejado.

- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são modeladas pelas densidades dadas pela Equação 3.198.

No Método T consideram-se sistemas de adição linear. Para o desenvolvimento deste método, é necessário notar que, para o ambiente Suzuki/Suzuki:

- a envoltória, r , do sinal desejado, é modelada pela densidade composta Rayleigh/Log-normal. Portanto, da Equação 2.87, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$f_r(r) = \sqrt{\frac{\pi}{8\sigma^2}} \int_0^{\infty} \frac{r}{(r')^3} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \frac{r^2}{(r')^2}\right] \times \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{r' \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}{\bar{r}}\right]\right]^2\right] dr \quad r \geq 0 \quad (3.249)$$

onde r' e \bar{r} são, respectivamente, a média local e a média na área da envoltória, \mathbf{r} , do sinal desejado; $var(\mathbf{r}) = \left[\frac{4}{\pi} \exp(\sigma^2) - 1 \right] (\bar{r})^2$ é a variância da envoltória, \mathbf{r} , sinal desejado, e σ é o desvio padrão de sombreamento, dado em neper, do sinal desejado.

- as envoltórias, $\{\mathbf{r}_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências, também são modeladas pela densidade composta Rayleigh/Log-normal. Portanto, da Equação 2.87, tem-se

$$f_{\mathbf{r}_i}(r_i) = \sqrt{\frac{\pi}{8\sigma_i^2}} \int_0^\infty \frac{r_i}{(r'_i)^3} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \frac{r_i^2}{(r'_i)^2}\right] \times \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_i^2} \left[\ln\left[\frac{r'_i \exp\left(\frac{\sigma_i^2}{2}\right)}{\bar{r}_i}\right]\right]^2\right] dr \quad r \geq 0 : i = 1, \dots, n \quad (3.250)$$

onde $\{r'_i : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\bar{r}_i : i = 1, \dots, n\}$ são, respectivamente, as médias locais e as médias na área das envoltórias, $\{\mathbf{r}_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências; $\{var(\mathbf{r}_i) = \left[\frac{4}{\pi} \exp(\sigma_i^2) - 1 \right] (\bar{r}_i)^2 : i = 1, \dots, n\}$ são as variâncias das envoltórias, $\{\mathbf{r}_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências, e $\{\sigma_i : i = 1, \dots, n\}$ são os desvios padrões de sombreamento, dados em neper, das interferências.

3.11.1 Método R

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Suzuki/Suzuki, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.251)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

Assim, das Equações 3.248 e 3.251, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma\gamma'} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}}\right]\right]^2\right] \times \int_0^\infty \exp\left(-\frac{R_\gamma x}{\gamma'}\right) f_{\mathbf{x}}(x) dx d\gamma' \quad (3.252)$$

onde

$$\int_0^\infty \exp\left(-\frac{R_\gamma x}{\gamma'}\right) f_{\mathbf{x}}(x) dx = L\left[f_{\mathbf{x}}(x), \frac{R_\gamma}{\gamma'}\right] \quad (3.253)$$

é a transformada de Laplace, no ponto R_γ/γ' , da função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, portanto, é dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \gamma'} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}} \right] \right]^2 \right] \times \prod_{i=1}^n L \left[f_{\gamma_i}(\gamma_i), \frac{R_\gamma}{\gamma'} \right] d\gamma' \quad (3.254)$$

onde $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$ são as funções densidade de probabilidade das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$.

As transformadas de Laplace, $\{L[f_{\gamma_i}(\gamma_i), R_\gamma/\bar{\gamma}] : i = 1, \dots, n\}$, no ponto $R_\gamma/\bar{\gamma}$, das funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas por

$$L \left[f_{\gamma_i}(\gamma_i), \frac{R_\gamma}{\gamma'} \right] = \int_0^\infty \exp \left(-\frac{R_\gamma \gamma_i}{\gamma'} \right) f_{\gamma_i}(\gamma_i) d\gamma_i : i = 1, \dots, n \quad (3.255)$$

Das Equações 3.94 e 3.198, obtém-se

$$L \left[f_{\gamma_i}(\gamma_i), \frac{R_\gamma}{\gamma'} \right] = \int_0^\infty \frac{\frac{\gamma'}{R_\gamma \gamma_i}}{1 + \frac{\gamma'}{R_\gamma \gamma_i}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_i \gamma_i} \times \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_i^2} \left[\ln \left[\frac{\gamma_i \exp(2\sigma_i^2)}{\bar{\gamma}_i} \right] \right]^2 \right] d\gamma' : i = 1, \dots, n \quad (3.256)$$

Logo, das Equações 3.254 e 3.256, tem-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \gamma'} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}} \right] \right]^2 \right] \times \prod_{i=1}^n \int_0^\infty \frac{\frac{\gamma'}{R_\gamma \gamma_i}}{1 + \frac{\gamma'}{R_\gamma \gamma_i}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_i \gamma_i} \times \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_i^2} \left[\ln \left[\frac{\gamma_i \exp(2\sigma_i^2)}{\bar{\gamma}_i} \right] \right]^2 \right] d\gamma_i d\gamma' \quad (3.257)$$

Fazendo $\{u_i = \ln[\gamma_i \exp(2\sigma_i^2)/\bar{\gamma}_i]/(2\sqrt{2}\sigma_i) : i = 1, \dots, n\}$ e $v = \ln[\gamma' \exp(2\sigma^2)/\bar{\gamma}]/(2\sqrt{2}\sigma)$, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^\infty \exp(-v^2) \times \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^\infty \frac{\left[\frac{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_i^2 - 2\sqrt{2}\sigma_i u_i)}{R_\gamma \bar{\gamma}_i \exp(2\sigma^2 - 2\sqrt{2}\sigma v)} \right]}{1 + \left[\frac{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_i^2 - 2\sqrt{2}\sigma_i u_i)}{R_\gamma \bar{\gamma}_i \exp(2\sigma^2 - 2\sqrt{2}\sigma v)} \right]} \exp(-u_i^2) du_i dv \quad (3.258)$$

Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-v^2) \times \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{10^{\frac{Z_i}{10}} \left[\frac{\exp(2\sigma_i^2 - 2\sqrt{2}\sigma_i u_i)}{\exp(2\sigma^2 - 2\sqrt{2}\sigma v)} \right]}{1 + 10^{\frac{Z_i}{10}} \left[\frac{\exp(2\sigma_i^2 - 2\sqrt{2}\sigma_i u_i)}{\exp(2\sigma^2 - 2\sqrt{2}\sigma v)} \right]} \exp(-u_i^2) du_i dv \quad (3.259)$$

onde $\{Z_i : i = 1, \dots, n\}$ são as margens, dadas em decibéis, dadas pela Equação 3.69.

Considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\gamma'_i = \gamma'_I : i = 1, \dots, n\}$, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$, obtém-se $u = \ln[\gamma'_I \exp(2\sigma_I^2) / \bar{\gamma}_I] / (2\sqrt{2}\sigma_I)$ e, da Equação 3.259,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-v^2] \times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{10^{\frac{Z}{10}} \left[\frac{\exp(2\sigma_i^2 - 2\sqrt{2}\sigma_i u)}{\exp(2\sigma^2 - 2\sqrt{2}\sigma v)} \right]}{1 + 10^{\frac{Z}{10}} \left[\frac{\exp(2\sigma_i^2 - 2\sqrt{2}\sigma_i u)}{\exp(2\sigma^2 - 2\sqrt{2}\sigma v)} \right]} \exp(-u^2) du \right]^n dv \quad (3.260)$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Assim, da Equação 3.260, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.39-3.41.

As curvas mostradas na Figura 3.39 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. O desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e o desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $\sigma = \sigma_I$.

As curvas mostradas na Figura 3.40 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $\sigma = 1,5 \text{ Np}$.

As curvas mostradas na Figura 3.41 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\sigma_I = 1,5 \text{ Np}$.

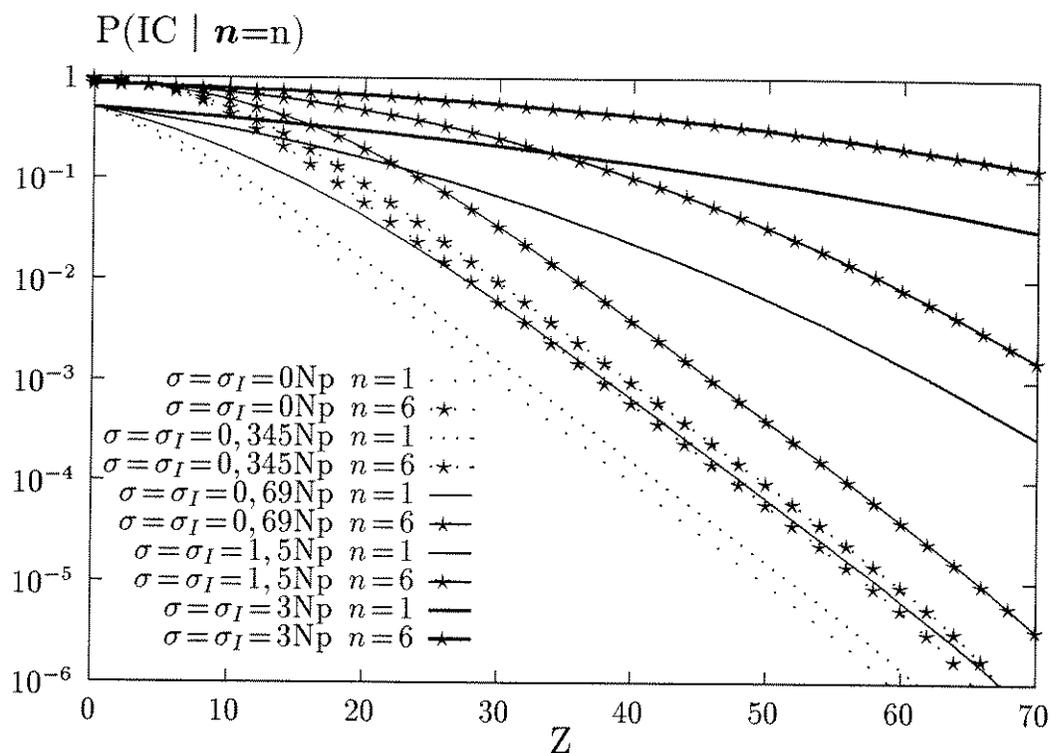


Figura 3.39: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método R.

3.11.2 Método S

Um outro método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Suzuki/Suzuki, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | n = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.261)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, x .

As funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.198, podem ser aproximadas por

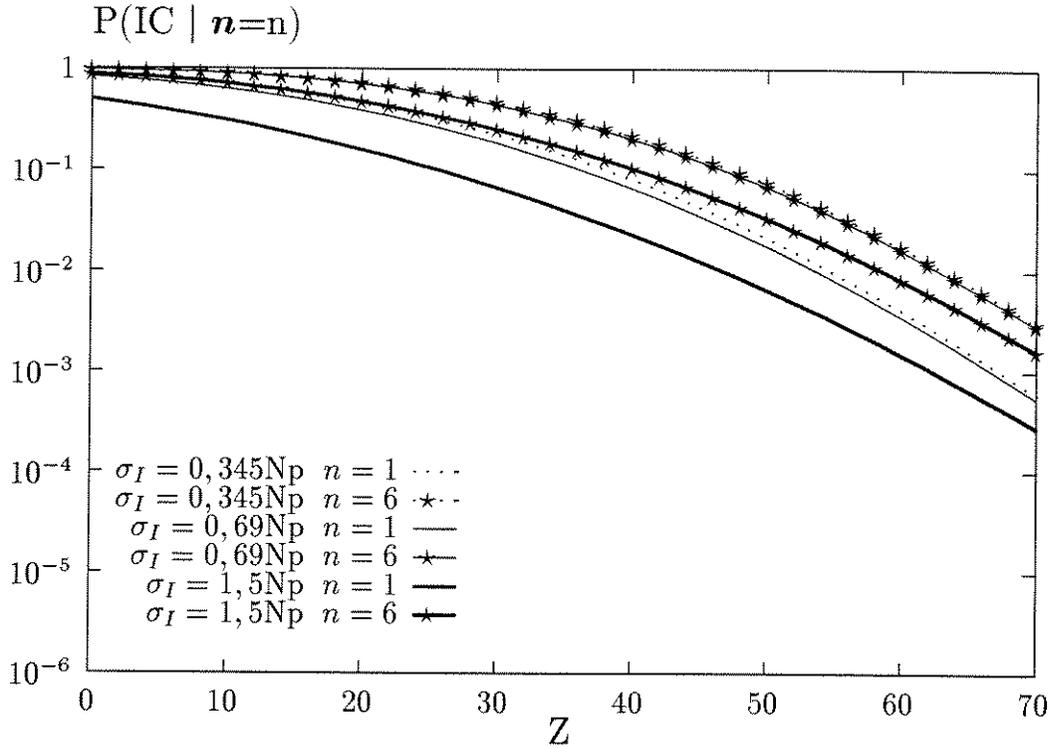


Figura 3.40: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma = 1,5 Np$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método R.

densidades dadas pela Equação 3.206.

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.206;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$, e portanto, $\{\sigma_{i_a} = \sigma_{I_a} : i = 1, \dots, n\}$;

obtem-se uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da

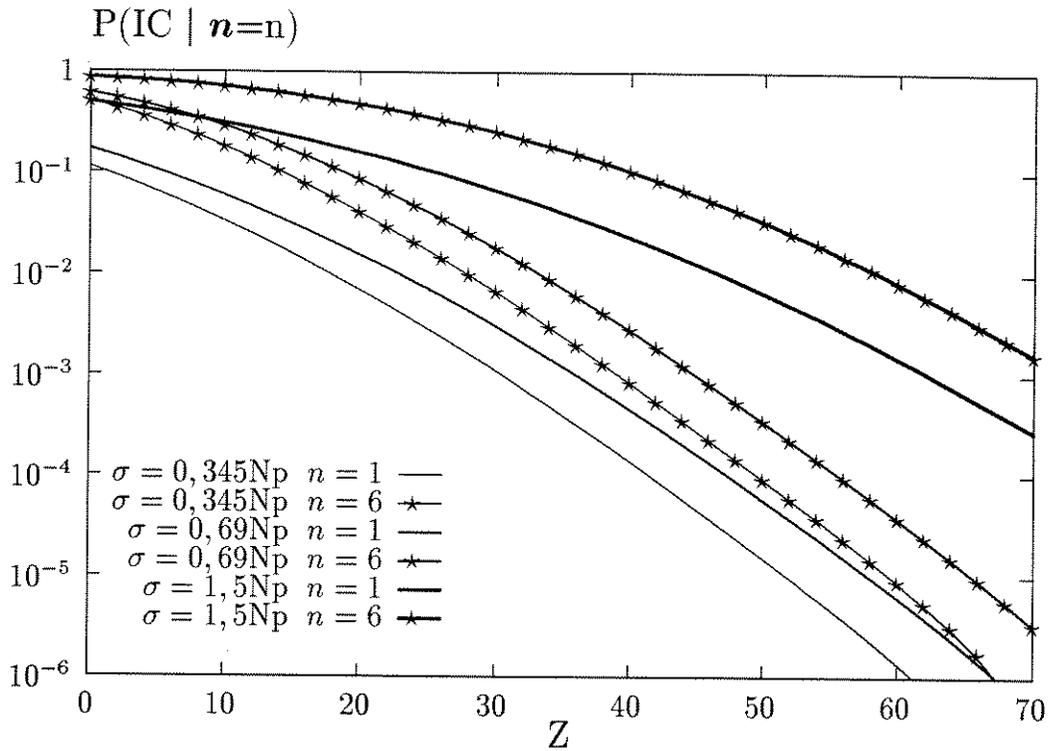


Figura 3.41: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma_I = 1,5 \text{ Np}$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado - Método R.

relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.208, aqui repetida por conveniência,

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \quad x \geq 0 \quad (3.262)$$

onde

$$\bar{x} = n \bar{\gamma}_I \quad (3.263)$$

e

$$\text{var}(\mathbf{x}) = n \left[\exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) - 1 \right] (\bar{\gamma}_I)^2 \quad (3.264)$$

Obtém-se também

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.265)$$

Assim, das Equações 3.248, 3.261 e 3.262, obtém-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \gamma'} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}} \right] \right]^2 \right] \\
 &\times \int_0^\infty \exp \left(-\frac{R_\gamma x}{\gamma'} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \\
 &\times \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] dx d\gamma' \quad (3.266)
 \end{aligned}$$

Fazendo $v = \ln[\gamma' \exp(2\sigma^2)/\bar{\gamma}]/(2\sigma)$ e $u = \ln[x \exp(2\sigma_x^2)/\bar{x}]/(2\sigma_x)$, obtém-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \exp \left(-\frac{v^2 + u^2}{2} \right) \\
 &\times \exp \left[-\frac{R_\gamma \bar{x} \exp(2\sigma_x u - 2\sigma v)}{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2 - 2\sigma^2)} \right] du dv \quad (3.267)
 \end{aligned}$$

Das Equações 3.263, 3.265 e 3.267, obtém-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \exp \left(-\frac{v^2 + u^2}{2} \right) \\
 &\times \exp \left[-\frac{n \exp \left[\left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} u - 2\sigma v \right]}{10^{\frac{Z}{10}} \exp \left[\frac{1}{2} \ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) \right] - 2\sigma^2 \right]} \right] \\
 &\times du dv \quad (3.268)
 \end{aligned}$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Assim, da Equação 3.268, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.42-3.44.

As curvas mostradas na Figura 3.42 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. O desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e o desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $\sigma = \sigma_I$.

As curvas mostradas na Figura 3.43 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $\sigma = 1,5$ Np.

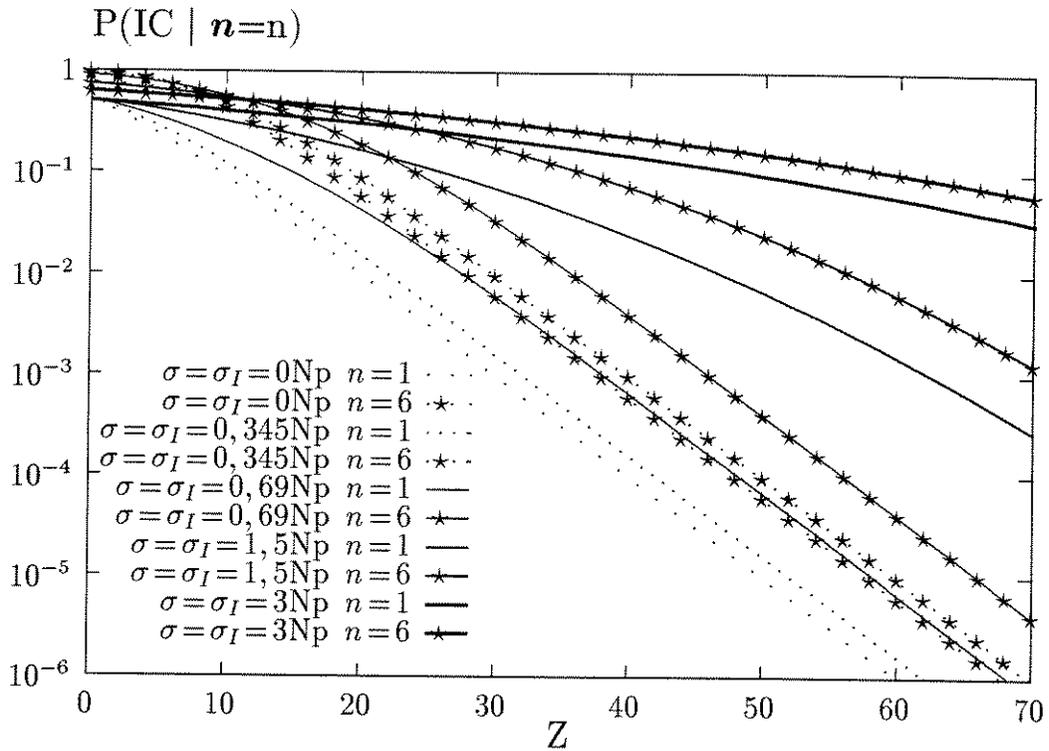


Figura 3.42: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método S.

As curvas mostradas na Figura 3.44 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\sigma_I = 1,5 \text{ Np}$.

3.11.3 Método T

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição linear, em um ambiente

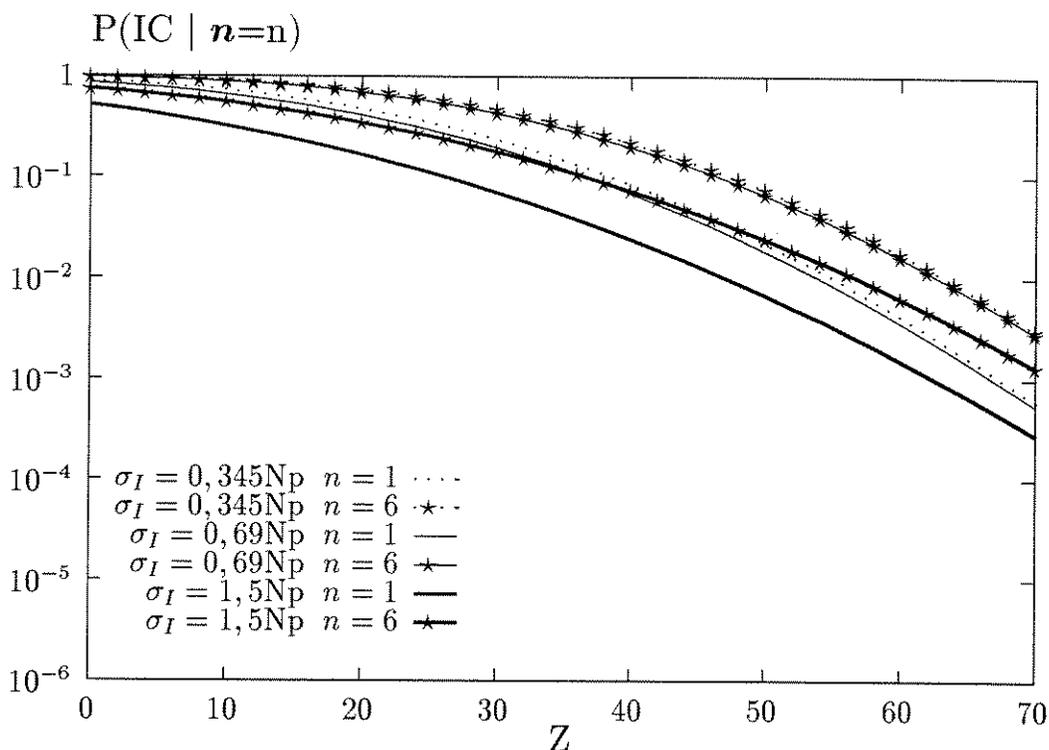


Figura 3.43: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma = 1,5 N_p$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método S.

Suzuki/Suzuki, é obtido a partir da Equação 3.29, aqui repetida por conveniência,⁴³

$$P(IC | n = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{y}}(y) \int_0^{R_r y} f_{\mathbf{r}}(r) dr dy \quad (3.269)$$

onde R_r é a razão de proteção para a envoltória, $f_{\mathbf{r}}(r)$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{r} , do sinal desejado, e $f_{\mathbf{y}}(y)$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total.

As funções densidade de probabilidade, $\{f_{\mathbf{r}_i}(r_i) : i = 1, \dots, n\}$, das envoltórias, $\{\mathbf{r}_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências existentes, dadas pela Equação 3.250, podem ser apro-

⁴³É importante lembrar que a Equação 3.29 foi obtida para sistemas móveis nos quais a interferência é a maior preocupação, ou seja, desprezando-se a mínima envoltória, r_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado.

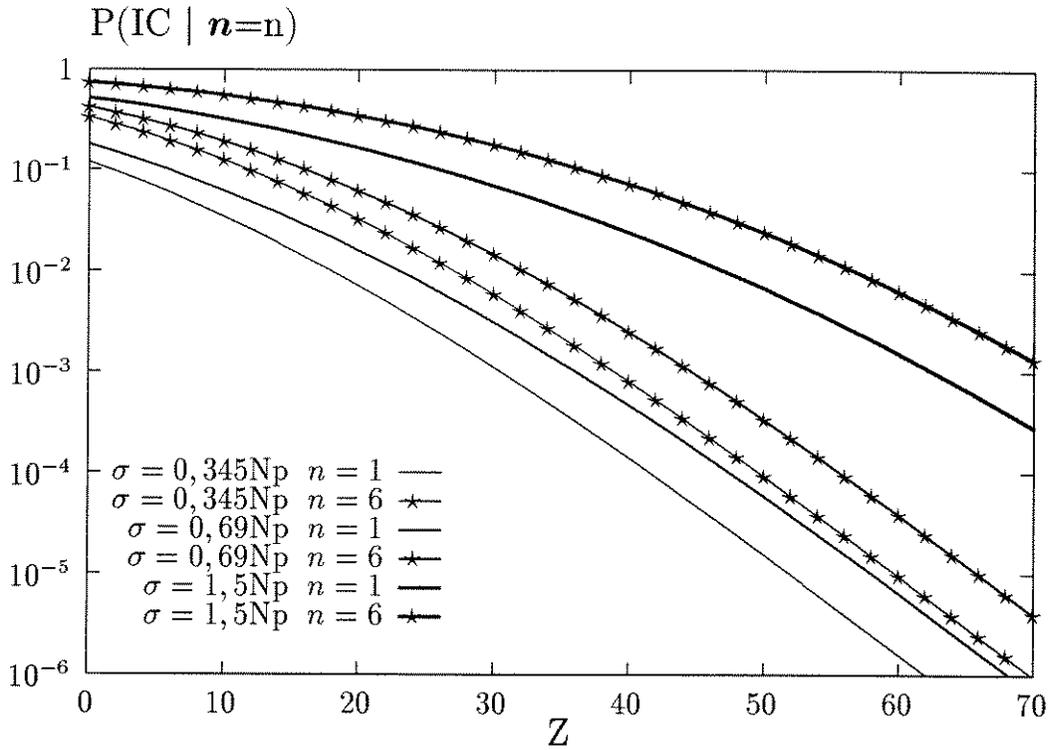


Figura 3.44: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma_I = 1,5 N_p$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado - Método S.

ximadas por densidades Log-normal [16], ou seja, tem-se

$$f_{r_i}(r_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{i_a} r_i} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{i_a}^2} \left[\ln \left[\frac{r_i \exp \left(\frac{\sigma_{i_a}^2}{2} \right)}{\bar{r}_i} \right] \right]^2 \right] \quad r_i \geq 0 : i = 1, \dots, n \quad (3.270)$$

onde [16]

$$\sigma_{i_a} = \sqrt{\sigma_i^2 + \ln \left(\frac{4}{\pi} \right)} : i = 1, \dots, n \quad (3.271)$$

são os desvio padrão de sombreamento, dados em neper, das densidades aproximadas.

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{r_i}(r_i) : i = 1, \dots, n\}$, das envoltórias, $\{r_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências existentes, são dadas pela Equação 3.270;
- para sistemas de adição linear, a envoltória, \mathbf{y} , da interferência total, é dada pela Equação 3.4;
- as envoltórias, $\{r_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{r}_i = \bar{r}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$, e portanto, $\{\sigma_{i_a} = \sigma_{I_a} : i = 1, \dots, n\}$.

obtem-se uma expressão aproximada⁴⁴ para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{y}}(y)$, da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total, dada por

$$f_{\mathbf{y}}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y y} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_y^2} \left[\ln\left[\frac{y \exp\left(\frac{\sigma_y^2}{2}\right)}{\bar{y}}\right]\right]^2\right] \quad y \geq 0 \quad (3.272)$$

onde \bar{y} é a média da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total, e

$$var(\mathbf{y}) = \left[\exp(\sigma_y^2) - 1\right] (\bar{y})^2 \quad (3.273)$$

é a variância da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total.

Fazendo uso do Método de Fenton [16, 22], obtém-se

$$\bar{y} = n \bar{r}_I \quad (3.274)$$

e

$$var(\mathbf{y}) = \left[\exp(\sigma_{I_a}^2) - 1\right] (\bar{y}_I)^2 \quad (3.275)$$

Das Equações 3.273, 3.274 e 3.275, obtém-se

$$\sigma_y = \left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(\sigma_{I_a}^2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.276)$$

ou seja,

$$\sigma_y = \left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp\left[\sigma_I^2 + \ln\left(\frac{4}{\pi}\right)\right]\right]\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.277)$$

⁴⁴Esta expressão é uma expressão exata para a soma de densidades Log-normal, entretanto as densidades Log-normal utilizadas são aproximações das densidades compostas Rayleigh/Log-normal, portanto, esta é uma expressão aproximada para a soma de densidades compostas Rayleigh/Log-normal.

Das Equações 3.249, 3.269 e 3.272, tem-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma r'} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{r' \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}{\bar{r}} \right] \right]^2 \right] \\
 &\times \int_0^\infty \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{R_r y}{r'} \right)^2 \right] \\
 &\times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y y} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_y^2} \left[\ln \left[\frac{y \exp\left(\frac{\sigma_y^2}{2}\right)}{\bar{y}} \right] \right]^2 \right] dr' dy \quad (3.278)
 \end{aligned}$$

Fazendo $v = \ln[r' \exp(\frac{\sigma^2}{2}) / \bar{r}] / \sigma$ e $u = \ln[y \exp(\frac{\sigma_y^2}{2}) / \bar{y}] / \sigma$, obtém-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \exp \left(\frac{v^2 + u^2}{2} \right) \\
 &\times \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left[\frac{R_r \bar{y} \exp(\sigma_y u - \sigma v)}{\bar{r} \exp\left(\frac{\sigma_y^2}{2} - \frac{\sigma^2}{2}\right)} \right]^2 \right] du dv \quad (3.279)
 \end{aligned}$$

Das Equações 3.274, 3.277 e 3.279, obtém-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \exp \left(\frac{v^2 + u^2}{2} \right) \\
 &\times \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left[\frac{R_r n \bar{r}_I \exp \left[\left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp \left[\sigma_I^2 + \ln \left(\frac{4}{\pi} \right) \right] \right] \right]^{\frac{1}{2}} u - \sigma v \right]}{\bar{r} \exp \left[\frac{1}{2} \ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp \left[\sigma_I^2 + \ln \left(\frac{4}{\pi} \right) \right] \right] - \frac{\sigma^2}{2} \right]} \right]^2 \right] \\
 &\times du dv \quad (3.280)
 \end{aligned}$$

Das Equações 2.108 e 2.196, obtém-se

$$\bar{\gamma} = \frac{2}{\pi} (\bar{r})^2 \exp(\sigma^2) \quad (3.281)$$

e

$$\bar{\gamma}_I = \frac{2}{\pi} (\bar{r}_I)^2 \exp(\sigma_I^2) \quad (3.282)$$

Das Equações 3.76, 3.281 e 3.282, obtém-se

$$Z = 20 \log \left[\frac{\bar{r}}{\bar{r}_I R_r} \exp \left(\frac{\sigma^2}{2} - \frac{\sigma_I^2}{2} \right) \right] \quad (3.283)$$

Assim, obtém-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{v^2 + u^2}{2}\right) \\
 &\times \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left[\frac{n \exp\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp\left[\sigma_I^2 + \ln\left(\frac{4}{\pi}\right)\right]\right]\right]^{\frac{1}{2}} u - \sigma v}{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp\left[\sigma_I^2 + \ln\left(\frac{4}{\pi}\right)\right]\right]\right] - \sigma^2 - \frac{\sigma_I^2}{2}} \right]^2 \right] \\
 &\times du dv
 \end{aligned} \tag{3.284}$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.283.

Assim, da Equação 3.284, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.45-3.47.

As curvas mostradas na Figura 3.45 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. O desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e o desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $\sigma = \sigma_I$.

As curvas mostradas na Figura 3.46 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $\sigma = 0,69 \text{ Np}$.

As curvas mostradas na Figura 3.47 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\sigma_I = 0,69 \text{ Np}$.

3.11.4 Comentários e Conclusões

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi calculada em ambiente Suzuki/Suzuki, ou seja, em um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki.

Três métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Suzuki/Suzuki foram mostrados. Estes métodos foram chamados, apenas a título de identificação, de Método R, Método S e Método T.

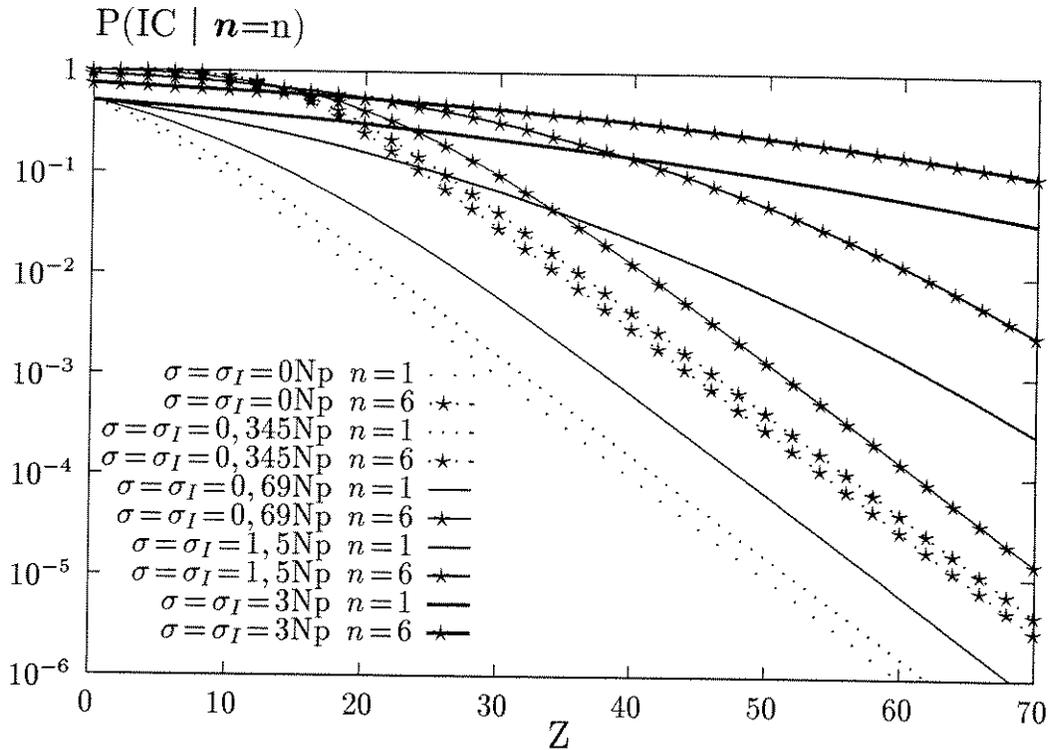


Figura 3.45: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, para sistemas de adição linear, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método T.

No Método R e no Método S, consideram-se os sistemas de adição quadrática. No Método T consideram-se sistemas de adição linear.

O Método R:

- É um método exato, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Suzuki/Suzuki, a partir

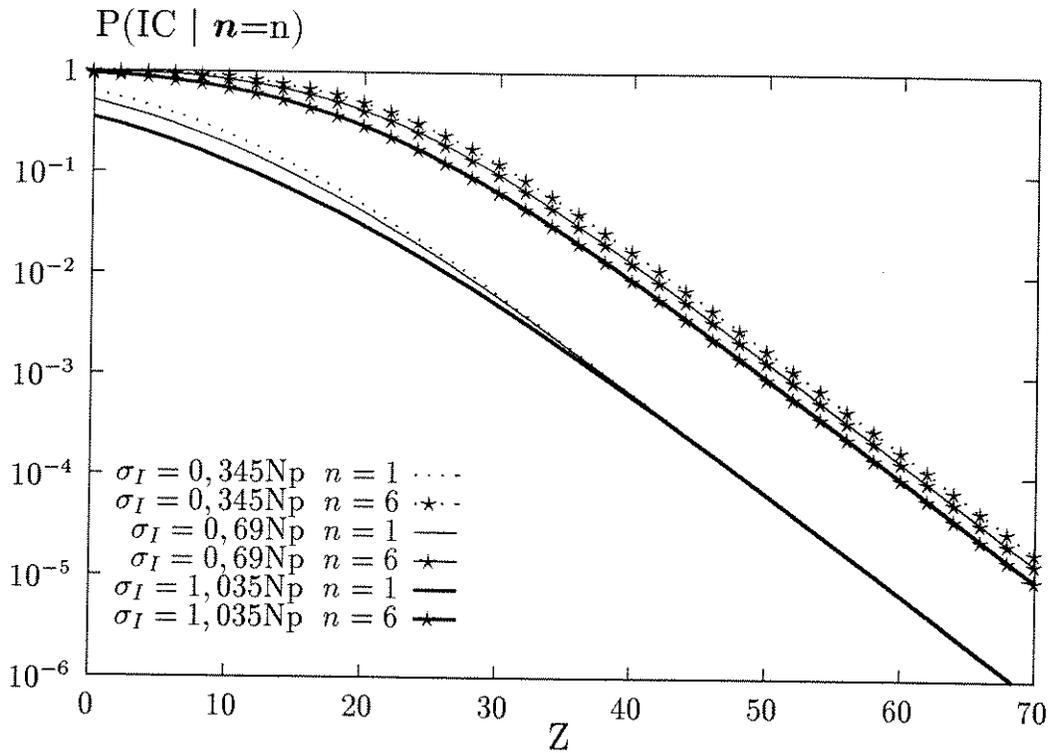


Figura 3.46: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, para sistemas de adição linear, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma = 0.69 Np$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método T.

- da Equação 3.251.
- da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.248.
- das funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.198.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado - dada pela Equação 3.259

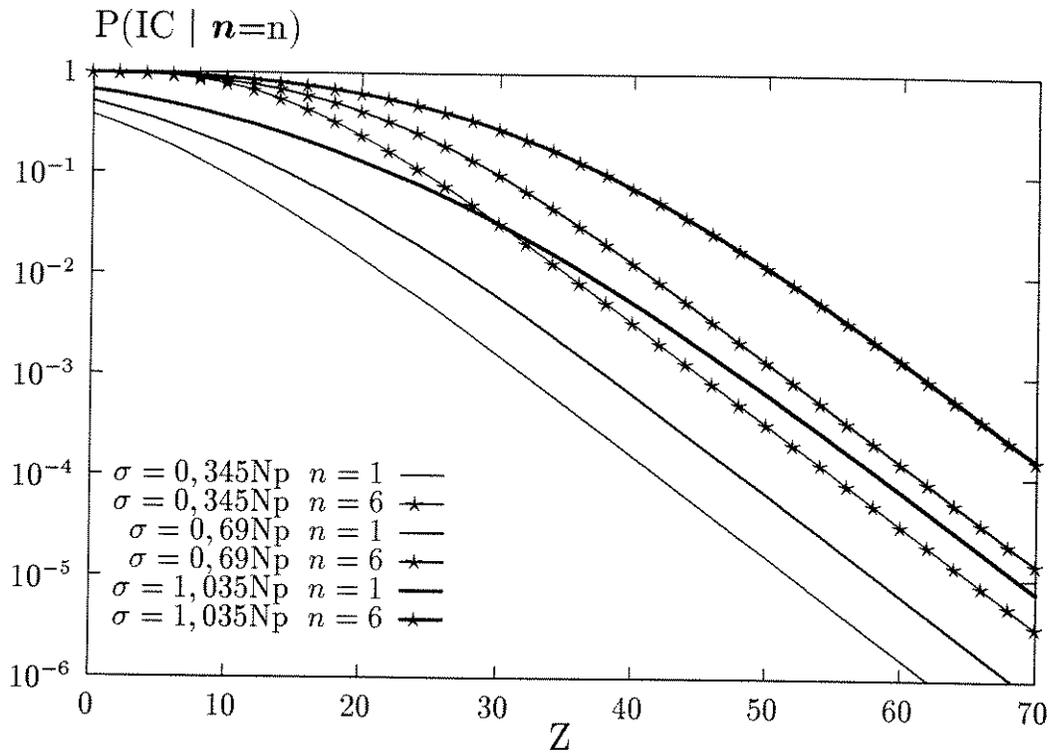


Figura 3.47: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma_I = 0,69 N_p$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado - Método T.

- Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.260.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas nas Figuras 3.39-3.41. Da Figura 3.41, observa-se que, para o ambiente Suzuki/Suzuki, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes sofre forte influência do desvio padrão de sombreamento do sinal desejado, aumentando consideravelmente com o aumento desvio padrão de sombreamento do sinal desejado. Da Figura 3.40, pode-se perceber que, para o ambiente Suzuki/Suzuki, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes sofre influência do desvio padrão de

sombreamento dos sinais interferentes, diminuindo com o aumento desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes. Conclui-se ainda que, para o ambiente Suzuki/Suzuki, o desvio padrão de sombreamento do sinal desejado é o parâmetro que mais fortemente exerce influência sobre a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes. Esta observação pode ser confirmada verificando-se, na Figura 3.39, que com igual aumento dos desvios padrão de sombreamento do sinal desejado e dos sinais interferentes predomina a influência do desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e, portanto, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes aumenta.

- É contribuição deste trabalho de tese.

O Método S:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Suzuki/Suzuki, a partir
 - da Equação 3.261.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.248.
 - de expressões aproximadas para as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.206.
 - de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.262.
 - de expressões aproximadas para a média e a variância da relação interferência total/ruído, \mathbf{x} , dadas, respectivamente, pela Equação 3.263 e 3.264.
- Apresenta a seguinte solução para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído,

$\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.268.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas nas Figura 3.42-3.44. Os resultados mostrados nas Figuras 3.42-3.44 são semelhantes aos resultados do Método R, mostrados nas Figuras 3.39-3.41.

- Foi publicado previamente [19].

O Método T:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição linear, em um ambiente Suzuki/Suzuki, a partir
 - da Equação 3.269.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{r}}(r)$, da envoltória do sinal desejado, \mathbf{r} , dada pela Equação 3.249.
 - de expressões aproximadas para as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\mathbf{r}_i}(r_i) : i = 1, \dots, n\}$, das envoltórias, $\{\mathbf{r}_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências, dadas pela Equação 3.270.
 - de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{y}}(y)$, da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total, dada pela Equação 3.272.
 - de expressões aproximadas para a média e a variância da envoltória, \mathbf{y} , da interferência total, dadas, respectivamente, pela Equação 3.274 e 3.273.
- Apresenta a seguinte solução para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Desprezando-se a mínima envoltória, r_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as envoltórias, $\{\mathbf{r}_i : i = 1, \dots, n\}$, das interferências são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.284.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas nas Figura 3.45-3.47.

- Foi publicado previamente [16].

3.12 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é calculada em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, ou seja, em um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Nakagami Sombreado e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki. É conveniente lembrar que a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki inclui a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Suzuki/Suzuki.

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki é mostrado.⁴⁵ Este método é chamado, apenas a título de identificação, de Método U.

No Método U, consideram-se os sistemas de adição quadrática. Para o desenvolvimento destes métodos, é necessário notar que, para o ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki:

- a relação sinal-desejado/ruído, γ , é modelada pela densidade composta Gama/Log-normal. Portanto, da Equação 2.313, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{m^m}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \Gamma(m)} \int_0^{\infty} \frac{\gamma'^{m-1}}{(\gamma')^{m+1}} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\gamma'}\right) \times \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}}\right]\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (3.285)$$

onde γ' e $\bar{\gamma}$ são, respectivamente, a média local e a média na área da relação sinal-desejado/ruído, γ ; $var(\gamma) = \left[\frac{1}{m^2} \frac{\Gamma(m+2)}{\Gamma(m)} \exp(4\sigma^2) - 1\right] (\bar{\gamma})^2$ é a variância da relação sinal-desejado/ruído, γ , e σ é o desvio padrão de sombreamento, dado em neper, do sinal desejado.

- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são modeladas pela densidade dada pela Equação 3.248.

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade composta Gama/Log-normal, dada pela Equação 3.285, degenera-se para a densidade dada pela Equação 3.248, ou seja, tem-se

⁴⁵Este método pode, portanto, ser utilizado em ambiente Suzuki/Suzuki, sendo necessário apenas utilizar valor adequado para o parâmetro de desvanecimento do sinal desejado.

um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki/Suzuki.

3.12.1 Método U

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_\gamma x} f_\gamma(\gamma) d\gamma dx \quad (3.286)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

As funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.198, podem ser aproximadas por densidades dadas pela Equação 3.206.

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.206;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$ e portanto, $\{\sigma_{i_a} = \sigma_{I_a} : i = 1, \dots, n\}$;

obtem-se uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.208, aqui repetida por conveniência,

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \quad x \geq 0 \quad (3.287)$$

onde

$$\bar{x} = n \bar{\gamma}_I \tag{3.288}$$

e

$$var(\mathbf{x}) = n \left[\exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) - 1 \right] (\bar{\gamma}_I)^2 \tag{3.289}$$

Obtém-se também

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.290}$$

Assim, das Equações 3.285, 3.286 e 3.287, obtém-se, para o caso particular em que o parâmetro m é inteiro,

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2 \sigma \gamma'} \exp \left[-\frac{1}{8 \sigma^2} \left[\ln \left[\frac{\gamma' \exp(2 \sigma^2)}{\bar{\gamma}} \right] \right]^2 \right] \\ &\times \int_0^\infty \exp \left(-\frac{m R_\gamma x}{\gamma'} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2 \sigma_x x} \exp \left[-\frac{1}{8 \sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x \exp(2 \sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \\ &\times \sum_{l=0}^{m-1} \frac{1}{l!} \left(\frac{m R_\gamma x}{\gamma'} \right)^l dx d\gamma'_i \end{aligned} \tag{3.291}$$

Fazendo $v = \ln[\gamma' \exp(2 \sigma^2) / \bar{\gamma}] / (2 \sigma)$ e $u = \ln[x \exp(2 \sigma_x^2) / \bar{x}] / (2 \sigma_x)$, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \exp \left(-\frac{v^2 + u^2}{2} \right) \\ &\times \exp \left[-\frac{R_\gamma \bar{x} \exp(2 \sigma_x u - 2 \sigma v)}{\bar{\gamma} \exp(2 \sigma_x^2 - 2 \sigma^2)} \right] \\ &\times \sum_{l=0}^{m-1} \frac{1}{l!} \left[\frac{m R_\gamma \bar{x} \exp(2 \sigma_x u - 2 \sigma v)}{\bar{\gamma} \exp(2 \sigma_x^2 - 2 \sigma^2)} \right]^l du dv \end{aligned} \tag{3.292}$$

Das Equações 3.263, 3.265 e 3.267, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \exp \left(-\frac{v^2 + u^2}{2} \right) \\ &\times \exp \left[-\frac{n \exp \left[\left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} u - 2 \sigma v \right]}{10^{\frac{Z}{10}} \exp \left[\frac{1}{2} \ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) \right] - 2 \sigma^2 \right]} \right] \\ &\times \sum_{l=0}^{m-1} \frac{1}{l!} \left[\frac{m n \exp \left[\left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} u - 2 \sigma v \right]}{10^{\frac{Z}{10}} \exp \left[\frac{1}{2} \ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4 \sigma_I^2 + \ln 2) \right] 2 \sigma_x^2 - 2 \sigma^2 \right]} \right]^l \\ &\times du dv \end{aligned} \tag{3.293}$$

onde Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que $m = 1$, ou seja, para o ambiente Suzuki/Suzuki, obtém-se, da Equação 3.293, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{v^2 + u^2}{2}\right) \\
 &\times \exp\left[-\frac{n \exp\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} u - 2\sigma v}{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right] - 2\sigma^2\right]} \right] \\
 &\times du dv
 \end{aligned} \tag{3.294}$$

A solução do Método U, dada pela Equação 3.294, coincide com a solução particular equivalente do Método S, dada pela Equação 3.268.

Assim, da Equação 3.293, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.48-3.51.

As curvas mostradas na Figura 3.48 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\sigma = \sigma_I = 1,5 \text{ Np}$.

As curvas mostradas na Figura 3.49 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. O desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e o desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $\sigma = \sigma_I$. Considera-se, ainda, $m = 3$.

As curvas mostradas na Figura 3.50 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $m = 3$ e $\sigma = 1,5 \text{ Np}$.

As curvas mostradas na Figura 3.51 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $m = 3$ e $\sigma_I = 1,5 \text{ Np}$.

3.12.2 Comentários e Conclusões

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi calculada em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, ou seja, em um ambiente

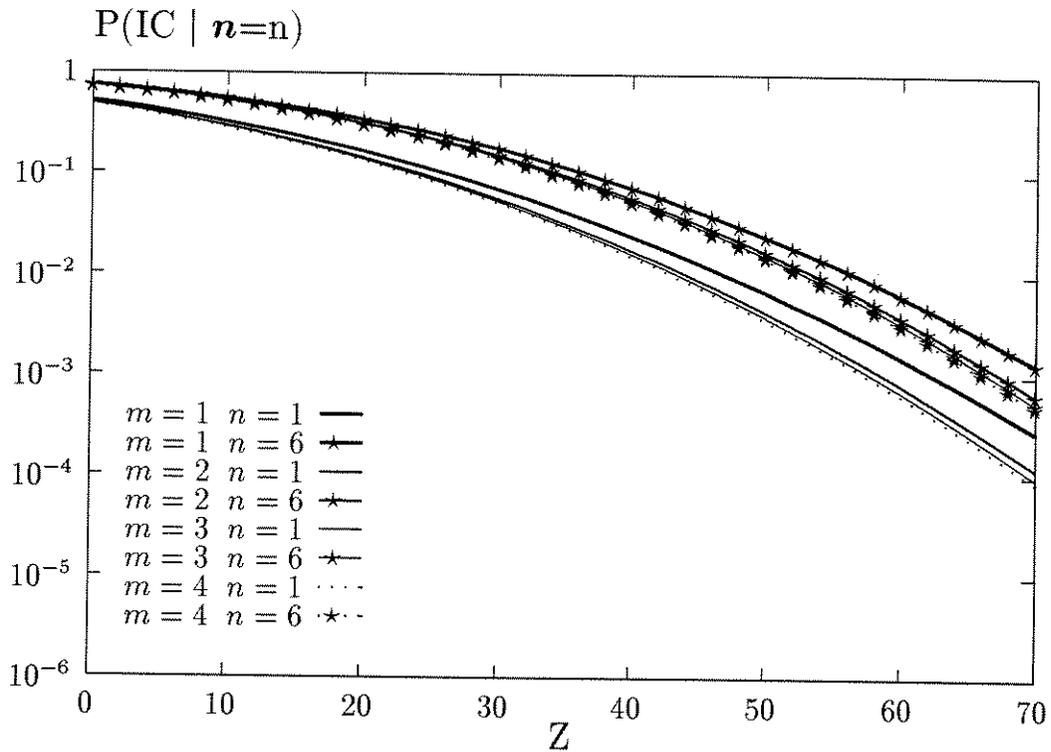


Figura 3.48: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma = \sigma_I = 1,5$ Np, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado - Método U.

no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Nakagami Sombreado e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki.

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki foi mostrado. O Método que foi mostrado pode também ser utilizado em ambiente Suzuki/Suzuki. Este método foi chamado, apenas a título de identificação, de Método U.

No Método U, consideram-se os sistemas de adição quadrática.

O Método U:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição

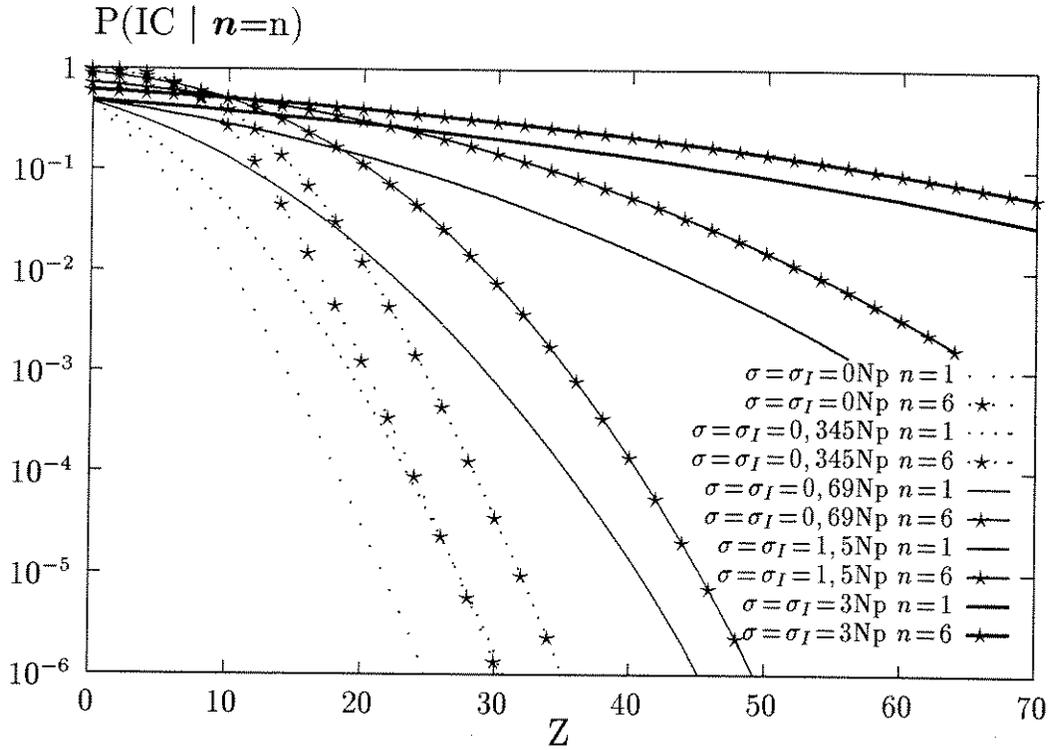


Figura 3.49: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $m = 3$, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método U.

quadrática, em um ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, a partir

- da Equação 3.286;
- da função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.285;
- de expressões aproximadas para as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.206;
- de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.287, e

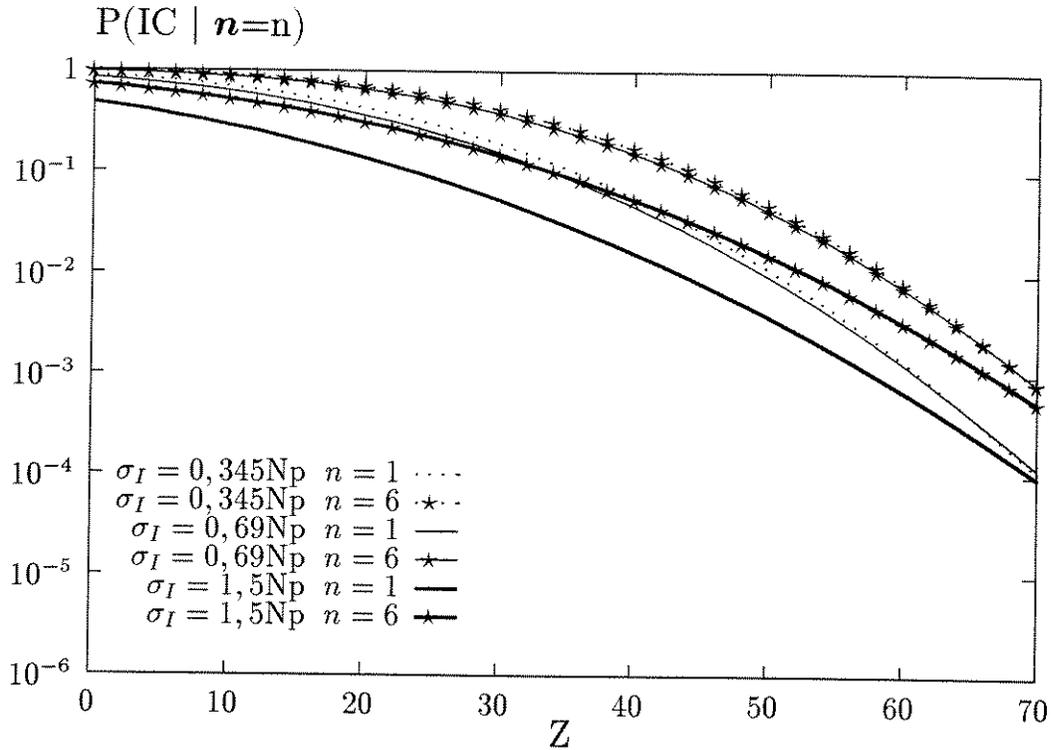


Figura 3.50: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $m = 3$ e $\sigma = 1,5 Np$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método U.

- de expressões aproximadas para a média e a variância da relação interferência total/ruído, α , dadas, respectivamente, pela Equação 3.288 e 3.289.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki:²⁷
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.293.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas nas Figura 3.48-3.51.

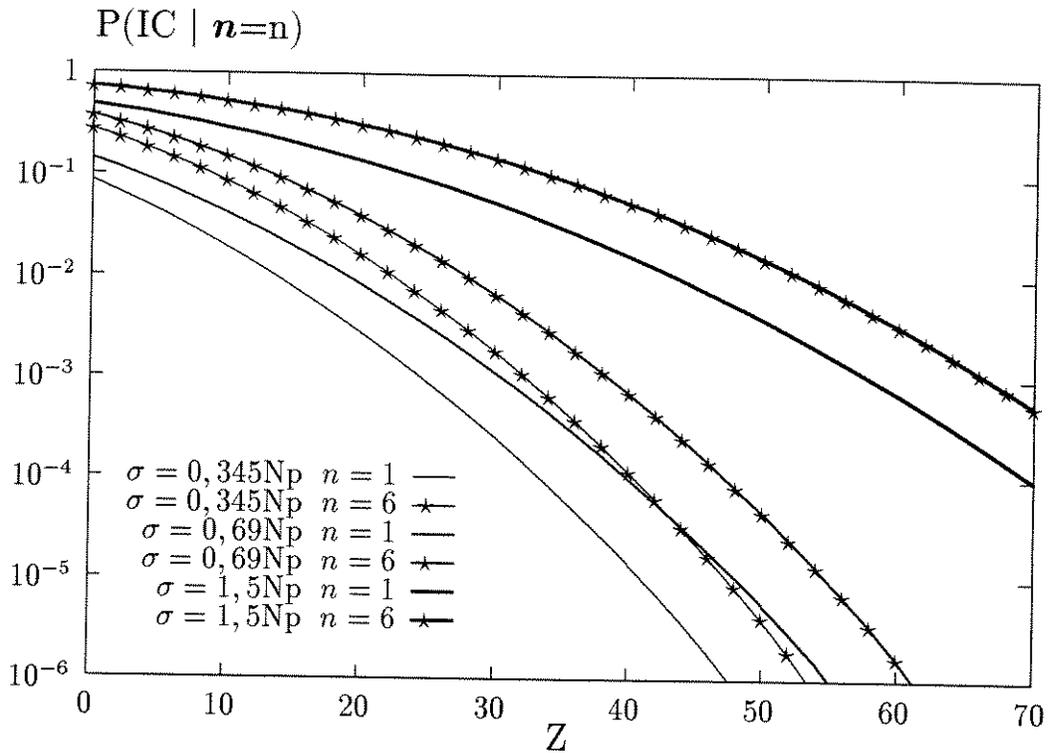


Figura 3.51: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $m = 3$ e $\sigma_I = 1,5 N_p$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado - Método U.

– Em ambiente Suzuki/Suzuki:

- * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.294.

Esta solução do Método U coincide com a solução do Método S.

Da Figura 3.48, observa-se que, para o ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes diminui com o aumento do parâmetro de desvanecimento do sinal desejado. Entretanto, percebe-se da comparação da Figura 3.41 (ou 3.44) com a Figura 3.51 que a influência do parâmetro de desvanecimento do sinal desejado diminui muito com o aumento do desvio

padrão de sombreamento. Assim, é interessante ressaltar que, em relação a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes ativos, o ambiente Suzuki/Suzuki é tanto mais crítico que o ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, quanto menor for desvio padrão de sombreamento das interferências. Ainda, da Figura 3.51, observa-se que, para o ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes sofre forte influência do desvio padrão de sombreamento do sinal desejado, aumentando consideravelmente com o aumento desvio padrão de sombreamento do sinal desejado. Da Figura 3.50, pode-se perceber que, para o ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes sofre influência do desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes, diminuindo com o aumento desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes. Conclui-se ainda que, para o ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, o desvio padrão de sombreamento do sinal desejado exerce maior influência sobre a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes que o desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes. Esta observação pode ser confirmada verificando-se, na Figura 3.49, que com o aumento igual e simultâneo dos desvios padrão de sombreamento do sinal desejado e dos sinais interferentes predomina a influência do desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e, portanto, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes aumenta.

- É contribuição deste trabalho de tese.

3.13 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rice Sombreado/Suzuki

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é calculada em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, ou seja, em um ambiente no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rice Sombreado e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki. É conveniente lembrar que a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice Sombreado/suzuki inclui

a análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Suzuki/Suzuki.

Dois métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice Sombreado/Suzuki são mostrados.⁴⁶ Estes métodos são chamados, apenas a título de identificação, de Método V e Método W.

No Método V e no Método W, consideram-se os sistemas de adição quadrática. Para o desenvolvimento destes métodos, é necessário notar que, para o ambiente Rice Sombreado/Suzuki:

- a relação sinal-desejado/ruído, γ , é modelada pela densidade composta Chi-quadrada não Central/Log-normal. Portanto, da Equação 2.358, aqui repetida por conveniência, tem-se

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{(1+k) \exp(-k)}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^{\infty} \frac{1}{(\gamma')^2} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\gamma'}\right] \times I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\gamma'}}\right] \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}}\right]\right]^2\right] d\gamma' \quad \gamma \geq 0 \quad (3.295)$$

onde γ' e $\bar{\gamma}$ são, respectivamente, a média local e a média na área da relação sinal-desejado/ruído, γ ; $var(\gamma) = \left[(2 + 4k + k^2) \exp(4\sigma^2) / (1 + k)^2 - 1\right] (\bar{\gamma})^2$ é a variância da relação sinal-desejado/ruído, γ , e σ é o desvio padrão de sombreamento, dado em neper, do sinal desejado.

- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são modeladas pela densidade dada pela Equação 3.198.

Para o caso particular em que $k = 0$, a densidade composta Chi-quadrada não Central, dada pela Equação 3.295, degenera-se para a densidade dada pela Equação 3.248, ou seja, tem-se um ambiente no qual tanto o sinal desejado quanto os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki/Suzuki.

3.13.1 Método V

Um método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice Sombreado/Suzuki, é obtido a partir da Equação 3.43, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^{\infty} f_{\mathbf{x}}(x) \int_0^{R_{\gamma} x} f_{\gamma}(\gamma) d\gamma dx \quad (3.296)$$

⁴⁶Estes dois métodos podem, portanto, ser utilizados em ambiente Suzuki/Suzuki, sendo necessário apenas utilizar valor adequado para o fator de Rice do sinal desejado.

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

As funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.198, podem ser aproximadas por densidades dadas pela Equação 3.206.

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.206;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$, e portanto, $\{\sigma_{i_a} = \sigma_{I_a} : i = 1, \dots, n\}$;

obtém-se uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.208, aqui repetida por conveniência,

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln\left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}}\right]\right]^2\right] \quad x \geq 0 \quad (3.297)$$

onde

$$\bar{x} = n \bar{\gamma}_I \quad (3.298)$$

e

$$\text{var}(\mathbf{x}) = n \left[\exp(4\sigma_I^2 + \ln 2) - 1 \right] (\bar{\gamma}_I)^2 \quad (3.299)$$

Obtém-se também

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.300)$$

Assim, das Equações 3.295, 3.296 e 3.297, obtém-se

$$\begin{aligned} P(IC | \mathbf{n} = n) &= \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln\left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}}\right]\right]^2\right] \\ &\times \int_0^{R_\gamma x} \frac{(1+k) \exp(-k)}{\sqrt{2\pi} 2\sigma} \int_0^\infty \frac{1}{(\gamma')^2} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\gamma'}\right] I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\gamma'}}\right] \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}}\right]\right]^2\right] d\gamma' d\gamma dx \end{aligned} \quad (3.301)$$

Da Equação 3.168, obtém-se

$$\int_0^{R_\gamma x} \frac{(1+k)}{\gamma'} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\gamma'}\right] \exp(-k) I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\gamma'}}\right] d\gamma =$$

$$1 - \exp(-k) \exp\left[-\frac{R_\gamma x(1+k)}{\gamma'}\right] \sum_{l=0}^{\infty} \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma x(1+k)}{\gamma'}\right]^m \quad (3.302)$$

Das Equações 3.301 e 3.302, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x x} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln\left[\frac{x \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}}\right]\right]^2\right]$$

$$\times \exp(-k) \int_0^\infty \exp\left[-\frac{R_\gamma x(1+k)}{\gamma'}\right] \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \gamma'}$$

$$\times \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}}\right]\right]^2\right]$$

$$\times \sum_{l=0}^{\infty} \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma x(1+k)}{\gamma'}\right]^m d\gamma' dx \quad (3.303)$$

Fazendo $v = \ln[\gamma' \exp(2\sigma^2) / \bar{\gamma}] / (2\sigma)$ e $u = \ln[x \exp(2\sigma_x^2) / \bar{x}] / (2\sigma_x)$, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{\exp(-k)}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \exp\left(-\frac{v^2 + u^2}{2}\right)$$

$$\times \exp\left[-\frac{R_\gamma \bar{x}(1+k) \exp(2\sigma_x u - 2\sigma v)}{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2 - 2\sigma^2)}\right]$$

$$\times \sum_{l=0}^{\infty} \frac{k^l}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \left[\frac{R_\gamma x(1+k) \exp(2\sigma_x u - 2\sigma v)}{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2 - 2\sigma^2)}\right]^m du dv \quad (3.304)$$

Das Equações 3.263, 3.265 e 3.267, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \frac{\exp\left(-10\frac{K}{10}\right)}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \exp\left(-\frac{v^2 + u^2}{2}\right)$$

$$\times \exp\left[-\frac{n(1+10\frac{K}{10}) \exp\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_l^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} u - 2\sigma v}{10\frac{Z}{10} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_l^2 + \ln 2)\right] - 2\sigma^2\right]}\right]$$

$$\times \sum_{l=0}^{\infty} \frac{10\frac{lZ}{10}}{l!} \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!}$$

$$\times \left[\frac{n(1+10\frac{K}{10}) \exp\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_l^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} u - 2\sigma v}{10\frac{Z}{10} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_l^2 + \ln 2)\right] - 2\sigma^2\right]}\right]^m$$

$$\times du dv \quad (3.305)$$

onde K é o fator de Rice, dado em decibéis, e Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que $k = 0$, ou seja, para o ambiente Suzuki/Suzuki, obtém-se, da Equação 3.305, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes dada por

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{v^2 + u^2}{2}\right) \\
 &\times \exp\left[\frac{n \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} u - 2\sigma v\right]}{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right] - 2\sigma^2\right]}\right] \\
 &\times du dv
 \end{aligned} \tag{3.306}$$

A solução do Método V, dada pela Equação 3.306, coincide com a solução do Método S, dada pela Equação 3.268.

Assim, da Equação 3.305, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.52-3.55.

As curvas mostradas na Figura 3.52 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\sigma = \sigma_I = 1,5$ Np.

As curvas mostradas na Figura 3.53 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. O desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e o desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $\sigma = \sigma_I$. Considera-se, ainda, $K = 6,48$ dB.

As curvas mostradas na Figura 3.54 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $K = 6,48$ dB e $\sigma = 1,5$ Np.

As curvas mostradas na Figura 3.55 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $K = 6,48$ dB e $\sigma_I = 1,5$ Np.

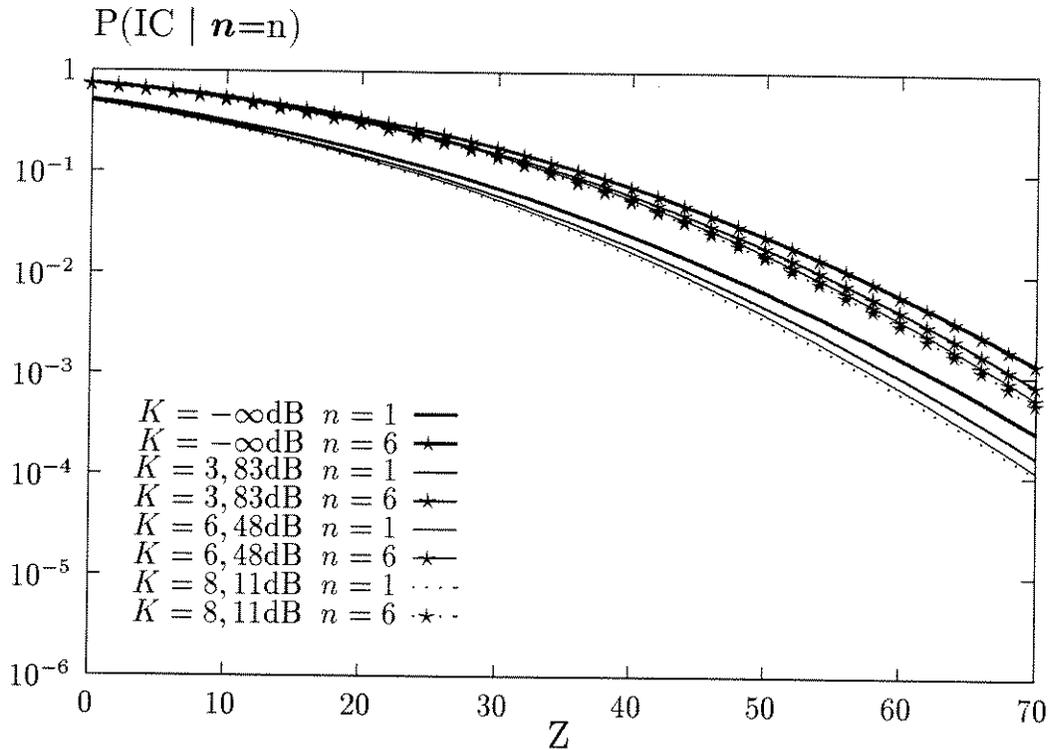


Figura 3.52: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma = \sigma_I = 1,5$ Np, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado - Método V.

3.13.2 Método W

Um outro método de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice/Suzuki, é obtido a partir da Equação 3.44, aqui repetida por conveniência,

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \int_0^\infty f_\gamma(\gamma) \int_{\frac{\gamma}{R_\gamma}}^\infty f_{\mathbf{x}}(x) dx d\gamma \quad (3.307)$$

onde R_γ é a razão de proteção para a relação sinal/ruído, $f_\gamma(\gamma)$ é a função densidade de probabilidade da relação sinal-desejado/ruído, γ , e $f_{\mathbf{x}}(x)$ é a função densidade de probabilidade da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} .

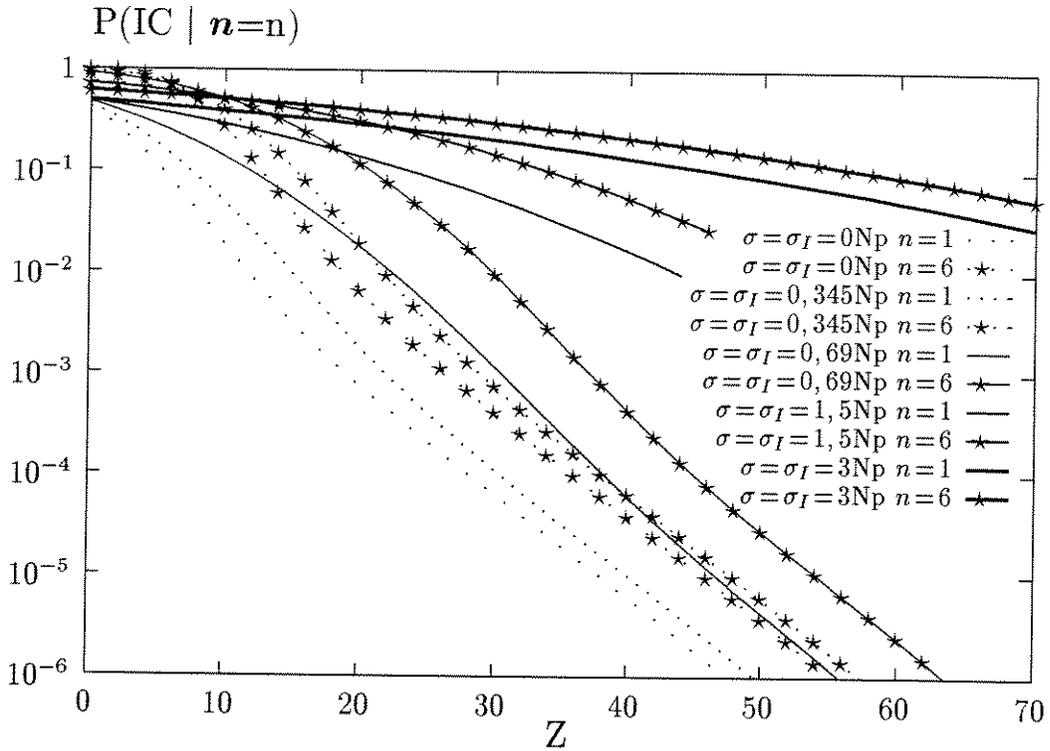


Figura 3.53: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $K = 6,48$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método V.

Considerando que:

- as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são dadas pela Equação 3.198;
- para sistemas de adição quadrática, a relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , é dada pela Equação 3.7;
- as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$ e $\{\sigma_i = \sigma_I : i = 1, \dots, n\}$;

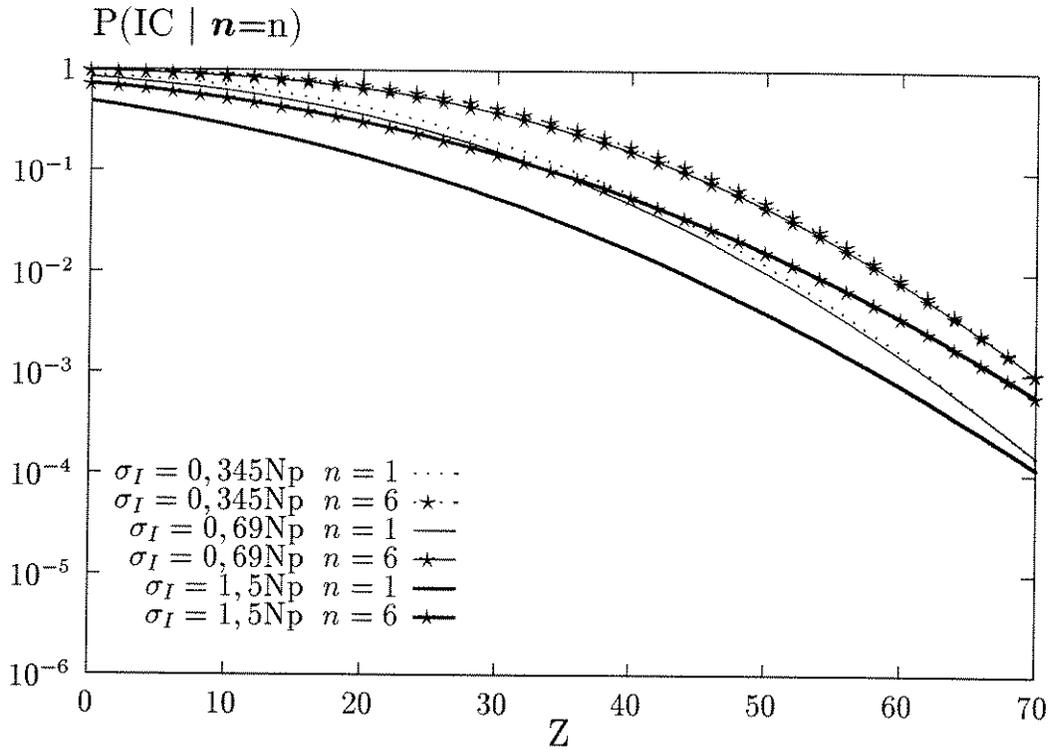


Figura 3.54: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $K = 6,48$ dB e $\sigma = 1,5$ Np, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método V.

obtem-se uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.237, aqui repetida por conveniência,

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}2\sigma_x} \int_0^\infty \frac{1}{(x')^2} \exp\left(-\frac{x}{x'}\right) \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln\left[\frac{x' \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}}\right]\right]^2\right] dx' \quad x \geq 0 \quad (3.308)$$

onde

$$\bar{x} = n\bar{\gamma}_I \quad (3.309)$$

e

$$var(\mathbf{x}) = [\exp(4\sigma_x^2) - 1] (\bar{x})^2 = n [\exp(4\sigma_I^2) - 1] (\bar{\gamma}_I)^2 \quad (3.310)$$

Obtém-se também

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \left[\ln \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2) \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.311)$$

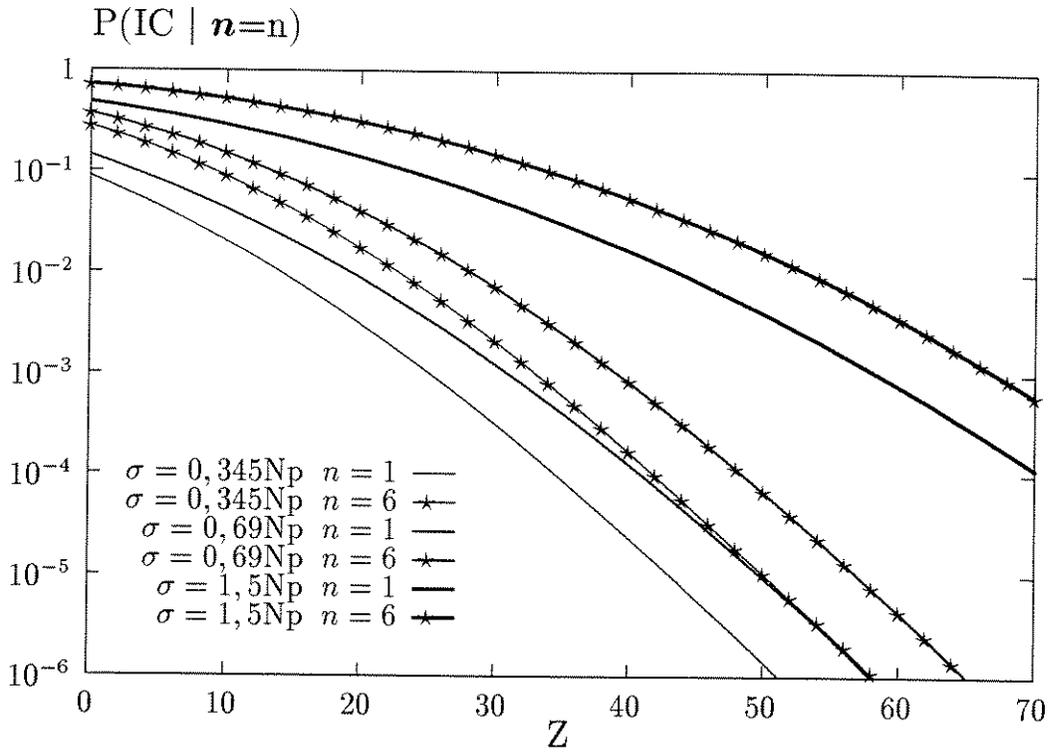


Figura 3.55: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $K = 6,48$ dB e $\sigma_I = 1,5$ Np, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado - Método V.

Das Equações 3.307 e 3.308, obtém-se

$$\begin{aligned}
 P(IC | n = n) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x} \int_0^\infty \frac{1}{x'} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln \left[\frac{x' \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}} \right] \right]^2 \right] \\
 &\times \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \gamma'} \exp \left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln \left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}} \right] \right]^2 \right] \\
 &\times \int_0^\infty \exp \left(-\frac{\gamma}{R_\gamma x'} \right) \frac{(1+k)}{\gamma'} \exp \left[-\frac{\gamma(1+k)}{\gamma'} \right] \exp(-k) \\
 &\times I_0 \left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\gamma'}} \right] d\gamma d\gamma' dx' \tag{3.312}
 \end{aligned}$$

Da Equação 3.243, tem-se

$$\int_0^\infty \exp\left(-\frac{\gamma}{R_\gamma x'}\right) \frac{(1+k)}{\gamma'} \exp\left[-\frac{\gamma(1+k)}{\gamma'}\right] \exp(-k) I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma k(1+k)}{\gamma'}}\right] d\gamma = \left[\frac{1}{\frac{\gamma'}{R_\gamma x'(1+k)} + 1}\right] \exp\left[-\frac{k\gamma'}{R_\gamma x'(1+k)} \frac{1}{\frac{\gamma'}{R_\gamma x'(1+k)} + 1}\right] \quad (3.313)$$

Das Equações 3.312 e 3.313, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma_x} \int_0^\infty \frac{1}{x'} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} \left[\ln\left[\frac{x' \exp(2\sigma_x^2)}{\bar{x}}\right]\right]^2\right] \times \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} 2\sigma \gamma'} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \left[\ln\left[\frac{\gamma' \exp(2\sigma^2)}{\bar{\gamma}}\right]\right]^2\right] \times \left[\frac{1}{\frac{\gamma'}{R_\gamma x'(1+k)} + 1}\right] \exp\left[-\frac{k\gamma'}{R_\gamma x'(1+k)} \frac{1}{\frac{\gamma'}{R_\gamma x'(1+k)} + 1}\right] d\gamma' dx' \quad (3.314)$$

Fazendo $v = \ln[\gamma' \exp(2\sigma^2) / \bar{\gamma}] / (2\sigma)$ e $u = \ln[x' \exp(2\sigma_x^2) / \bar{x}] / (2\sigma_x)$, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \exp\left(-\frac{v^2 + u^2}{2}\right) \left[\frac{1}{\frac{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2 - 2\sigma^2)}{R_\gamma \bar{x}(1+k) \exp(2\sigma_x u - 2\sigma v)} + 1}\right] \times \exp\left[-\frac{\frac{k\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2 - 2\sigma^2)}{R_\gamma \bar{x}(1+k) \exp(2\sigma_x u - 2\sigma v)}}{\frac{\bar{\gamma} \exp(2\sigma_x^2 - 2\sigma^2)}{R_\gamma \bar{x}(1+k) \exp(2\sigma_x u - 2\sigma v)} + 1}\right] du dv \quad (3.315)$$

Das Equações 3.309, 3.311 e 3.315, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \exp\left(-\frac{v^2 + u^2}{2}\right) \left[\frac{1}{\frac{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right] - 2\sigma^2}{n \left(1 + 10^{\frac{K}{10}}\right) \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} u - 2\sigma v\right]} + 1}\right] \times \exp\left[-\frac{\frac{10^{\frac{K+Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right] - 2\sigma^2}{n \left(1 + 10^{\frac{K}{10}}\right) \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} u - 2\sigma v\right]}}{\frac{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right] - 2\sigma^2}{n \left(1 + 10^{\frac{K}{10}}\right) \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} u - 2\sigma v\right]} + 1}\right] du dv \quad (3.316)$$

onde K é o fator de Rice, dado em decibéis, e Z é a margem, dada em decibéis, dada pela Equação 3.76.

Para o caso particular em que $k = 0$, ou seja, para o ambiente Suzuki/Suzuki, obtém-se, da Equação 3.316, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao

número, n , de interferências existentes dada por

$$P(IC | n = n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{v^2 + u^2}{2}\right) \times \left[\frac{1}{\frac{10^{\frac{Z}{10}} \exp\left[\frac{1}{2} \ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right] - 2\sigma^2}{n \exp\left[\left[\ln\left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \exp(4\sigma_I^2 + \ln 2)\right]\right]^{\frac{1}{2}} u - 2\sigma v\right]} + 1} \right] du dv \quad (3.317)$$

Assim, da Equação 3.316, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.56-3.59.

As curvas mostradas na Figura 3.56 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\sigma = \sigma_I = 1,5$ Np.

As curvas mostradas na Figura 3.57 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. O desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e o desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $\sigma = \sigma_I$. Considera-se, ainda, $K = 6,48$ dB.

As curvas mostradas na Figura 3.58 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $K = 6,48$ dB e $\sigma = 1,5$ Np.

As curvas mostradas na Figura 3.59 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $K = 6,48$ dB e $\sigma_I = 1,5$ Np.

Assim, da Equação 3.317, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostradas nas Figuras 3.42-3.44.

As curvas mostradas na Figura 3.60 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. O desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e o desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes

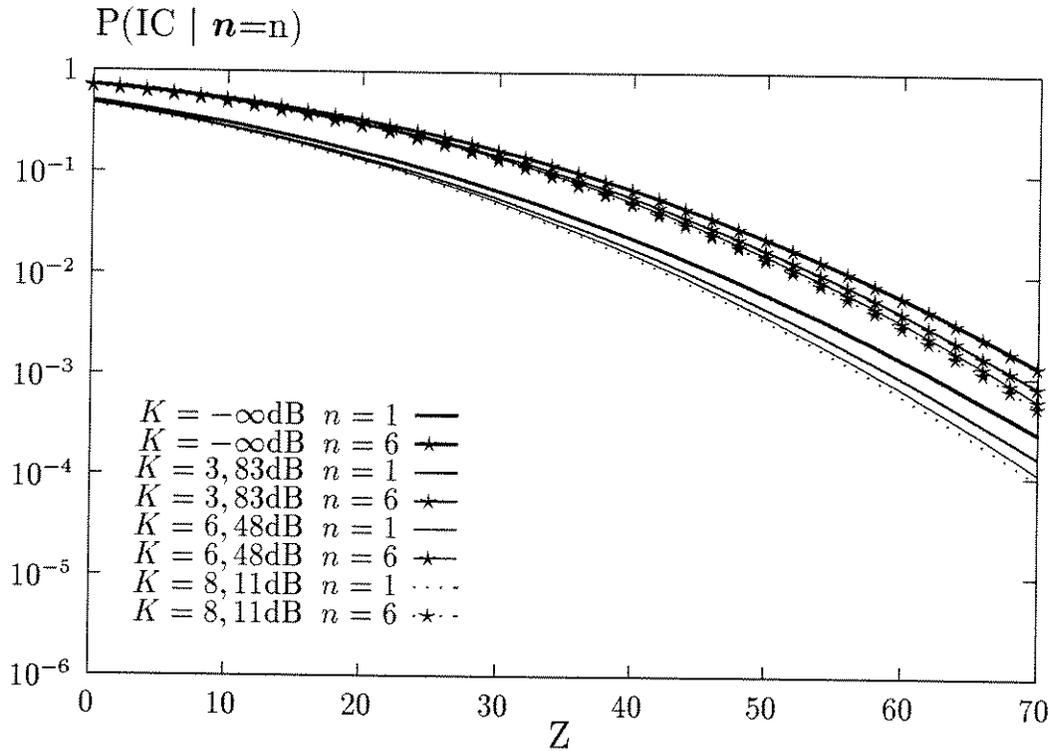


Figura 3.56: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma = \sigma_I = 1,5$ Np, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o fator de Rice, K , dado em decibéis, do sinal desejado - Método W.

são considerados como sendo idênticos, ou seja, $\sigma = \sigma_I$.

As curvas mostradas na Figura 3.61 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $\sigma = 1,5$ Np.

As curvas mostradas na Figura 3.62 têm como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\sigma_I = 1,5$ Np.

3.13.3 Comentários e Conclusões

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi calculada em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, ou seja, em um ambiente

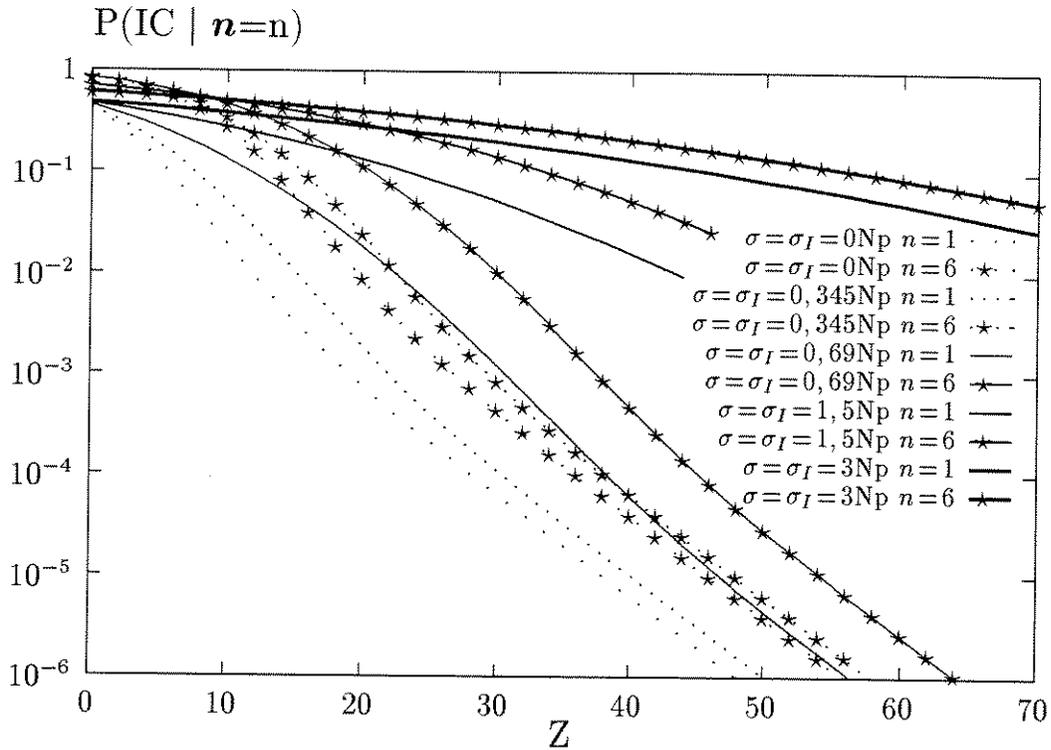


Figura 3.57: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $K = 6,48$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método W.

no qual o sinal desejado sofre desvanecimento Rice Sombreado e os sinais interferentes sofrem desvanecimento Suzuki.

Dois métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice Sombreado/Suzuki foram mostrados. Os métodos que foram mostrados podem também ser utilizados em ambiente Suzuki/Suzuki. Estes métodos foram chamados, apenas a título de identificação, de Método V e Método W.

No Método V e no método W, consideram-se os sistemas de adição quadrática.

O Método V:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência coca-

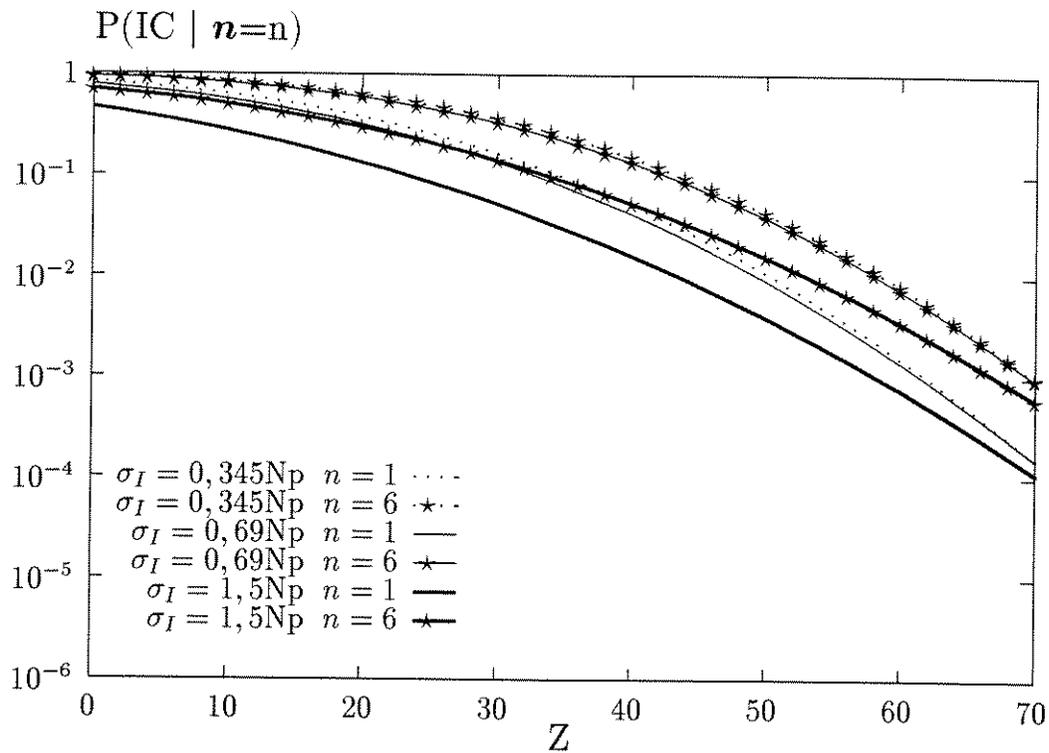


Figura 3.58: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $K = 6,48$ dB e $\sigma = 1,5$ Np, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método V.

nal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice Sombreado/Suzuki, a partir

- da Equação 3.296.
- da função densidade de probabilidade, $f_\gamma(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.295.
- de expressões aproximadas para as funções densidade de probabilidade, $\{f_{\gamma_i}(\gamma_i) : i = 1, \dots, n\}$, das relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dadas pela Equação 3.206.
- de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.297.

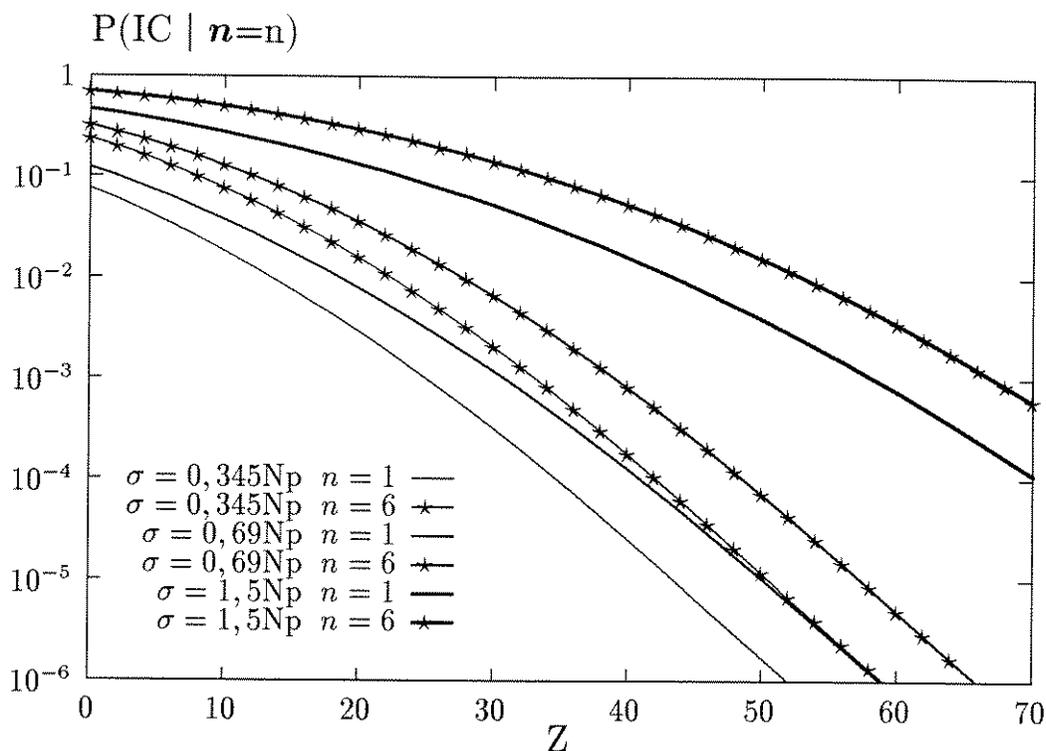


Figura 3.59: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Rice Sombreado/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $K = 6,48$ dB e $\sigma_I = 1,5$ Np, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreado, σ , dado em neper, do sinal desejado - Método W.

- de expressões aproximadas para a média e a variância da relação interferência total/ruído, \mathbf{x} , dadas, respectivamente, pela Equação 3.298 e 3.299.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Em ambiente Rice Sombreado/Suzuki:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.305.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas nas Figura 3.52-3.55.

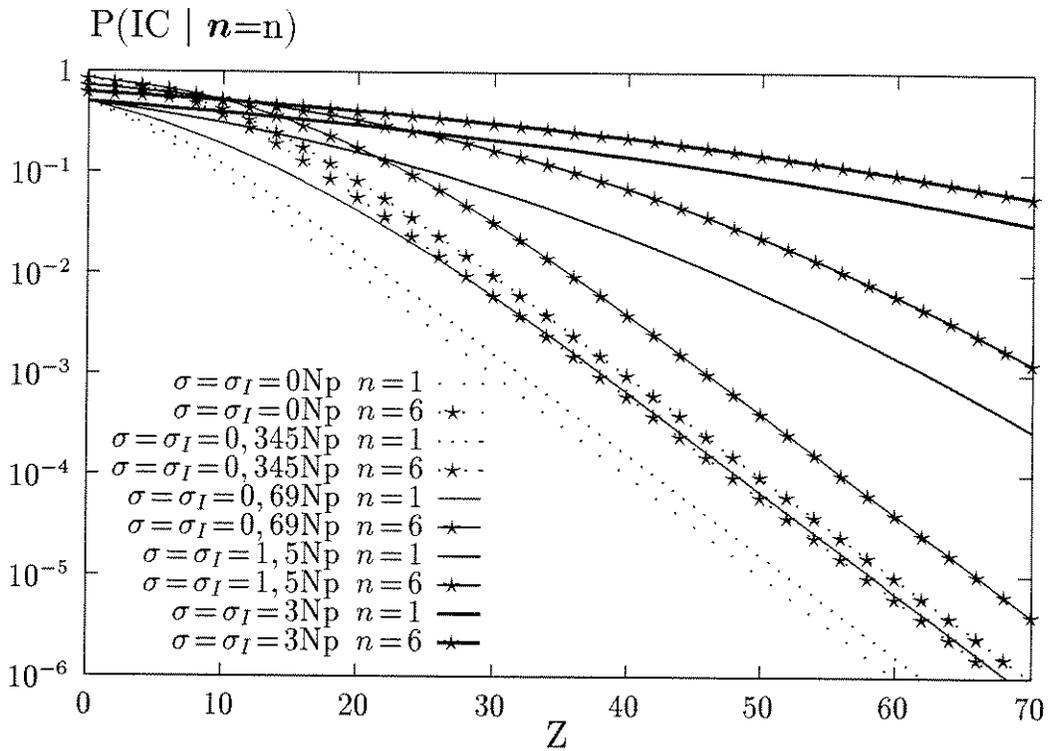


Figura 3.60: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado, e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método W.

– Em ambiente Suzuki/Suzuki:

- * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.306.

Esta solução do Método V coincide com a solução do Método S.

Da Figura 3.52, observa-se que, para o ambiente Rice Sombreado/Suzuki, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes diminui com o aumento do fator de Rice do sinal desejado. Entretanto, percebe-se da comparação da Figura 3.41 (ou 3.44) com a Figura 3.55 que a influência do fator de Rice do sinal

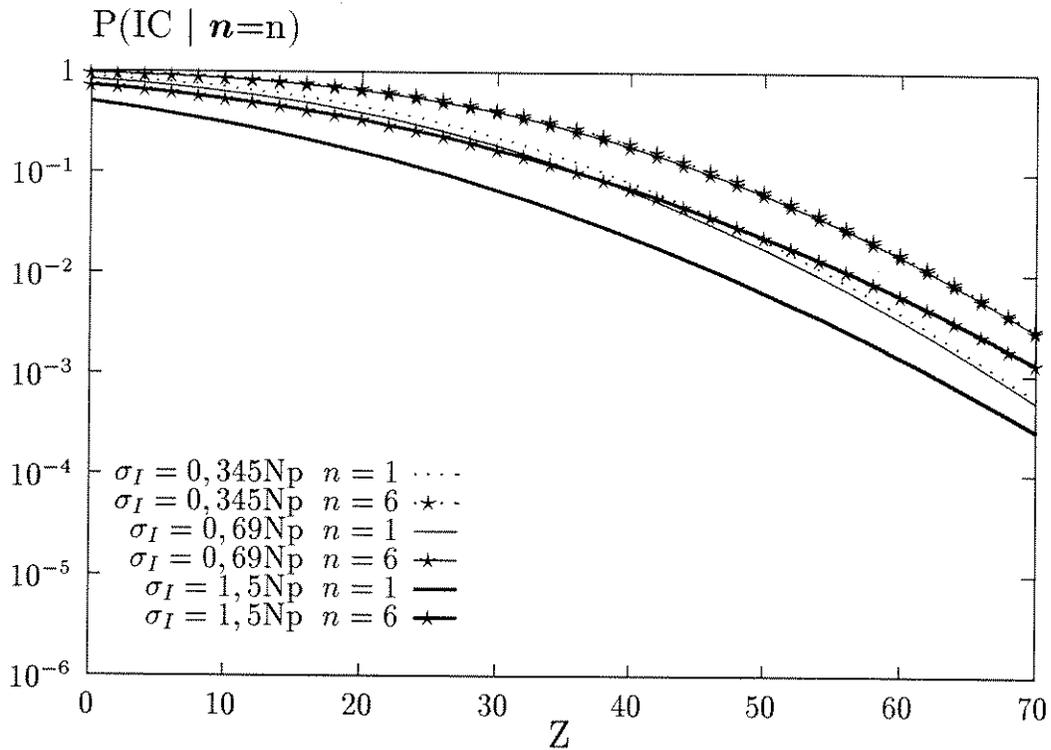


Figura 3.61: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma = 1,5 Np$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ_I , dado em neper, dos sinais interferentes - Método W.

desejado diminui muito com o aumento do desvio padrão de sombreamento. Assim, é interessante ressaltar que, em relação a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes ativos, o ambiente Suzuki/Suzuki é tanto mais crítico que o ambiente Rice Sombreado/Suzuki, quanto menor for desvio padrão de sombreamento das interferências. Ainda, da Figura 3.55, observa-se que, para o ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes sofre forte influência do desvio padrão de sombreamento do sinal desejado, aumentando consideravelmente com o aumento desvio padrão de sombreamento do sinal desejado. Da Figura 3.54, pode-se perceber que, para o ambiente Rice Sombreado/Suzuki, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes sofre influência do desvio padrão de sombreamento dos sinais

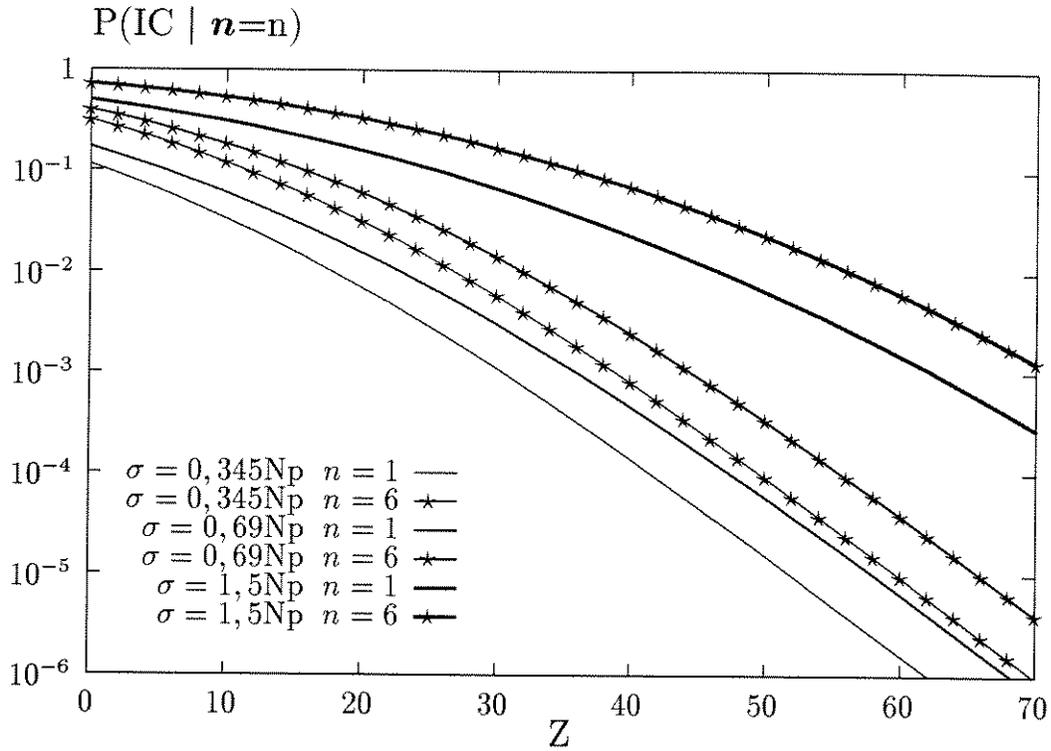


Figura 3.62: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, em ambiente Suzuki/Suzuki, em função da margem, Z , dada em decibéis, para $\sigma_I = 1,5 N_p$, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes e o desvio padrão de sombreamento, σ , dado em neper, do sinal desejado - Método W.

interferentes, diminuindo com o aumento desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes. Conclui-se ainda que, para o ambiente Rice Sombreado/Suzuki, o desvio padrão de sombreamento do sinal desejado exerce maior influência sobre a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes que o desvio padrão de sombreamento dos sinais interferentes. Esta observação pode ser confirmada verificando-se, na Figura 3.53, que com igual aumento dos desvios padrão de sombreamento do sinal desejado e dos sinais interferentes predomina a influência do desvio padrão de sombreamento do sinal desejado e, portanto, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes aumenta.

- É contribuição deste trabalho de tese.

O Método W:

- É um método aproximado, no qual calcula-se a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os sistemas de adição quadrática, em um ambiente Rice Sombreado/Suzuki, a partir
 - da Equação 3.307.
 - da função densidade de probabilidade, $f_{\gamma}(\gamma)$, da relação sinal-desejado/ruído, γ , dada pela Equação 3.295.
 - de uma expressão aproximada para a função densidade de probabilidade, $f_{\mathbf{x}}(x)$, da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dada pela Equação 3.308.
 - de expressões aproximadas para a média e a variância da relação interferência-total/ruído, \mathbf{x} , dadas, respectivamente, pela Equação 3.309 e 3.310.
- Apresenta as seguintes soluções para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes:
 - Em ambiente Rice Sombreado/Suzuki:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.316.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas na Figura 3.56-3.59.

- Em ambiente Suzuki/Suzuki:
 - * Desprezando-se a mínima relação sinal-desejado/ruído, γ_0 , necessária à recepção adequada do sinal desejado, e considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, são variáveis aleatórias igualmente distribuídas - dada pela Equação 3.317.

A partir desta solução foram obtidas as curvas mostradas nas Figuras 3.60-3.62.

Os resultados mostrados nas Figuras 3.56-3.59 são semelhantes aos resultados particulares equivalentes do Método V, mostrados nas Figuras 3.52-3.55, e os resultados mostrados nas Figuras 3.60-3.62 são semelhantes aos resultados particulares equivalentes do Método R, mostrados nas Figuras 3.39-3.41.

- Foi publicado previamente [11].

3.14 Probabilidade de Interferência Cocanal Total e o Ambiente de Rádio Móvel

Para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, em qualquer um dos ambientes de rádio móvel, é necessário obter a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e descondicioná-la fazendo uso da Equação 3.12 (ou da Equação 3.16) e das Equações 3.13 e 3.14.

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes foi exaustivamente avaliada para diversos ambientes de rádio móvel. Avalia-se, então, a título de exemplo e fazendo uso do Método G, a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh. O cálculo da probabilidade de interferência cocanal total a partir dos resultados obtidos no Método G apresenta uma modelagem elegante e inclui a modelagem de três ambientes de rádio móvel, por este motivo foi escolhido.

3.14.1 Probabilidade de Interferência Cocanal Total em Ambiente Nakagami/Nakagami

A probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, em ambiente Nakagami/Nakagami, obtida a partir das Equações 3.13, 3.14, 3.16 e 3.142, é dada por

$$P(IC) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{\Gamma(m + \mu n)}{\Gamma(m) \Gamma(\mu n)} \int_0^{\frac{m}{m + \mu 10^{\frac{Z}{10}}}} u^{m-1} (1-u)^{\mu n-1} du \right] \binom{N}{n} B_c^{\frac{n}{N_c}} \left(1 - B_c^{\frac{1}{N_c}}\right)^{N-n} \quad (3.318)$$

Assim, da Equação 3.318, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes, mostradas na Figura 3.63. O grau de desvanecimento do sinal desejado e o grau de desvanecimento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $m = \mu$. Consideram-se, ainda, apenas as seis cocélulas mais próximas, ou seja, $N = 6$. Considera-se também $N_c = 6$ canais/célula e $B_c = 0,052$.⁴⁷

⁴⁷O que corresponde (considerando $N_c = 6$ canais/célula) a um sistema de rádio móvel com tráfego de 3 Erl/célula.

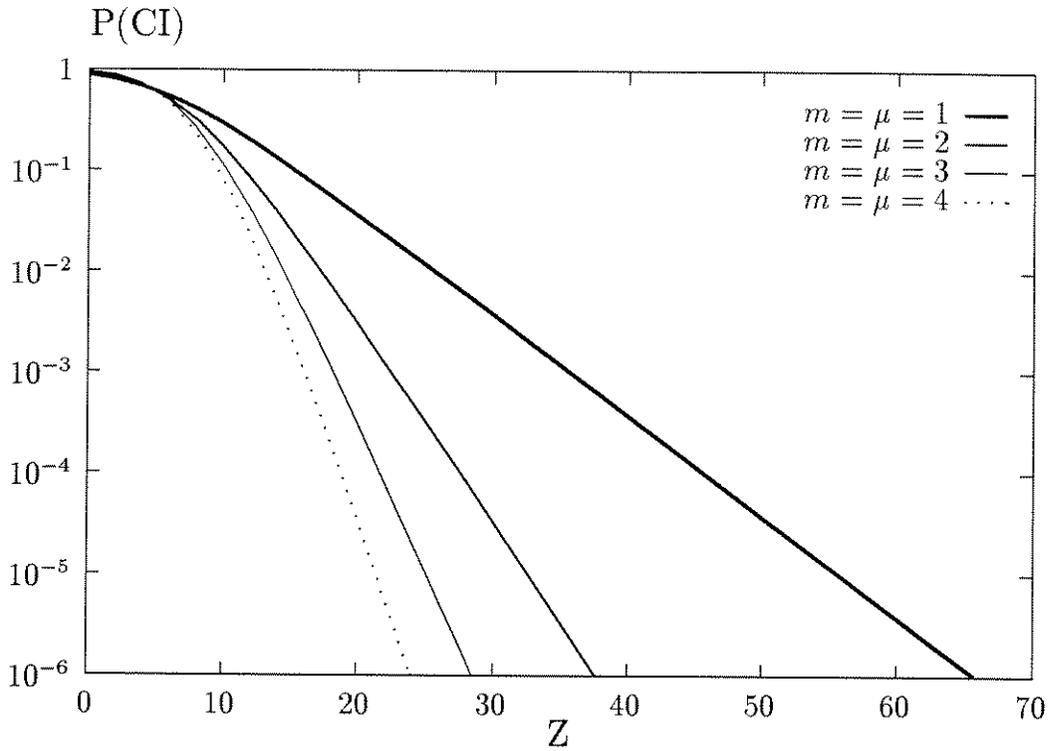


Figura 3.63: Probabilidade de interferência cocanal total, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetros o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes.

3.14.2 Probabilidade de Interferência Cocanal Total em Ambiente Nakagami/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, em ambiente Nakagami/Rayleigh, obtida a partir das Equações 3.13, 3.14, 3.16 e 3.143, é dada por

$$P(IC) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{\Gamma(m+n)}{\Gamma(m)\Gamma(n)} \int_0^{\frac{m}{m+10^{\frac{Z}{10}}}} u^{m-1} (1-u)^{n-1} du \right] \binom{N}{n} B_c^{\frac{n}{N_c}} \left(1 - B_c^{\frac{1}{N_c}}\right)^{N-n} \quad (3.319)$$

Da Equação 3.319, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, mostradas na Figura 3.64. Consideram-se, ainda, apenas as seis cocélulas mais próximas, ou seja, $N = 6$. Considera-se também $N_c = 6$ canais/célula e $B_c = 0,052$.⁴⁷

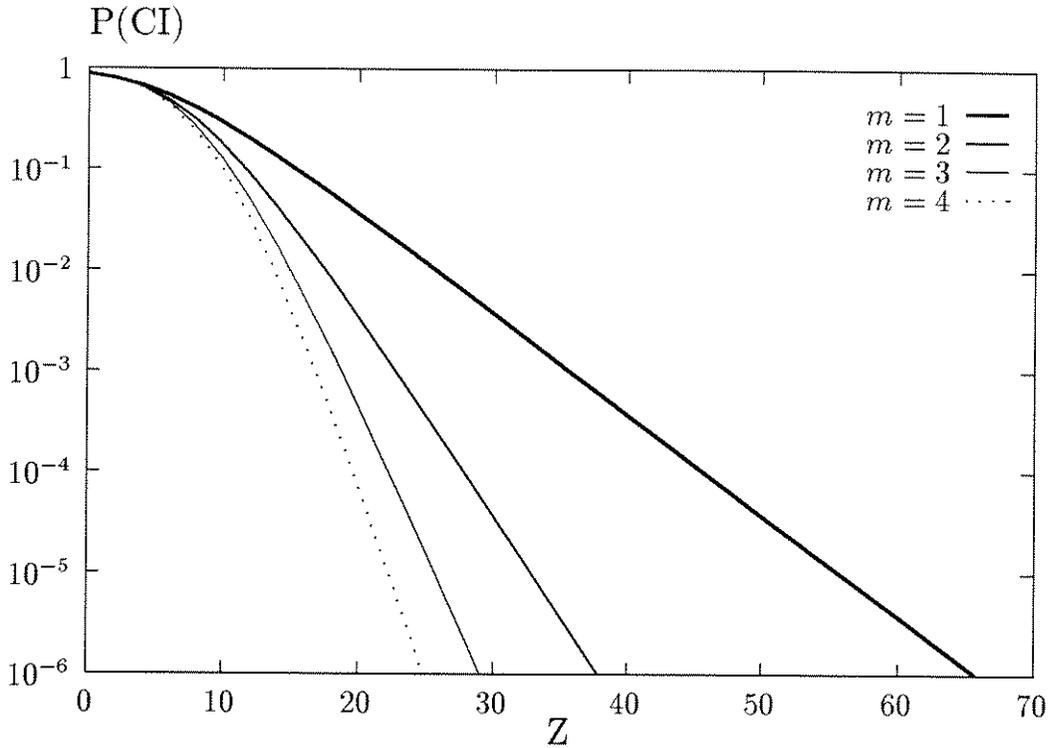


Figura 3.64: Probabilidade de interferência cocanal total, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado.

3.14.3 Probabilidade de Interferência Cocanal Total em Ambiente Rayleigh/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtida a partir das Equações 3.13, 3.14, 3.16 e 3.144, é dada por

$$P(IC) = \sum_{n=1}^N \left[1 - \left[\frac{10^{\frac{Z}{10}}}{1 + 10^{\frac{Z}{10}}} \right]^n \right] \binom{N}{n} B_c^{\frac{n}{N_c}} \left(1 - B_c^{\frac{1}{N_c}} \right)^{N-n} \quad (3.320)$$

Assim, da Equação 3.320, foi obtida a curva para a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, em função da margem, Z , dada em decibéis, mostrada na Figura 3.65. Consideram-se, ainda, apenas as seis cocélulas mais próximas, ou seja, $N = 6$. Considera-se também $N_c = 6$ canais/célula e $B_c = 0,052$.⁴⁷

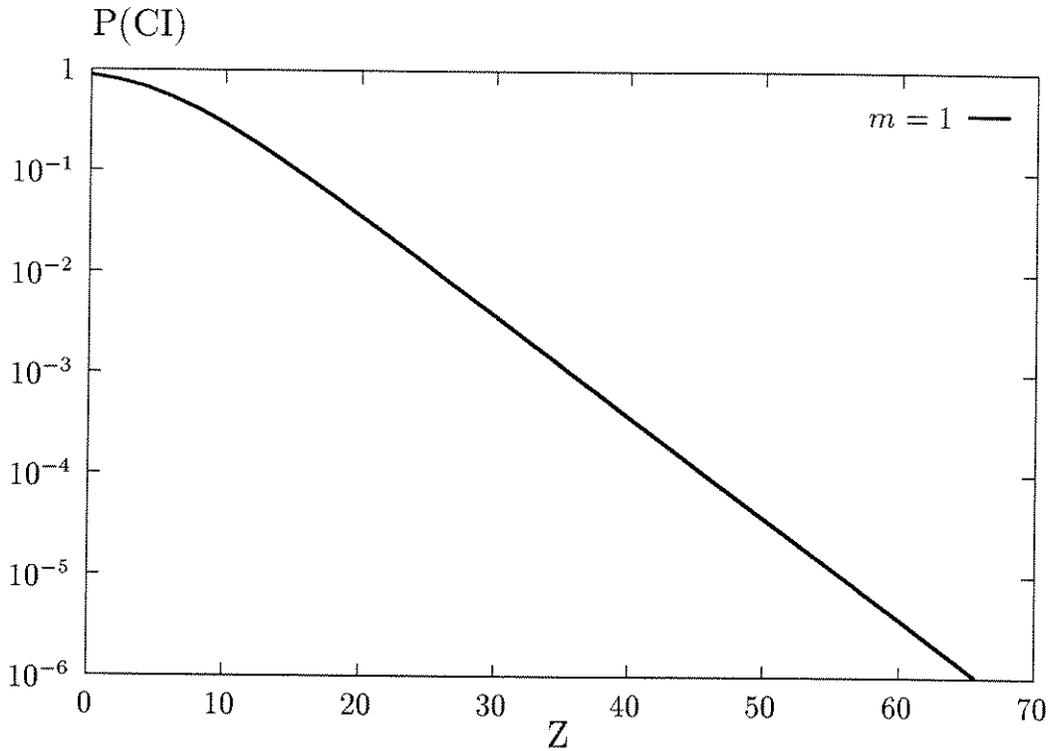


Figura 3.65: Probabilidade de interferência cocanal total, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da margem, Z , dada em decibéis.

3.14.4 Comentários e Conclusões

Avaliou-se, a título de exemplo e fazendo uso do Método G, a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh. O cálculo da probabilidade de interferência cocanal total a partir dos resultados obtidos no Método G apresenta uma modelagem elegante e inclui a modelagem de três ambientes de rádio móvel, por este motivo foi escolhido. Assim, foram obtidas as curvas mostradas nas Figuras 3.63-3.65. Nota-se, ainda, que as conclusões obtidas a partir dos resultados da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes são também válidas para a probabilidade de interferência cocanal total, para qualquer ambiente de rádio móvel.⁴⁸

⁴⁸É trivial observar que não são válidas as conclusões que se referem ao número de sinais interferentes existentes.

3.15 Conclusão

A análise da interferência cocanal foi feita por métodos estatísticos, para privilegiar a variabilidade do sinal de rádio móvel. Foram mostradas duas definições análogas de interferência cocanal chamadas, apenas a título de identificação, a Definição A e a Definição B. A Definição A é mais indicada para os sistemas de adição linear, por se utilizar da envoltória, y , da interferência total. A Definição B é mais indicada para sistemas de adição quadrática, por se utilizar da relação interferência-total/ruído, x . Foi feita, a seguir, uma análise do equacionamento probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes para os sistemas de adição linear e para os sistemas de adição quadrática. Ainda, foi feita uma exaustiva análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes nos ambientes: Rayleigh/Rayleigh, Nakagami/Rayleigh, Nakagami/Nakagami, Rice/Rayleigh, Rice/Rice, Rayleigh/Suzuki, Nakagami/Suzuki, Rice/Suzuki, Suzuki/Suzuki, Nakagami Sombreado/Suzuki e Rice Sombreado/Suzuki. As conclusões obtidas foram descritas para cada um dos ambientes de rádio móvel citados. Foi feita também uma análise, a título de exemplo e fazendo uso do método G, da probabilidade de interferência cocanal total nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh.

As contribuições contidas neste capítulo:

- A obtenção de todos os resultados para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes e para a probabilidade de interferência cocanal total em função de um parâmetro único.
- O Método B - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rayleigh/Rayleigh.
- O Método D - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rayleigh/Rayleigh.
- O Método I - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rice/Rayleigh.
- O Método J - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rice/Rayleigh.
- O Método K - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rice/Rice.

- O Método M - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rayleigh/Suzuki.
- O Método N - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rayleigh/Suzuki.
- O Método O - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Nakagami/Suzuki.
- O Método P - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rice/Suzuki.
- O Método R - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Suzuki/Suzuki.
- O Método U - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki.
- O Método V - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes em ambiente Rice Sombreado/Suzuki.

Capítulo 4

Técnicas de Encaminhamento Alternativo

4.1 Introdução

O uso eficiente das técnicas de alocação de canais determina um bom desempenho de um sistema de rádio móvel.

As técnicas de alocação de canais se dividem em duas classes [23], a saber:

- Técnicas de atribuição global - nas quais são determinados os canais que estarão disponíveis para uma determinada célula.
- Técnicas de atribuição local - nas quais são determinados os canais que estarão disponíveis para uma determinada chamada, que podem pertencer à célula com a qual possui melhor comunicação ou a uma célula com a qual a comunicação não é a melhor mais ainda é adequada.

As técnicas de atribuição global se dividem em:

- Alocação fixa de canais - na qual o número de canais de cada célula é atribuído de forma fixa, de acordo com o perfil de tráfego, ou seja, de acordo com o tráfego médio. O uso das técnicas de alocação fixa de canais implica máxima eficiência no reuso de canais. As técnicas da alocação fixa de canais têm aplicação em sistemas com perfil de tráfego estável, entretanto, variações deste perfil podem causar distúrbios.
- Alocação dinâmica de canais - na qual o número de canais de cada célula é atribuído de forma dinâmica, com o uso de algoritmos e de acordo com a demanda de tráfego em tempo real. O uso das técnicas de alocação dinâmica de canais implica capacidade de

adaptação a variações repentinas de tráfego, entretanto, pode apresentar baixa eficiência no reuso de canais.

- Alocação híbrida de canais - são técnicas que combinam as técnicas de alocação fixa de canais e as técnicas de alocação dinâmica de canais, ou seja, uma parte dos canais de cada célula é atribuída de forma fixa, de acordo com o tráfego médio, e o restante é atribuído de forma dinâmica, de acordo com a demanda de tráfego em tempo real. O uso das técnicas de alocação híbrida de canais apresenta características intermediárias entre a máxima eficiência no reuso de canais, que é característica das técnicas de alocação fixa de canais, e a capacidade de adaptação a variações repentinas de tráfego, que é característica das técnicas alocação dinâmica de canais.

As técnicas de atribuição local identificam as chamadas como pertencentes a duas correntes de tráfego:

- Tráfego fixo - tráfego originado de pontos próximos ao centro das células¹ que possui boa comunicação unicamente com uma estação rádio base, ou seja, unicamente com uma célula.
- Tráfego flexível - tráfego originado de pontos próximos à fronteira das células que possui boa comunicação com duas estações rádio base adjacentes, ou seja, com duas células adjacentes.²

Assim, define-se a flexibilidade, fl , como sendo a proporção de tráfego flexível do sistema móvel considerado. Considerando-se que A_c é o tráfego-total/célula do sistema móvel considerado,³ obtém-se:

- O tráfego-fixo/célula, A_f , dado por

$$A_f = A_c(1 - fl) \quad (4.1)$$

¹Considerando que as estações rádio base estão situadas no centro das células.

²Existem técnicas de atribuição local que podem identificar as chamadas como pertencentes a três corrente de tráfego:

- tráfego fixo,
- tráfego flexível com boa comunicação com duas células adjacentes, e
- tráfego flexível com boa comunicação com três células adjacentes.

Entretanto, estas técnicas não serão consideradas neste trabalho.

³Considera-se que o tráfego é o mesmo para todas as células do sistema móvel considerado, ou seja, considera-se um sistema balanceado.

- O tráfego-flexível/célula, A_{fl} , dado por

$$A_{fl} = A_c fl \quad (4.2)$$

As técnicas de atribuição local procuram encaminhar (ou rotear) as chamadas pertencentes à corrente de tráfego flexível de forma alternativa. Por causa desta característica são chamadas de técnicas de encaminhamento (ou roteamento) alternativo. Ainda, as técnicas de encaminhamento alternativo classificam as duas células com as quais o tráfego flexível possui boa comunicação como:

- Célula de primeira opção - que é a célula com a qual o tráfego flexível possui melhor comunicação.
- Célula de segunda opção - que é a célula com a qual o tráfego flexível possui segunda melhor comunicação.

São técnicas de atribuição local:

- Retentativa Direcionada (Directed Retry) - na qual um algoritmo de atribuição de canais, toma a decisão de procurar, para servir ao tráfego flexível, a célula com a qual este possui segunda melhor comunicação, ou seja, a célula de segunda opção,⁴ quando a célula com a qual possui melhor comunicação, ou seja, a célula de primeira opção, estiver bloqueada.
- Variação do Limiar de Bloqueio - na qual um algoritmo de atribuição de canais, toma a decisão de procurar, para servir ao tráfego flexível, a célula com a qual este possui segunda melhor comunicação, ou seja, a célula de segunda opção,⁴ quando o número de canais da célula com a qual possui melhor comunicação, ou seja, da célula de primeira opção, exceder ou igualar um valor de limiar, denominado limiar de bloqueio [24],⁵ e a célula de segunda opção possuir menor número de canais ocupados que a célula de primeira opção. Ainda, quando o número de canais ocupados na célula de primeira opção for igual ao número de canais ocupados na célula de segunda opção, o algoritmo de atribuição de canais toma a decisão de encaminhar o tráfego flexível à célula de primeira opção ou à célula de segunda opção, de acordo com a variante do algoritmo adotada. Duas variantes são possíveis:⁶

⁴A comunicação com a célula de segunda opção deve ser adequada, portanto, está sujeita a um grau de serviço especificado.

⁵Em geral, o limiar de bloqueio é o mesmo para todas as células do sistema móvel considerado.

⁶Considerando sistemas móveis nos quais não existe desbalanceamento de tráfego.

- Variante 1: Enviar o tráfego flexível para a célula de primeira opção.
- Variante 2: Repartir o tráfego flexível enviando as chamadas alternadamente para a célula de primeira opção e para a célula de segunda opção.⁷

É importante observar que se o valor de limiar coincidir com o número de canais da célula de primeira opção, a técnica Variação do Limiar de Bloqueio coincide com a técnica Retentativa Direcionada.

Observa-se, ainda, que quando da utilização das técnicas de encaminhamento alternativo:

- O tráfego fixo é bloqueado quando a célula de primeira opção estiver bloqueada.
- O tráfego flexível é bloqueado quando tanto a célula de primeira opção quanto a célula de segunda opção estiverem bloqueadas.

A análise do desempenho das técnicas de encaminhamento alternativo será feita através da análise do desempenho da técnica Variação do Limiar de Bloqueio porquanto esta análise inclui a análise do desempenho da técnica Retentativa Direcionada. A análise do desempenho da técnica Variação do Limiar de Bloqueio será feita para um sistema móvel de duas células de forma semelhante à realizada por Mencia & Yacoub [24], apenas mais simplificada devido ao fato de que neste trabalho são considerados apenas sistemas móveis nos quais não existe desbalanceamento (médio) de tráfego. Os resultados de desempenho da técnica Variação do Limiar de Bloqueio para um sistema móvel de duas células servem como um guia para dar idéia dos resultados de desempenho para sistemas móveis maiores [24]. Portanto, será feita uma análise qualitativa e não quantitativa do desempenho das técnicas de encaminhamento alternativo.

Nesta análise, assume-se que:

- As chamadas originadas em uma célula têm distribuição de Poisson.
- O tempo de retenção é exponencialmente distribuído.

O uso das técnicas de encaminhamento alternativo implica dependência mútua de tráfego. A análise de desempenho de um sistema móvel de duas células com dependência mútua

⁷Esta variante possui a vantagem de procurar equilibrar desbalanceamentos momentâneos de tráfego. Desbalanceamentos momentâneos de tráfego ocorrem mesmo em sistemas móveis nos quais o desbalanceamento (médio) de tráfego é considerado como inexistente.

de tráfego é feita utilizando-se os processos de Markov a estado discreto e a tempo contínuo, ou seja, através da cadeia de Markov a tempo contínuo, e em particular, através dos processos de nascimento e morte a tempo contínuo.

4.2 Modelagem de um Sistema Móvel com Duas Células com Dependência Mútua de Tráfego

Em um sistema móvel com duas células - chamadas, a título de identificação, de Célula A e Célula B - com dependência mútua de tráfego e com N_c canais/célula,⁸ o número de canais ocupados é modelado através de um processo, $\mathbf{N}_s(t) = [\mathbf{n}_a(t), \mathbf{n}_b(t)]$, onde $\mathbf{n}_a(t)$ e $\mathbf{n}_b(t)$ são, respectivamente, os processos que modelam o número de canais ocupados na Célula A e o número de canais ocupados na Célula B.

O processo $\mathbf{N}_s(t)$ pode assumir os estados $\{(i, j) : i = 0, \dots, N_c \text{ e } j = 0, \dots, N_c\}$ com probabilidades de estado, $\{p_{ij}(t) : i = 0, \dots, N_c \text{ e } j = 0, \dots, N_c\}$ e

$$\sum_{i=0}^{N_c} \sum_{j=0}^{N_c} p_{ij}(t) = 1 \quad (4.3)$$

Ou seja,

$$p_{ij}(t) = P[\mathbf{N}_s(t) = (i, j)] : \begin{cases} i = 0, \dots, N_c \\ j = 0, \dots, N_c \end{cases} \quad (4.4)$$

onde $\{P[\mathbf{N}_s(t) = (i, j)] : i = 0, \dots, N_c \text{ e } j = 0, \dots, N_c\}$ são as probabilidades dos eventos $\{\{\mathbf{N}_s(t) = (i, j)\} : i = 0, \dots, N_c \text{ e } j = 0, \dots, N_c\}$.

Da Equação 4.4, obtém-se

$$p_{ij}(t) = P[\mathbf{n}_a(t) = i, \mathbf{n}_b(t) = j] : \begin{cases} i = 0, \dots, N_c \\ j = 0, \dots, N_c \end{cases} \quad (4.5)$$

onde $\{P[\mathbf{n}_a(t) = i, \mathbf{n}_b(t) = j] : i = 0, \dots, N_c \text{ e } j = 0, \dots, N_c\}$ são as probabilidades conjuntas dos eventos $\{\{\mathbf{n}_a(t) = i\} : i = 0, \dots, N_c\}$ e $\{\{\mathbf{n}_b(t) = j\} : j = 0, \dots, N_c\}$.

Na Figura 4.1, mostra-se o diagrama de transição de estados do processo $\mathbf{N}_s(t)$. Note que é um diagrama de estados bidimensional.

Na Figura 4.1, $\{\lambda A_{ij} : i = 0, \dots, (N_c - 1) \text{ e } j = 0, \dots, N_c\}$ são as taxas de ocupação⁹ para a célula A; $\{\lambda B_{ij} : i = 0, \dots, N_c \text{ e } j = 0, \dots, (N_c - 1)\}$ são as taxas de ocupação⁹ para a célula B; $\{\mu A_{ij} : i = 1, \dots, N_c \text{ e } j = 0, \dots, N_c\}$ são as taxas de serviço¹⁰ para a célula A e $\{\mu B_{ij} : i = 0, \dots, N_c \text{ e } j = 1, \dots, N_c\}$ são as taxas de serviço¹⁰ para a célula B.

⁸ Assume-se que o número de canais por célula é o mesmo para todas as células do sistema móvel considerado.

⁹ Ou taxas de nascimento.

¹⁰ Ou taxas de morte.

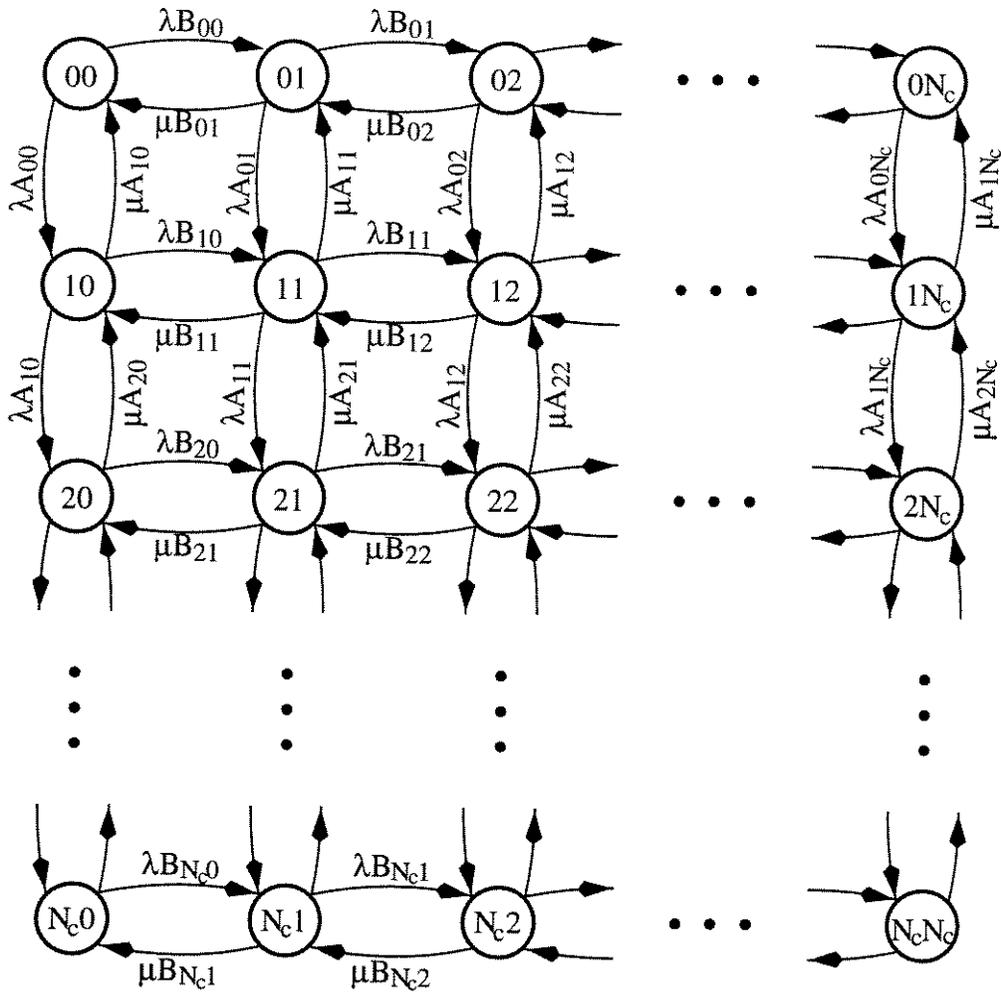


Figura 4.1: Diagrama de transição de estados do processo $N_s(t)$.

Considerando que o tempo de retenção tem distribuição exponencial negativa, conclui-se que a taxa de desocupação¹¹ de qualquer uma das células é proporcional ao número de canais ocupados. Assim, a taxa de desocupação normalizada de qualquer uma das células é igual ao número de canais ocupados, ou seja,

$$\mu A_{ij} = i : \begin{cases} i = 1, \dots, N_c \\ j = 0, \dots, N_c \end{cases} \quad (4.6)$$

e

$$\mu B_{ij} = j : \begin{cases} i = 0, \dots, N_c \\ j = 1, \dots, N_c \end{cases} \quad (4.7)$$

Considerando que as chamadas têm distribuição de Poisson, conclui-se que a taxa de ocupação de qualquer uma das células é proporcional ao tráfego que lhe é encaminhado. Assim, a taxa de ocupação normalizada de qualquer uma das células é igual ao tráfego que lhe

¹¹Ou taxa de serviço.

é encaminhado. Portanto, considerando um limiar de bloqueio, $\{L : L = 0, \dots, (N_c + 1)\}$,¹² observa-se que:

- Se o número de canais ocupados em ambas as células for menor que o limiar de bloqueio, L , tudo se passa como se o sistema não reconhecesse o tráfego flexível. Ou seja, tem-se

$$\lambda A_{ij} = \lambda B_{ij} = A_f + A_{fl} : \begin{cases} i = 1, \dots, (L - 1) \\ j = 0, \dots, (L - 1) \end{cases} \quad (4.8)$$

- Se o número de canais ocupados em pelo menos uma das células for maior ou igual ao limiar de bloqueio, L , então:
 - todo o tráfego flexível do sistema é redirecionado para a célula com menor número de canais ocupados, ou
 - caso o número de canais ocupados seja igual em ambas as células, o tráfego flexível do sistema é igualmente repartido para as duas células.¹³

Ou seja, tem-se

$$\lambda A_{ij} = \begin{cases} A_f + 2A_{fl} & i < j \\ A_f + A_{fl} & i = j \\ A_f & i > j \end{cases} : \begin{cases} i = L, \dots, (N_c - 1) \\ j = L, \dots, N_c \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\lambda B_{ij} = \begin{cases} A_f & i < j \\ A_f + A_{fl} & i = j \\ A_f + 2A_{fl} & i > j \end{cases} : \begin{cases} i = L, \dots, N_c \\ j = L, \dots, (N_c - 1) \end{cases} \quad (4.10)$$

Observa-se que processo $N_s(t)$ é um processo estacionário e, portanto [15],

$$p_{ij}(t) = p_{ij} = cte : \begin{cases} i = 0, \dots, N_c \\ j = 0, \dots, N_c \end{cases} \quad (4.11)$$

onde $\{p_{ij} : i = 0, \dots, N_c \text{ e } j = 0, \dots, N_c\}$, são as probabilidades de estado estacionárias [15].

Das Equações 4.3 e 4.11, obtém-se

$$\sum_{i=0}^{N_c} \sum_{j=0}^{N_c} p_{ij} = 1 \quad (4.12)$$

Ainda, observa-se que um estado genérico (i, j) é cercado por quatro possíveis estados vizinhos, mostrados na Figura 4.2.

¹²Para $L = N_c + 1$ o sistema opera sem encaminhamento alternativo. Neste caso, as células não possuem dependência mútua de tráfego e devem ser consideradas isoladamente.

¹³Considerando qualquer uma das variantes do algoritmo.

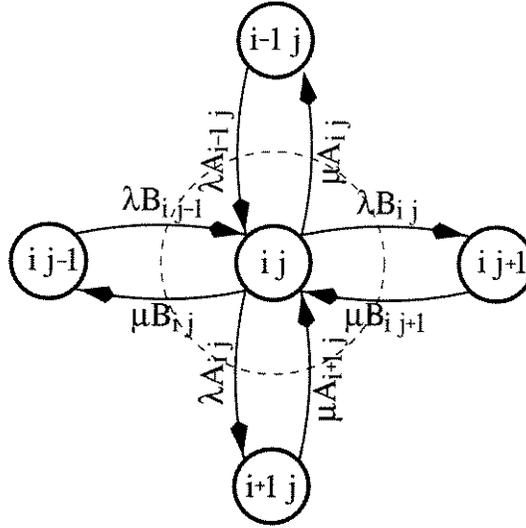


Figura 4.2: Um estado genérico (i, j) e seus quatro possíveis estados vizinhos.

Para um estado genérico (i, j) , obtém-se a equação do equilíbrio de fluxos através da fronteira pontilhada, mostrada Figura 4.2, dada por

$$\begin{aligned} & \lambda B_{i,j-1} p_{i,j-1} + \lambda A_{i-1,j} p_{i-1,j} \\ & - (\lambda A_{i,j} + \lambda B_{i,j} + \mu A_{i,j} + \mu B_{i,j}) p_{i,j} \\ & + \mu A_{i+1,j} p_{i+1,j} + \mu B_{i,j+1} p_{i,j+1} = 0 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Para os estados $\{(i, j) : i = 0, \dots, N_c \text{ e } j = 0, \dots, N_c\}$, obtém-se a equação do equilíbrio de fluxos dada por

$$\begin{aligned} & \lambda B_{i,j-1} p_{i,j-1} + \lambda A_{i-1,j} p_{i-1,j} \\ & - (\lambda A_{i,j} + \lambda B_{i,j} + \mu A_{i,j} + \mu B_{i,j}) p_{i,j} \\ & + \mu A_{i+1,j} p_{i+1,j} + \mu B_{i,j+1} p_{i,j+1} = 0 : \begin{cases} i = 0, \dots, N_c \\ j = 0, \dots, N_c \end{cases} \end{aligned} \quad (4.14)$$

onde

$$\lambda A_{N_c,j} = \lambda A_{-1,j} = 0 : j = 0, \dots, N_c \quad (4.15)$$

$$\mu A_{N_c+1,j} = \mu A_{0,j} = 0 : j = 0, \dots, N_c \quad (4.16)$$

$$p_{N_c+1,j} = p_{-1,j} = 0 : j = 0, \dots, N_c \quad (4.17)$$

$$\lambda B_{i,N_c} = \lambda B_{i,-1} = 0 : i = 0, \dots, N_c \quad (4.18)$$

$$\mu B_{i,N_c+1} = \mu B_{i,0} = 0 : i = 0, \dots, N_c \quad (4.19)$$

$$p_{iN_c+1} = p_{i-1} = 0 : i = 0, \dots, N_c \quad (4.20)$$

Assim, obtém-se um sistema linear com $(N_c + 1)^2$ equações e com mesmo número de incógnitas.

Colocando-se estas equações na forma matricial, obtém-se:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (4.21)$$

onde

- \mathbf{X} é a matriz das incógnitas, dada por

$$\mathbf{X} = [x_{kl}]_{(N_c+1)^2 \times 1} \quad (4.22)$$

onde

$$x_{kl} |_{k=i(N_c+1)+j+1} = p_{ij} : \begin{cases} i = 0, \dots, N_c \\ j = 0, \dots, N_c \end{cases} \quad (4.23)$$

são as incógnitas do sistema linear.

- \mathbf{A} é a matriz dos coeficientes das incógnitas, dada por

$$\mathbf{A} = [a_{kl}]_{(N_c+1)^2 \times (N_c+1)^2} \quad (4.24)$$

onde

$$a_{kl} |_{k=i(N_c+1)+j+1} = \begin{cases} \lambda A_{i-1j} & l = k - N_c + 1 \quad e \quad l \geq 1 \\ \lambda B_{ij-1} & l = k - 1 \quad e \quad l \geq 1 \\ -(\lambda A_{ij} + \lambda B_{ij} + \mu A_{ij} + \mu B_{ij}) & l = k \\ \mu B_{ij+1} & l = k + 1 \quad e \quad l \leq (N_c + 1)^2 \\ \mu A_{i+1j} & l = k - N_c + 1 \quad e \quad l \leq (N_c + 1)^2 \\ 0 & c.c. \end{cases} : \begin{cases} i = 0, \dots, N_c \\ j = 0, \dots, N_c \end{cases} \quad (4.25)$$

são os coeficientes das incógnitas do sistema linear.

- \mathbf{B} é a matriz dos termos independentes, dada por

$$\mathbf{B} = [b_{kl}]_{(N_c+1)^2 \times 1} \quad (4.26)$$

onde

$$b_{k1} = 0 : k = 0, \dots, (N_c + 1)^2 \quad (4.27)$$

são termos independentes do sistema linear.

Observa-se que o sistema linear obtido a partir das equações de equilíbrio de fluxo é um sistema linear homogêneo.¹⁴ Para um sistema linear homogêneo a solução

$$x_{k1} = 0 : k = 0, \dots, (N_c + 1)^2 \quad (4.28)$$

é a trivial. Assim, conclui-se que todo sistema linear homogêneo é possível, restando apenas verificar se é determinado ou indeterminado, isto é, se a solução dada pela Equação 4.28 é única ou não.

Das Equações 4.12 e 4.23, obtém-se

$$\sum_{k=1}^{(N_c+1)^2} x_{k1} = 1 \quad (4.29)$$

ou seja, a solução dada pela Equação 4.28 não é única, portanto, trata-se de um sistema possível e indeterminado.

Para eliminar a indeterminação, basta combinar as Equações 4.21 e 4.29. Assim, obtém-se

$$\mathcal{A}' \cdot \mathcal{X} = \mathcal{B}' \quad (4.30)$$

onde

- \mathcal{A}' é definida como sendo

$$\mathcal{A}' = [a'_{kl}]_{(N_c+1)^2 \times (N_c+1)^2} \quad (4.31)$$

onde

$$a'_{kl} = \begin{cases} a_{kl} & k = 0, \dots, [(N_c + 1)^2 - 1] \\ 1 & k = (N_c + 1)^2 \end{cases} : l = 0, \dots, (N_c + 1)^2 \quad (4.32)$$

isto é, \mathcal{A}' é definida como sendo a matriz \mathcal{A} tendo sua última linha substituída por “1”s.¹⁵

- \mathcal{B}' é definida como sendo

$$\mathcal{B}' = [b'_{kl}]_{(N_c+1)^2 \times 1} \quad (4.33)$$

onde

$$b'_{k1} = \begin{cases} b_{k1} & k = 0, \dots, [(N_c + 1)^2 - 1] \\ 1 & k = (N_c + 1)^2 \end{cases} \quad (4.34)$$

isto é, \mathcal{B}' é definida como sendo a matriz \mathcal{B} tendo sua última linha substituída por “1”s.¹⁵

¹⁴Sistema linear homogêneo é aquele em que a matriz, \mathcal{B} , dos termos independentes é uma matriz nula.

¹⁵A linha a ser substituída foi escolhida como sendo a última por acaso, entretanto, poderia ter sido qualquer outra.

Da Equação 4.30, tem-se ainda,

$$\mathcal{X} = \mathcal{C} \mathcal{B}' \quad (4.35)$$

onde $\mathcal{C} = \mathcal{A}'^{-1}$ é a matriz inversa da matriz \mathcal{A}' , dada por¹⁶

$$\mathcal{C} = [c_{kl}]_{(N_c+1)^2 \times (N_c+1)^2} \quad (4.36)$$

Uma vez que \mathcal{B}' contém apenas termo não nulo $b'_{(N_c+1)^2, 1} = 1$, a solução do sistema linear é dada por

$$x_{k1} = c_{k(N_c+1)^2} : k = 0, \dots, (N_c + 1)^2 \quad (4.37)$$

Assim, das Equações 4.23 e 4.37, obtém-se as probabilidades de estado estacionárias dadas por

$$p_{ij} = c_{k(N_c+1)^2} \Big|_{k=i(N_c+1)+j+1} : \begin{cases} i = 0, \dots, N_c \\ j = 0, \dots, N_c \end{cases} \quad (4.38)$$

4.3 Desempenho de um Sistema Móvel com Duas Células com Dependência Mútua de Tráfego

4.3.1 Medidas de Desempenho

O desempenho de um sistema móvel pode ser avaliado através da probabilidade de bloqueio.

Para sistemas móveis nos quais técnicas de encaminhamento alternativo não são utilizadas, a probabilidade de bloqueio, B_c , da célula, é dada pela fórmula de Erlang-B, ou seja,

$$B_c = \frac{\frac{A_c^{N_c}}{N_c!}}{\sum_{j=0}^{N_c} \frac{A_c^j}{j!}} \quad (4.39)$$

onde A_c é o tráfego-total/célula e N_c é o número de canais/célula do sistema móvel considerado.

Considerando um sistema móvel de duas células, no qual técnicas de encaminhamento alternativo são utilizadas, ou seja, com mútua dependência de tráfego, a probabilidade de bloqueio, B_c , da célula, é dada por

$$B_c = \sum_{i=0}^{N_c} p_{i N_c} \quad (4.40)$$

¹⁶Os termos da matriz \mathcal{C} são obtidos, com o auxílio de métodos numéricos de inversão de matrizes, a partir dos termos da matriz \mathcal{A}' .

ou

$$B_c = \sum_{j=0}^{N_c} p_{N_c j} \quad (4.41)$$

Ainda, a probabilidade de bloqueio, B_s , do sistema móvel de duas células,¹⁷ é dada por

$$B_s = p_{N_c N_c} \quad (4.42)$$

Portanto, quando da utilização das técnicas de encaminhamento alternativo, observa-se que :

- O tráfego fixo é bloqueado com probabilidade igual à probabilidade de bloqueio, B_c , da célula.
- O tráfego flexível é bloqueado com probabilidade igual à probabilidade de bloqueio, B_s , do sistema móvel de duas células.

Assim, é conveniente definir, B_m , como sendo a probabilidade de bloqueio média, dada por

$$B_m = \frac{A_f B_c + A_{fl} B_s}{A_c} \quad (4.43)$$

onde A_f é o tráfego-fixo/célula e A_{fl} é o tráfego-flexível/célula.

4.3.2 Alguns Resultados

Das Equações 4.1, 4.2, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.24, 4.25, 4.31, 4.32, 4.36,¹⁸ 4.38, 4.40 (ou 4.41), 4.42 e 4.43, foram obtidas as curvas mostradas nas Figuras 4.3-4.7.

Na Figura 4.3, são mostradas as curvas da probabilidade de bloqueio, B_c , da célula, em função da flexibilidade, fl , para $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L .

É interessante lembrar que apenas o tráfego fixo é bloqueado com probabilidade igual à probabilidade de bloqueio, B_c , da célula, e que a proporção de tráfego fixo de um sistema móvel é igual a $(1 - fl)$.

¹⁷Isto é, a probabilidade de que ambas as células estejam bloqueadas.

¹⁸Os termos da matriz \mathbf{C} , dada pela Equação 4.36, são obtidos, com o auxílio de métodos numéricos de inversão de matrizes, a partir dos termos, dados pela Equação 4.32, da matriz \mathcal{A}' , dada pela Equação 4.31.

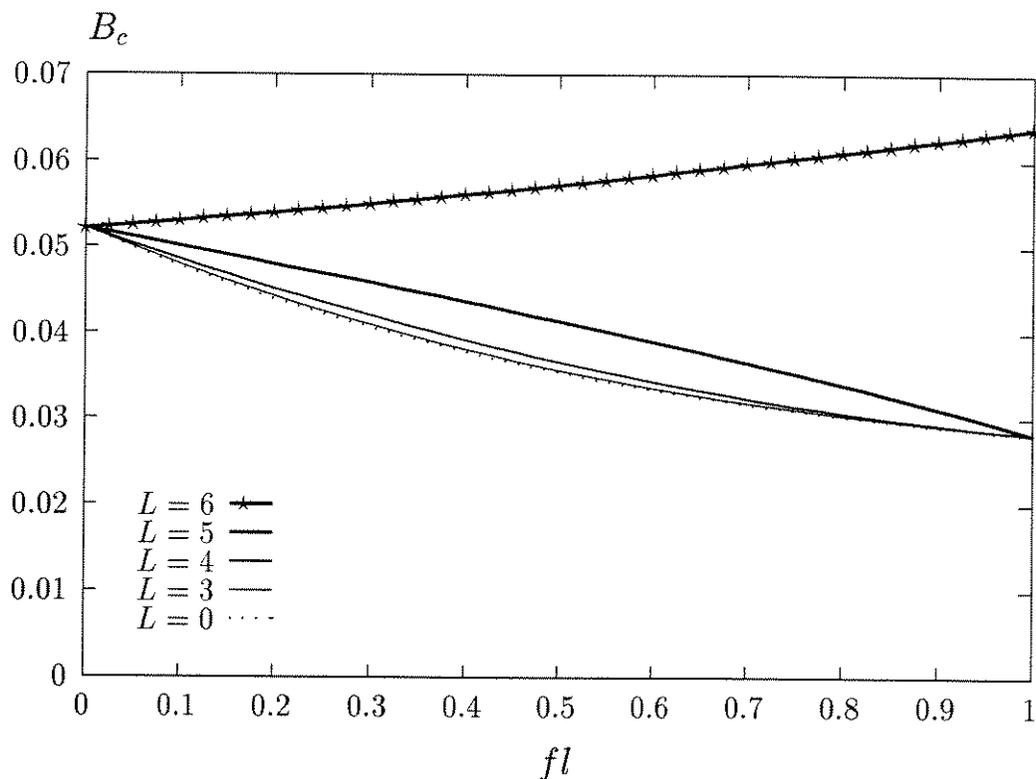


Figura 4.3: Probabilidade de bloqueio da célula, em função da flexibilidade, fl , para $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L .

Na Figura 4.4, são mostradas as curvas da probabilidade de bloqueio, B_s , do sistema móvel de duas células, em função da flexibilidade, fl , para $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L .

É interessante lembrar que apenas o tráfego flexível é bloqueado com probabilidade igual à probabilidade de bloqueio, B_s , do sistema móvel de duas células, e que a proporção de tráfego flexível de um sistema móvel é igual a fl .

Na Figura 4.5, são mostradas as curvas da probabilidade de bloqueio, B_m , média, em função da flexibilidade, fl , para $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L .

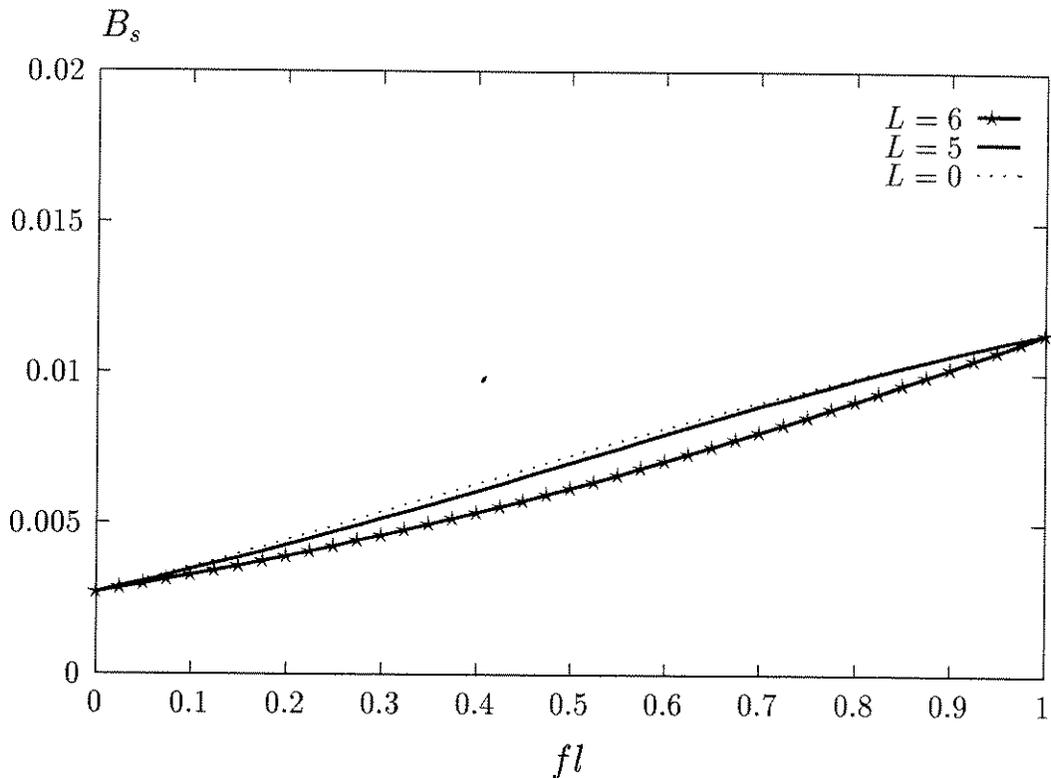


Figura 4.4: Probabilidade de bloqueio do sistema móvel de duas células, em função da flexibilidade, fl , para $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L .

É interessante observar que a probabilidade de bloqueio média é uma média ponderada das probabilidades de bloqueio, B_c , da célula e, B_s , do sistema móvel de duas células.

Da Figura 4.5, conclui-se ainda que:

- A utilização de técnicas de encaminhamento alternativo melhora substancialmente o desempenho de um sistema móvel.
- Quanto menor o limiar de bloqueio, L , melhor o desempenho do sistema móvel.
- A técnica variação do limiar de bloqueio apresenta melhor desempenho que a técnica Retentativa Direcionada.¹⁹

¹⁹Esta conclusão é consequência da conclusão anterior.

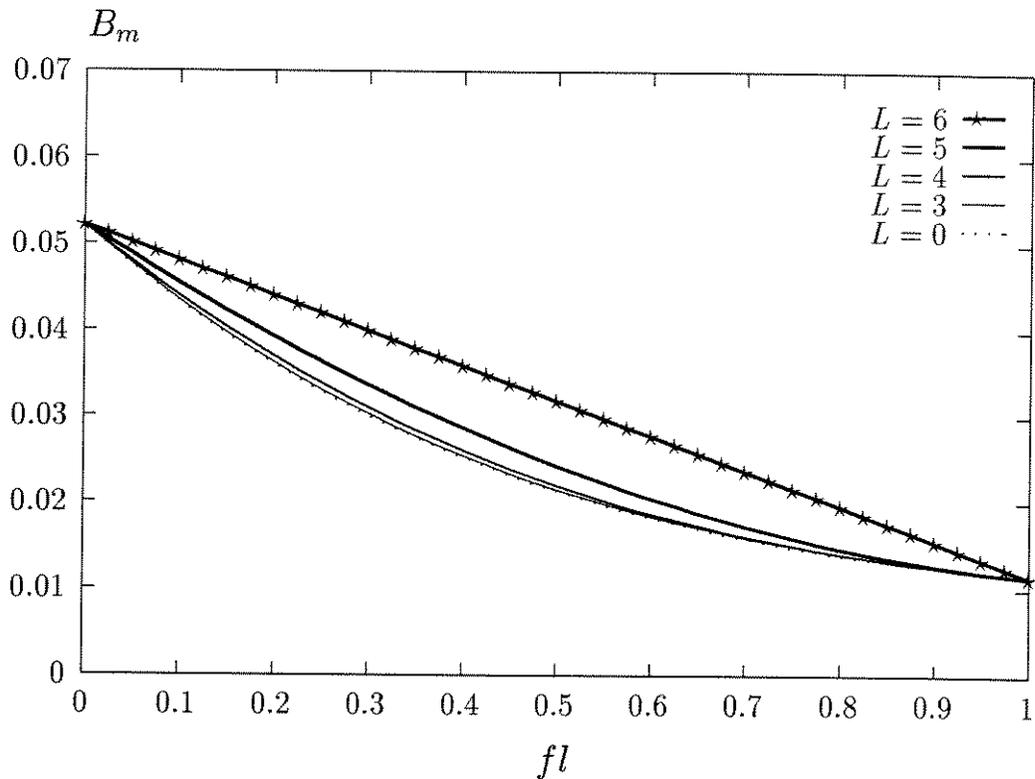


Figura 4.5: Probabilidade de bloqueio média, em função da flexibilidade, fl , para $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L .

A Figura 4.6 mostra a comparação das probabilidades de bloqueio, B_c , da célula, B_s , do sistema móvel de duas células e, B_m , média. Na Figura 4.6, são mostradas as curvas da probabilidade de bloqueio, B_c , da célula, B_s , do sistema móvel de duas células, e B_m , média, em função da flexibilidade, fl , para $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L . Assim, é possível observar, na Figura 4.6, que a probabilidade de bloqueio, B_m , média:

- Coincide com a probabilidade de bloqueio, B_c , da célula, para $fl = 0$.
- Coincide com probabilidade de bloqueio, B_s , do sistema móvel de duas células, para $fl = 1$.
- sofre maior influência da probabilidade de bloqueio, B_c , da célula, para valores pequenos de flexibilidade.

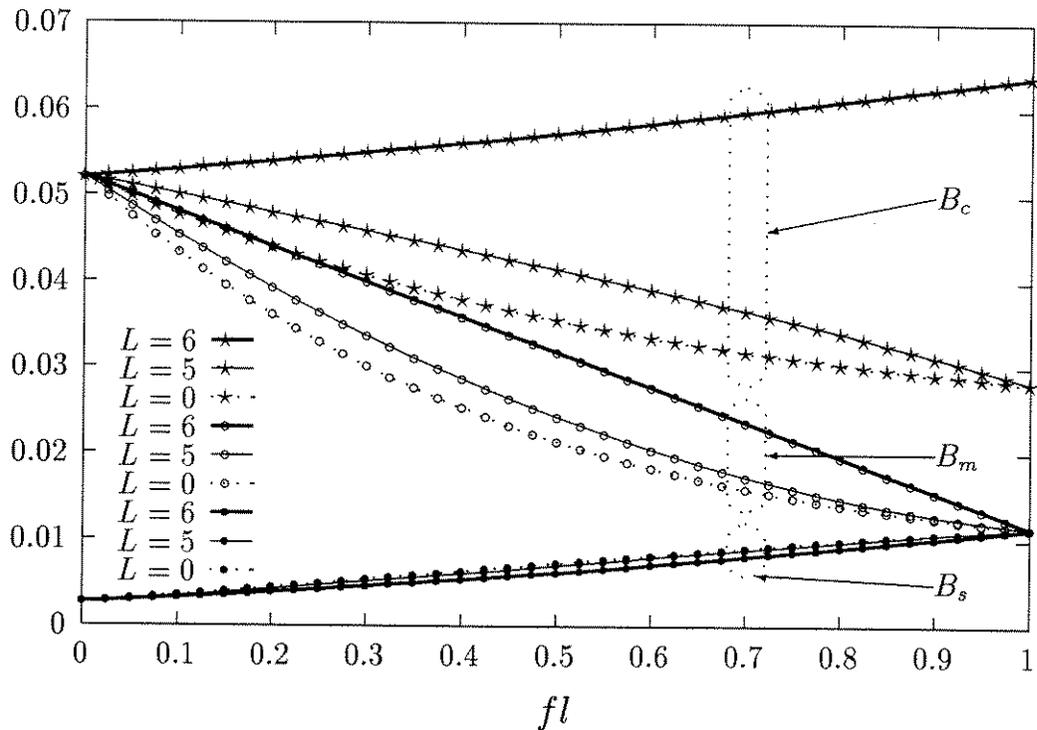


Figura 4.6: Comparação das probabilidades de bloqueio, B_c , da célula, B_s , do sistema móvel de duas células e, B_m , média.

- sofre maior influência da probabilidade de bloqueio, B_s , do sistema móvel de duas células, para valores grandes de flexibilidade.
- Coincide com a média aritmética das probabilidades de bloqueio, B_c , da célula e, B_s , do sistema móvel de duas células, para $fl = 0.5$.

Ainda, quando se varia o tráfego oferecido ao sistema móvel de duas células, as probabilidades de bloqueio também variam, entretanto, o comportamento do sistema móvel quando do uso de técnicas de encaminhamento alternativo não varia, ou seja, as conclusões já citadas não sofrem alteração, como é possível observar na Figura 4.7.

4.4 Conclusão

Foram descritas as diversas técnicas de alocação de canais. A análise do desempenho das técnicas de encaminhamento alternativo foi feita através da análise do desempenho da

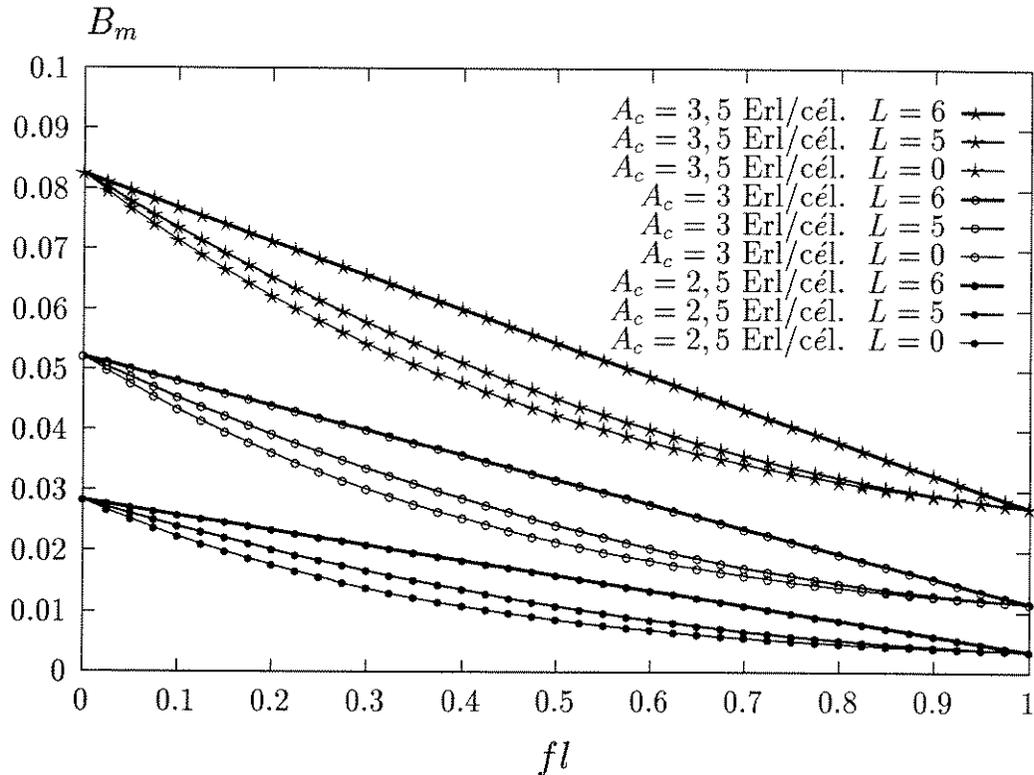


Figura 4.7: Bloqueio médio e tráfego.

técnica Variação do Limiar de Bloqueio porquanto esta inclui a análise do desempenho da técnica Retentativa Direcionada. A análise do desempenho da técnica Variação do Limiar de Bloqueio foi feita para um sistema móvel de duas células de forma semelhante à realizada por Mencia & Yacoub [24], apenas mais simplificada devido ao fato de que neste trabalho são considerados apenas sistemas móveis nos quais não existe desbalanceamento (médio) de tráfego. O uso das técnicas de encaminhamento alternativo implica dependência mútua de tráfego. A análise de desempenho de um sistema móvel de duas células com dependência mútua de tráfego foi feita utilizando-se os processos de Markov a estado discreto e a tempo contínuo, ou seja, através da cadeia de Markov a tempo contínuo, e em particular, através dos processos de nascimento e morte a tempo contínuo. Foram definidas as medidas de desempenho de um sistema móvel no qual as técnicas de encaminhamento alternativo são utilizadas. Assim, foram obtidas as curvas mostradas nas Figuras 4.3-4.7.

Capítulo 5

Interferência Cocanal e Técnicas de Encaminhamento Alternativo

5.1 Introdução

Com o objetivo de melhorar o desempenho dos sistemas de rádio móvel, foram desenvolvidas as técnicas de encaminhamento alternativo. Como já foi visto no Capítulo 4, as técnicas de encaminhamento alternativo são estratégias de encaminhamento do tráfego flexível de acordo com critérios pré-determinados.

Por um lado, o uso das técnicas de encaminhamento alternativo certamente implica melhoria da capacidade de tráfego. Por outro lado, quando do uso de técnicas de encaminhamento alternativo, a interferência cocanal sofre alterações. Neste capítulo serão propostas duas modelagens para a avaliação da interferência cocanal em sistemas móveis nos quais as técnicas de encaminhamento alternativo são utilizadas. Esta avaliação compreende a análise dos parâmetros do sistema de rádio móvel que são modificados quando do uso de técnicas de encaminhamento alternativo e que exercem influência sobre o cálculo da probabilidade de interferência cocanal. Dentre estes parâmetros destaca-se a geometria da célula. Portanto, a geometria da célula é analisada tanto para sistemas móveis em que encaminhamentos alternativos não são considerados, quanto para aqueles em que uma segunda possibilidade de encaminhamento é considerada.

Duas formas para a avaliação da interferência cocanal são propostas:

- Avalia-se a interferência cocanal considerando-se que o rádio móvel situa-se na borda da célula, ou seja, nos pontos de “pior caso”, e que o encaminhamento alternativo da chamada está sendo efetivamente feito. Nesta avaliação, sugere-se uma aproximação possível para

a forma geométrica da célula para sistemas móveis que fazem uso das técnicas de encaminhamento alternativo.

- Avalia-se a interferência cocanal considerando-se que o rádio móvel situa-se na borda da célula, e que a chamada considerada está sendo encaminhada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo. Nesta avaliação, sugerem-se aproximações possíveis para as distâncias entre o rádio móvel e as estações rádio base de primeira opção e de segunda opção.

5.2 Parâmetro Margem e Geometria do Sistema Móvel

Considerando que as relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, dos n sinais interferentes existentes (n sinais ativos), são variáveis aleatórias igualmente distribuídas, isto é, $\{\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_I : i = 1, \dots, n\}$, definiu-se a margem, Z , dada em decibéis, pela qual o valor médio, $\bar{\gamma}$, da relação sinal desejado/ruído, γ , excede ao valor médio, $\bar{\gamma}_I$, das igualmente distribuídas relações interferência/ruído, $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$, multiplicado pela razão de proteção R_γ . Assim, a margem, Z , dada em decibéis, é dada pela Equação 3.76, aqui repetida por conveniência,

$$Z = 10 \log \left(\frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}_I R_\gamma} \right) \quad (5.1)$$

Para o rádio móvel considerado, a média, $\bar{\gamma}$, da relação sinal-desejado/ruído, é expressa por (da Equação 2.196)

$$\bar{\gamma} \triangleq \frac{\bar{w}}{n_0} \quad (5.2)$$

onde \bar{w} é a média da potência do sinal desejado e n_0 é a média da potência de ruído.

Ainda, para o rádio móvel considerado, a média, $\bar{\gamma}_I$, das relações interferência/ruído, é expressa por (da Equação 2.196)

$$\bar{\gamma}_I \triangleq \frac{\bar{w}_I}{n_0} \quad (5.3)$$

onde \bar{w}_I é a média das potências das interferências.

Assim, obtém-se

$$Z = 10 \log \left(\frac{\bar{w}}{\bar{w}_I R_w} \right) \quad (5.4)$$

onde $R_w = R_\gamma$ é a razão de proteção para a potência.

Da mesma forma

$$Z = 10 \log \left(\frac{\bar{w}}{\bar{w}_I} \right) - R_W \quad (5.5)$$

onde $R_W = 10 \log R_w$ é a razão de proteção, dada em decibéis, para a potência.

Considerando que os coeficientes de perda de percurso do sinal desejado e dos sinais interferentes são iguais, obtém-se da Equação 2.3,

$$\bar{w} = \bar{w}_I \left(\frac{d}{d_I} \right)^{-\alpha} \quad (5.6)$$

onde d é a distância do rádio móvel à estação rádio base desejada, d_I é a distância do rádio móvel às estações rádio base interferentes e α é o coeficiente de perda de percurso.

Da Equação 5.6, observa-se que a obtenção da razão das médias de potência do sinal desejado e dos sinais interferentes depende da posição do rádio móvel considerado, ou seja, depende da distância entre o rádio móvel e o transmissor desejado e da distância entre o rádio móvel e os transmissores interferentes.

Das Equações 5.5 e 5.6, obtém-se ainda

$$Z = 10 \alpha \log \left(\frac{d_I}{d} \right) - R_W \quad (5.7)$$

É importante observar que, no Capítulo 5, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes é sempre calculada em função da margem, Z , dada em decibéis. Portanto, conclui-se que a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes depende da distância entre o rádio móvel e o transmissor desejado e da distância entre o rádio móvel e os transmissores interferentes, ou seja, depende da posição do rádio móvel considerado, como esperado.

5.3 Geometria do Sistema de Rádio Móvel e Técnicas de Encaminhamento Alternativo

5.3.1 Forma Geométrica da Célula

A Figura 5.1 mostra o padrão hexagonal para a forma geométrica da célula onde r_c e a_c são, respectivamente, o raio e o apótema da célula. A área hachurada indica a região onde o sinal transmitido por uma determinada estação rádio base é o de maior potência, isto é, é o de primeira opção.

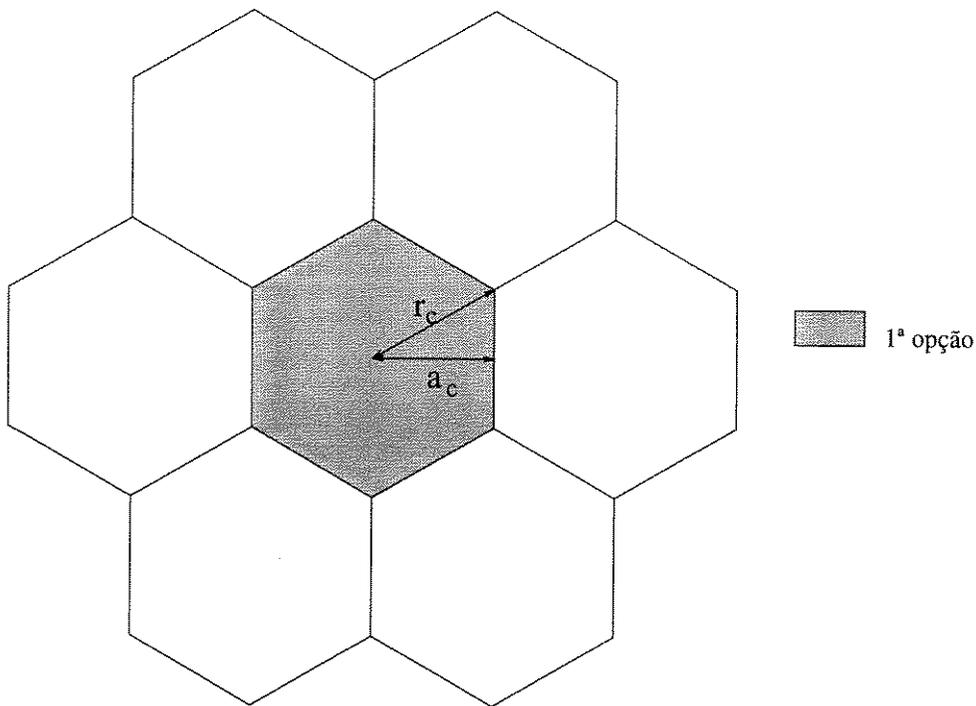


Figura 5.1: A forma geométrica da célula - forma padrão.

Do ponto de vista da análise da interferência cocanal, o foco de atenção dos sistemas de rádio móvel recai sobre os pontos de “pior-caso” [2]. Os pontos de “pior caso” são os pontos pertencentes a uma determinada célula que estão mais distantes da estação rádio base. Portanto, do ponto de vista da análise da interferência cocanal, o foco de atenção recai sobre os pontos situados nos vértices do hexágono, ou seja, os pontos situados à distância, r_c , do centro do hexágono e, portanto, da estação rádio base.

A Figura 5.2 mostra a forma geométrica da célula para sistemas de rádio móvel em que uma segunda opção de encaminhamento é considerada. Neste caso, a célula - toda a área hachurada - é a região onde o sinal transmitido por uma determinada estação rádio base é o de maior potência, ou seja, é o de primeira opção - área hachurada com maior intensidade - acrescida da região onde este sinal é o de segunda maior potência, ou seja, é o de segunda opção - área hachurada com menor intensidade. É importante observar que a região onde este sinal é o de segunda opção é formada por seis sub-regiões e que em cada uma delas o sinal de primeira opção é o sinal recebido da estação rádio base situada no centro do hexágono em que esta sub-região está contida. Ainda, é possível observar que a região onde este sinal é o de primeira opção também é formada por seis sub-regiões e que em cada uma delas o sinal de segunda

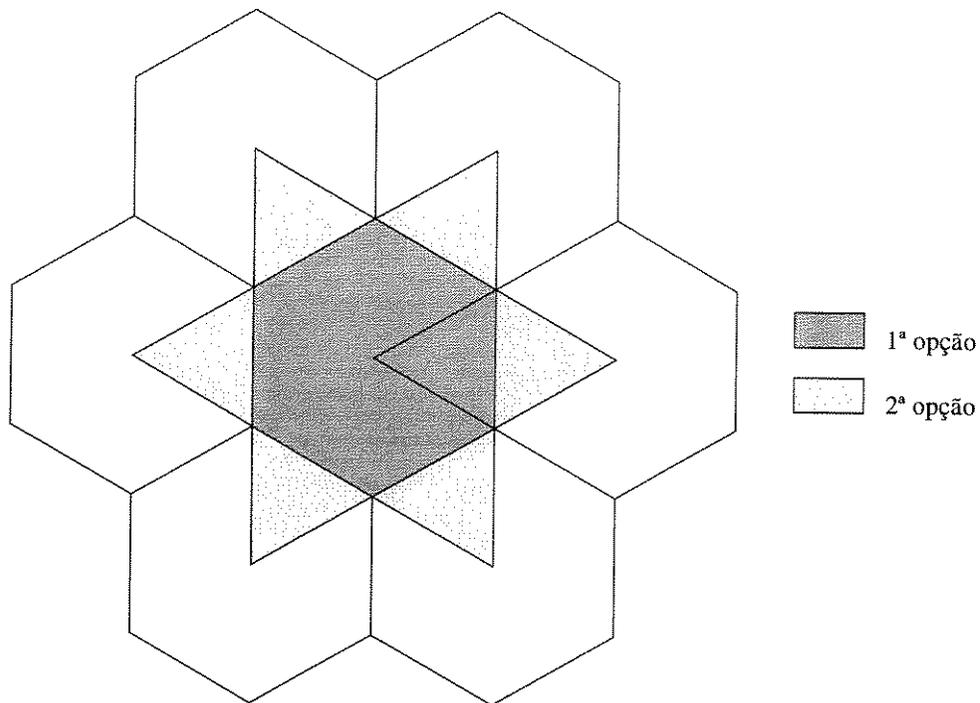


Figura 5.2: A forma geométrica da célula para sistemas de rádio móvel nos quais são utilizadas as técnicas de encaminhamento alternativo.

opção é o sinal recebido da estação rádio base situada no centro do hexágono adjacente a esta sub-região. Na Figura 5.2 é mostrada apenas uma destas sub-regiões da região de primeira opção - o triângulo contido no hexágono hachurado com maior intensidade.

Para que o roteamento alternativo seja efetivamente feito, a comunicação com a estação rádio base de segunda opção deve ser adequada e, portanto, deve estar sujeita a um grau de serviço especificado. Assim, deve-se considerar um valor limite, dado pela tolerância, t , para a razão entre a média, \bar{w}_{r1} , da potência recebida do sinal transmitido pela estação rádio base de primeira opção e a média, \bar{w}_{r2} , da potência recebida do sinal transmitido pela estação rádio base de segunda opção, a partir do qual não se deve encaminhar o tráfego flexível para a estação rádio base de segunda opção.

O lugar dos pontos em que

$$\frac{\bar{w}_{r1}}{\bar{w}_{r2}} = t = 10^{\frac{T}{10\alpha}} \quad (5.8)$$

onde T é a tolerância, dada em decibéis, é aquele com uma razão de distância, h , dada por

$$h = \frac{d_2}{d_1} = 10^{\frac{T}{10\alpha}} \quad (5.9)$$

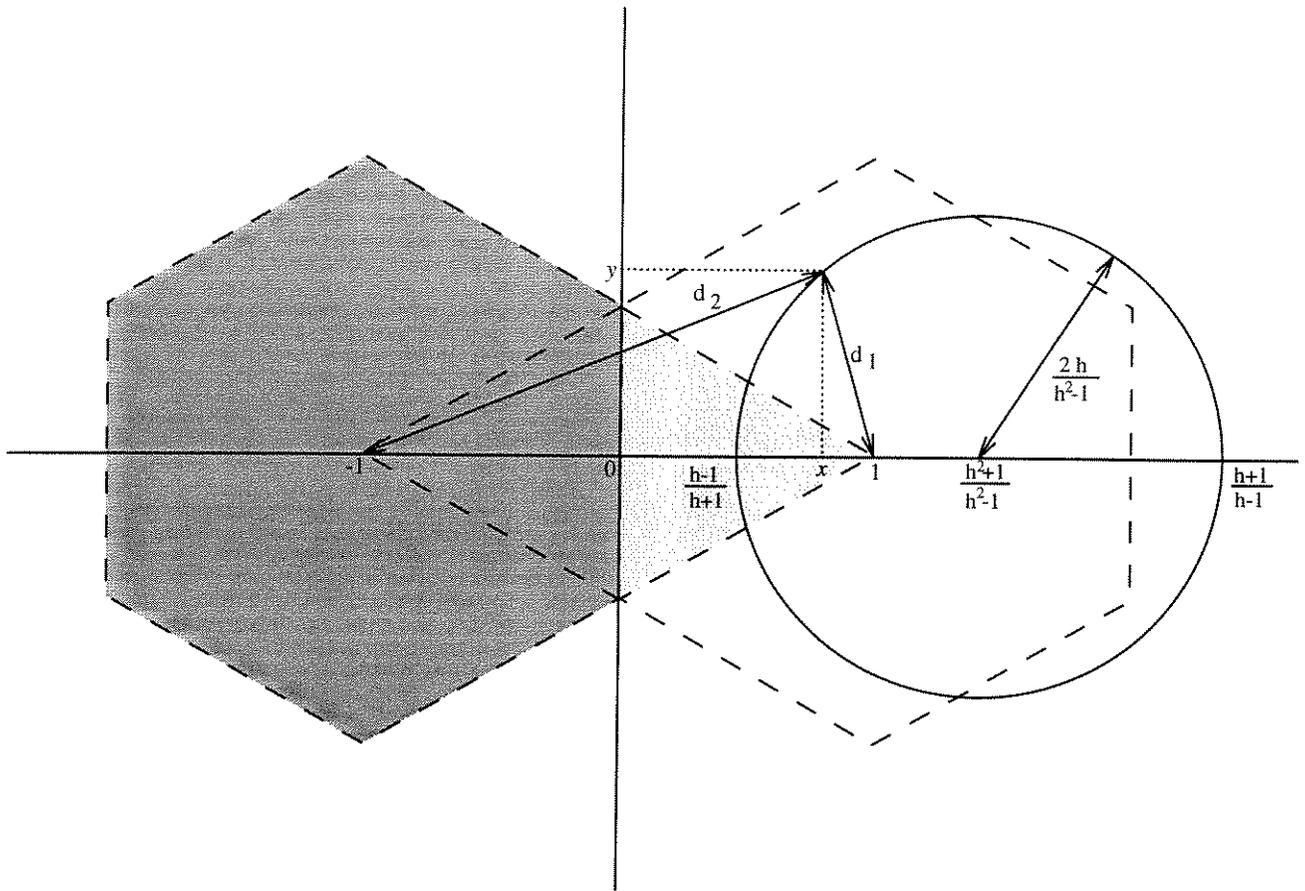


Figura 5.3: Lugar geométrico dos pontos no qual se tem uma dada tolerância, T , dada em decibéis.

onde d_1 é a distância do rádio móvel à estação rádio base de primeira opção; d_2 é a distância do rádio móvel à estação rádio base de segunda opção, e α é o coeficiente de perda de percurso, considerado idêntico para ambas as células.

Este lugar geométrico é o círculo dado por [4]

$$y^2 + \left(x - \frac{h^2 + 1}{h^2 - 1}\right)^2 = \left(\frac{2h}{h^2 - 1}\right)^2 \quad (5.10)$$

que é mostrado na Figura 5.3.

Nota-se que o círculo mostrado na Figura 5.3 divide o triângulo hachurado com menor intensidade em duas partes. Na parte mais próxima à região de primeira opção, obtém-se

$$\frac{\bar{w}_{r1}}{w_{r2}} < t = 10^{\frac{T}{10\alpha}} \quad (5.11)$$

e, portanto, todo o tráfego gerado nesta parte é considerado flexível porque possui comunicação

adequada tanto com a estação rádio base de primeira opção quanto com a estação rádio base de segunda opção. Na parte mais distante da região de primeira opção, obtém-se

$$\frac{\bar{w}_{r1}}{\bar{w}_{r2}} > t = 10^{\frac{T}{10\alpha}} \quad (5.12)$$

e, portanto, todo o tráfego gerado nesta parte não é considerado flexível, porque possui comunicação adequada apenas com a estação rádio base de primeira opção.

Na Figura 5.3, foram suprimidas as demais áreas de segunda opção que foram mostradas na Figura 5.2. Considerando um mesmo valor de tolerância para todos os sinais de segunda opção, observa-se, por simetria, que esta mesma divisão ocorre nas demais sub-regiões da área de segunda opção.

Define-se $\Delta\bar{W}_r$ como sendo

$$\Delta\bar{W}_r = 10 \log \left(\frac{\bar{w}_{r1}}{\bar{w}_{r2}} \right) \quad (5.13)$$

Sabe-se que a flexibilidade, fl , é definida como a proporção de tráfego flexível oferecida ao sistema de rádio móvel. Portanto, considerando que o tráfego disponível em uma determinada célula é igualmente distribuído por toda a célula, a flexibilidade coincide com a proporção da área do triângulo hachurado com menor intensidade, na Figura 5.3, na qual $\Delta\bar{W}_r$ está abaixo da tolerância. Assim, a flexibilidade é obtida por cálculos geométricos como sendo [4]

$$fl = 1 - \frac{4}{(h+1)^2} \quad (5.14)$$

onde h é a razão de distância, dado pela Equação 5.9.

Conclui-se que ao considerar um valor limite para $\Delta\bar{W}_r$, dado pela tolerância, obtém-se, associado a este limite, um valor para a flexibilidade. A flexibilidade indica a proporção da área do sistema de rádio móvel com duas opções de encaminhamento e, portanto, a proporção de tráfego flexível do sistema de rádio móvel. A região do sistema de rádio móvel com duas opções de encaminhamento é conhecida como a área de sobreposição.

5.3.2 Uma Aproximação Proposta para a Forma Geométrica da Célula Quando do Uso das Técnicas de Encaminhamento Alternativo.

Sugere-se como uma aproximação possível para a forma geométrica da célula em sistemas de rádio móvel nos quais as técnicas de encaminhamento alternativo são utilizadas, o

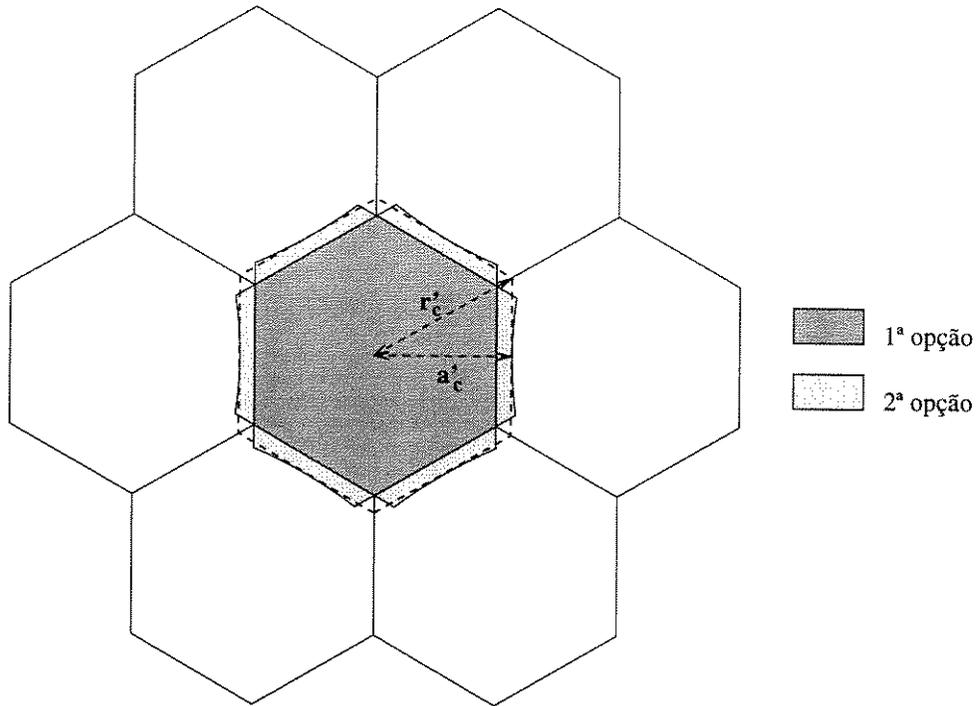


Figura 5.4: A geometria da célula quando do uso de técnicas de encaminhamento alternativo, para $fl = 0,25$.

hexágono com apótema, a'_c , dado por

$$a'_c = a_c \left(1 + \frac{h-1}{h+1} \right) \quad (5.15)$$

e, portanto, com raio, r'_c , dado por

$$r'_c = r_c \left(1 + \frac{h-1}{h+1} \right) \quad (5.16)$$

onde, da Equação 5.14,

$$h = \frac{2}{\sqrt{1-fl}} - 1 \quad (5.17)$$

A Figura 5.4 mostra a forma geométrica da célula e a aproximação proposta para a forma geométrica da célula, em sistemas móveis nos quais as técnicas de encaminhamento alternativo são utilizadas, considerando $fl = 0,25$, ou seja, considerando 25% de área de sobreposição.

A Figura 5.5 mostra a forma geométrica da célula e a aproximação proposta para a forma geométrica da célula, em sistemas móveis nos quais as técnicas de encaminhamento

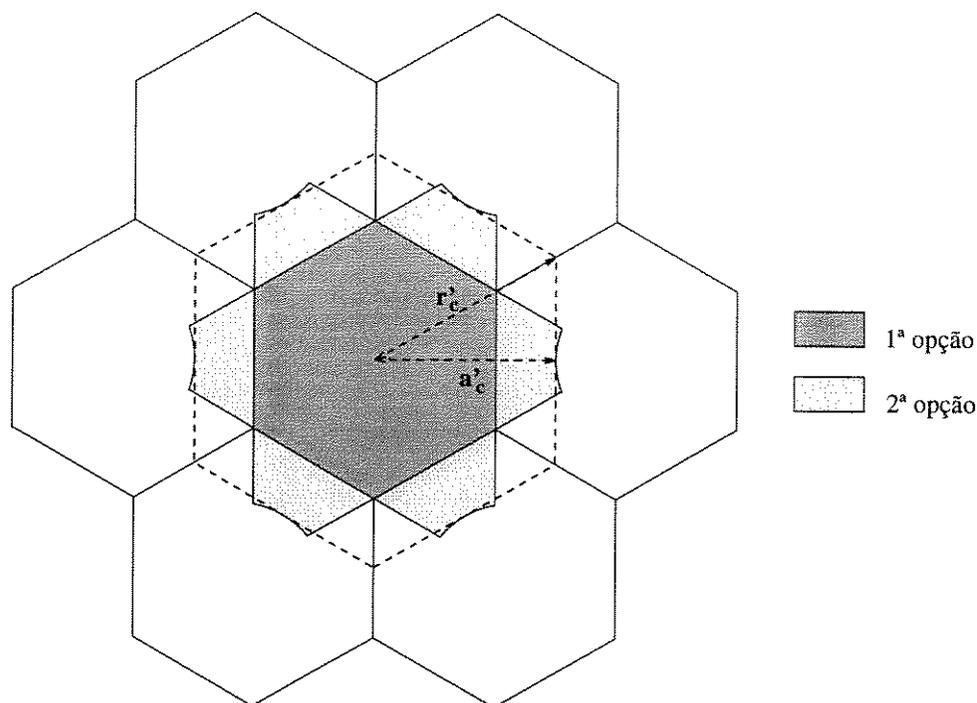


Figura 5.5: A geometria da célula quando do uso de técnicas de encaminhamento alternativo, para $fl = 0,75$.

to alternativo são utilizadas, considerando $fl = 0,75$, ou seja, considerando 75% de área de sobreposição.

Nas Figuras 5.4 e 5.5, é possível comparar a forma geométrica da célula e a aproximação proposta para a forma geométrica da célula, para sistemas de rádio móvel nos quais as técnicas de encaminhamento alternativo são utilizadas. Considerando as aproximações sugeridas, verificamos que os pontos de “pior-caso” situam-se nos vértices do hexágono expandido, ou seja, são os pontos situados à distância, r'_c .

É importante observar que as aproximações sugeridas tem por objetivo fornecer a distância, d_2 , ao transmissor de segunda opção, para os pontos de “pior caso”. Portanto, para avaliar as aproximações sugeridas para a forma geométrica da célula quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo é necessário avaliar a aproximação $d_2 \approx r'_c$.

Na Figura 5.6 compara-se o raio, r'_c , do hexágono expandido e a distância, d_2 , à estação rádio base de segunda opção, para os pontos de “pior caso”, considerando $fl = 0,25$, ou seja, considerando 25% de área de sobreposição.

Na Figura 5.7 compara-se o raio, r'_c , do hexágono expandido e a distância, d_2 , à estação rádio base de segunda opção, para os pontos de “pior caso”, considerando $fl = 0,75$,

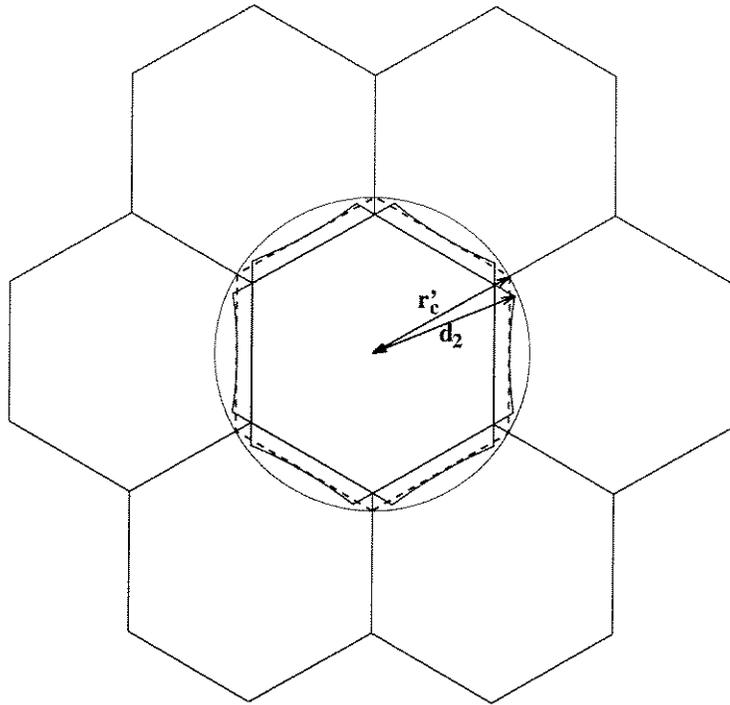


Figura 5.6: Uma aproximação proposta para a distância à estação rádio base de segunda opção para os pontos de “pior caso”, para $fl = 0,25$.

ou seja, considerando 75% de área de sobreposição.

Do ponto de vista da interferência cocanal, os pontos de interesse são os pontos de “pior caso”, e o parâmetro de interesse, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, é a distância à estação rádio base de segunda opção.

Observa-se que o modelo proposto é pessimista, ou seja, $r'_c \geq d_2$. A partir de cálculos geométricos foram obtidos valores aproximados para o erro relativo $(d_2 - r'_c)/r'_c$, dados por: 0% para $fl = 0$; 2,5% para $fl = 0,25$; 10% para $fl = 0,75$, e 15,5% para $fl = 1$.

Portanto, conclui-se que a aproximação proposta para a forma geométrica da célula quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo - o hexágono com raio, r'_c , e apótema, a'_c - é razoável, especialmente considerando-se que valores baixos a médios para a flexibilidade ($0 \leq fl \leq 0,50$) que são usuais.

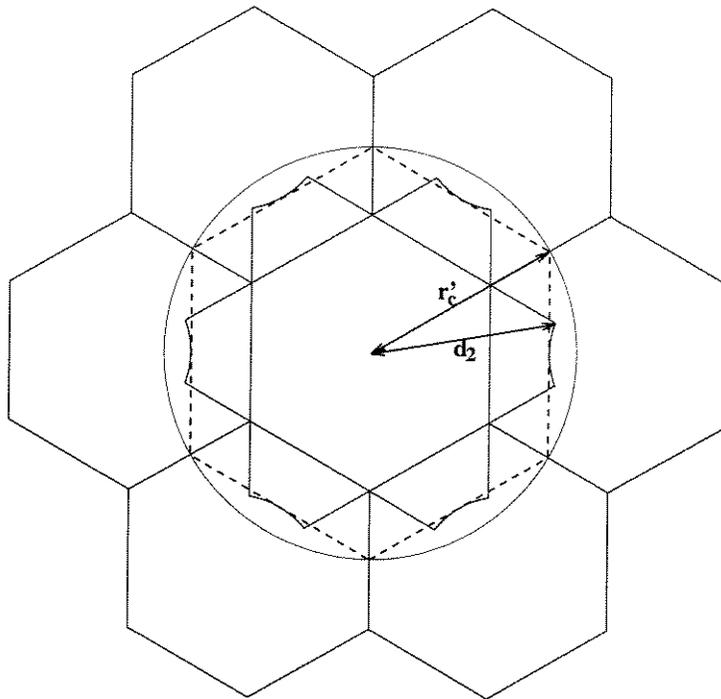


Figura 5.7: Uma aproximação proposta para a distância à estação rádio base de segunda opção para os pontos de “pior caso”, para $fl = 0,75$.

5.4 Parâmetro Margem e Técnicas de Encaminhamento Alternativo

Observou-se, da Equação 5.7, que a margem, Z , depende da posição do rádio móvel considerado. Observou-se também que do ponto de vista da análise de interferência cocanal o foco de atenção dos sistemas de rádio móvel recai sobre os pontos de “pior-caso”, que são os pontos pertencentes a uma determinada célula que estão mais distantes da estação rádio base.

A forma geométrica da célula para sistemas de rádio móvel em que apenas uma opção de encaminhamento é considerada, é dada pela forma geométrica padrão mostrada na Figura 5.1. Observou-se que os pontos de “pior caso”, para a forma geométrica padrão, são os pontos situados à distância, r_c , do transmissor desejado (o transmissor de primeira opção). Considera-se [16] que nestes pontos, todos os transmissores interferentes estão situados à distância, $D - r_c$, do rádio móvel considerado, onde D é a distância entre cocélulas adjacentes. Portanto, obtém-se a margem, Z_{r_c} , dada em decibéis, na distância, r_c , dada por

$$Z_{r_c} = 10 \alpha \log \left(\frac{D - r_c}{r_c} \right) - R_W \tag{5.18}$$

A razão entre a distância, D , entre cocélulas adjacentes e o raio, r_c , da célula é conhecida com distância de reuso normalizada. Assim, obtém-se

$$Z_{r_c} = 10 \alpha \log \left(\frac{D}{r_c} - 1 \right) - R_W \quad (5.19)$$

onde D/r_c é a distância de reuso normalizada. Da Equação 5.19, percebe-se que, para sistemas móveis em que apenas uma opção de encaminhamento é considerada, a margem, Z_{r_c} , é fixa conhecida e definida por projeto.

Observou-se, ainda, que os pontos de “pior caso” para a forma geométrica aproximada quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo são os pontos situados à distância, r'_c , do transmissor desejado (o transmissor de segunda opção). Considerando-se, ainda, que nestes pontos todos os transmissores interferentes estão situados à distância, $D - r'_c$, do rádio móvel considerado, obtém-se, portanto, a margem, $Z_{r'_c}$, dada em decibéis, na distância, r'_c , dada por

$$Z_{r'_c} = 10 \alpha \log \left(\frac{D - r'_c}{r'_c} \right) - R_W \quad (5.20)$$

Assim, das Equações 5.16 e 5.18, obtém-se

$$Z_{r'_c} = 10 \alpha \log \left(\frac{D}{r_c} \frac{1}{1 + \frac{h-1}{h+1}} - 1 \right) - R_W \quad (5.21)$$

onde h é a razão de distância, dada pela Equação 5.17.

Da Equação 5.21, percebe-se que para sistemas móveis nos quais uma segunda opção de encaminhamento é considerada, a margem, $Z_{r'_c}$, dada em decibéis, depende da razão de distância, h , ou seja, depende da flexibilidade, fl .

Ainda, das Equações 5.19 e 5.21, obtém-se a margem, $Z_{r'_c}$, dada em decibéis, dada por

$$Z_{r'_c} = 10 \alpha \log \left(\frac{1 + 10^{\frac{Z_{r_c} + R_W}{10 \alpha}}}{1 + \frac{h-1}{h+1}} - 1 \right) - R_W \quad (5.22)$$

5.5 Probabilidade de Interferência Cocanal e Técnicas de Encaminhamento Alternativo - Considerações Gerais.

Para a análise da probabilidade de interferência cocanal para sistemas de rádio móvel nos quais as técnicas de encaminhamento alternativo são utilizadas, deve-se observar que:

- A probabilidade de interferência cocanal total depende do bloqueio da célula.
- O bloqueio da célula sofre alterações quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo (veja Secção 4.3).
- A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes depende da margem, Z , dada em decibéis.
- A margem, Z , dada em decibéis, depende da posição do rádio móvel considerado.
- Do ponto de vista da interferência cocanal é importante analisar os pontos de “pior caso” que, para sistemas móveis nos quais apenas uma possibilidade de encaminhamento é considerada, são os vértices do hexágono.
- A geometria do sistema de rádio móvel sofre alterações quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo.
- Quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, levando-se em consideração as alterações da forma geométrica da célula, observa-se que os pontos de “pior caso” são os vértices do hexágono expandido.
- A margem foi avaliada para os pontos de “pior caso” tanto para sistemas de rádio móvel em que apenas uma opção de encaminhamento é considerada quanto para sistemas de rádio móvel em que uma segunda opção de encaminhamento é considerada.

5.6 Probabilidade de Interferência Cocanal e Técnicas de Encaminhamento Alternativo

Das Equações 3.12, 3.13 e 3.14, obtém-se a probabilidade, $P(IC)$, de interferência cocanal total expressa por

$$P(IC) = \sum_{n=0}^N P(IC | \mathbf{n} = n) \binom{N}{n} B_c^{\frac{n}{N_c}} \left(1 - B_c^{\frac{1}{N_c}}\right)^{N-n} \quad (5.23)$$

onde $P(IC | \mathbf{n} = n)$ é a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número, \mathbf{n} , de sinais interferentes ativos; N é o número de cocanais considerados;¹ B_c é probabilidade de bloqueio da célula, e N_c é o número de canais por célula.

¹Em geral, consideram-se apenas os seis cocanais mais próximos, ou seja, tem-se $N = 6$.

Obtém-se ainda, para sistemas nos quais a interferência é a maior preocupação, a probabilidade de interferência, $P(IC)$, cocanal total expressa por

$$P(IC) = \sum_{n=1}^N P(IC | \mathbf{n} = n) \binom{N}{n} B_c^{\frac{n}{N_c}} \left(1 - B_c^{\frac{1}{N_c}}\right)^{N-n} \quad (5.24)$$

Das Equações 5.23 e 5.24, percebe-se que tanto as alterações da probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de sinais interferentes ativos quanto as alterações do bloqueio, B_c , da célula, que ocorrem quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, exercem influência sobre a probabilidade, $P(IC)$, de interferência cocanal total. As alterações do bloqueio da célula para sistemas móveis quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo já foram avaliadas na Secção 4.3. A avaliação das alterações da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes ativos quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo necessita ser feita.

5.7 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Técnicas de Encaminhamento Alternativo

O cálculo da probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo é feito para os pontos de “pior caso”.

Para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”, em qualquer um dos ambientes de rádio móvel, é necessário obter a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes em função da margem, $Z_{r'_c}$, dada em decibéis, na distância, r'_c .

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes foi exaustivamente avaliada para diversos ambientes de rádio móvel. Avalia-se, então, a título de exemplo e fazendo uso do Método G, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh.

O cálculo da probabilidade de interferência cocanal a partir dos resultados obtidos no Método G apresenta uma modelagem menos carregada e inclui a modelagem de três ambientes de rádio móvel. Por este motivo o Método G foi escolhido.

5.7.1 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Nakagami/Nakagami

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”, em ambiente Nakagami/Nakagami, obtida a partir da Equação 3.142, é dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{\Gamma(m + \mu n)}{\Gamma(m) \Gamma(\mu n)} \int_0^{\frac{m}{m + \mu 10^{\frac{1}{10} Z_{r'_c}}}} u^{m-1} (1 - u)^{\mu n - 1} du \quad (5.25)$$

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.22.

Assim, das Equações 5.17, 5.22 e 5.25, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes, mostradas nas Figuras 5.8 e 5.9. O grau de desvanecimento do sinal desejado e o grau de desvanecimento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $m = \mu$. Considera-se $Z_{r_c} = 20$ dB e $\alpha = 4$. Considera-se, ainda, na Figura 5.8, $R_W = 8$ dB, e na Figura 5.9, $R_W = 20$ dB.

5.7.2 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Nakagami/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”, em ambiente Nakagami/Rayleigh, obtida a partir da Equação 3.143, é dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = \frac{\Gamma(m + n)}{\Gamma(m) \Gamma(n)} \int_0^{\frac{m}{m + 10^{\frac{1}{10} Z_{r'_c}}}} u^{m-1} (1 - u)^{n-1} du \quad (5.26)$$

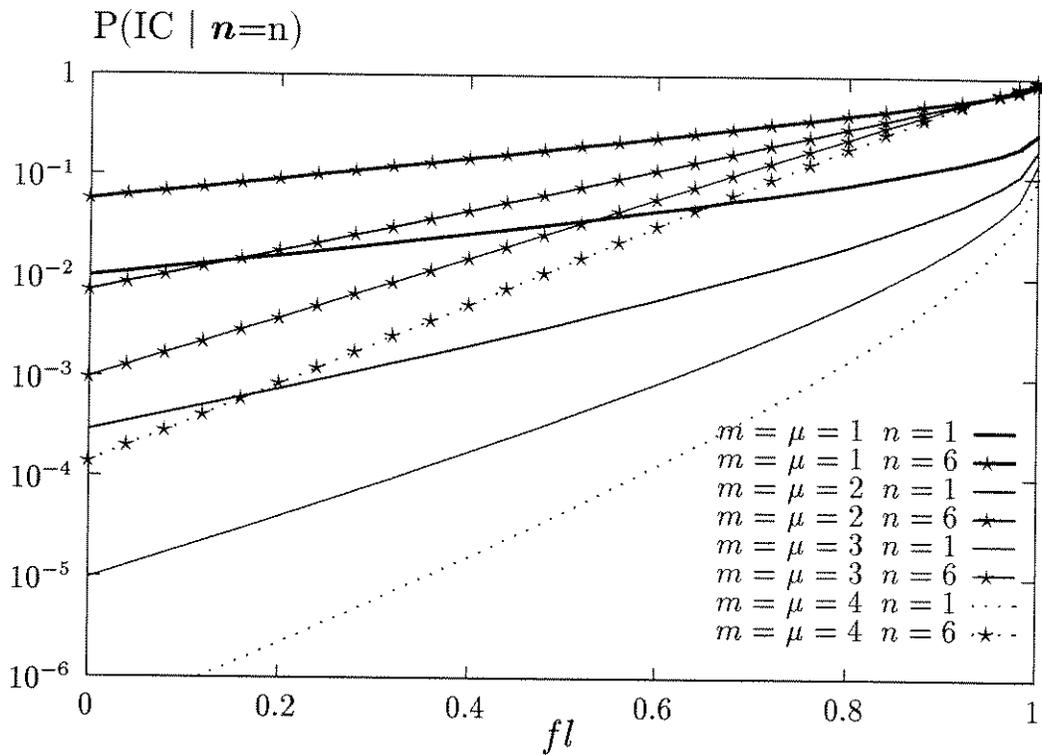


Figura 5.8: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{r_c} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes existentes; o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $\alpha = 4$.

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.22.

Assim, das Equações 5.17, 5.22 e 5.26, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes existentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, mostradas na Figura 5.10. Considera-se $Z_{r_c} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB.

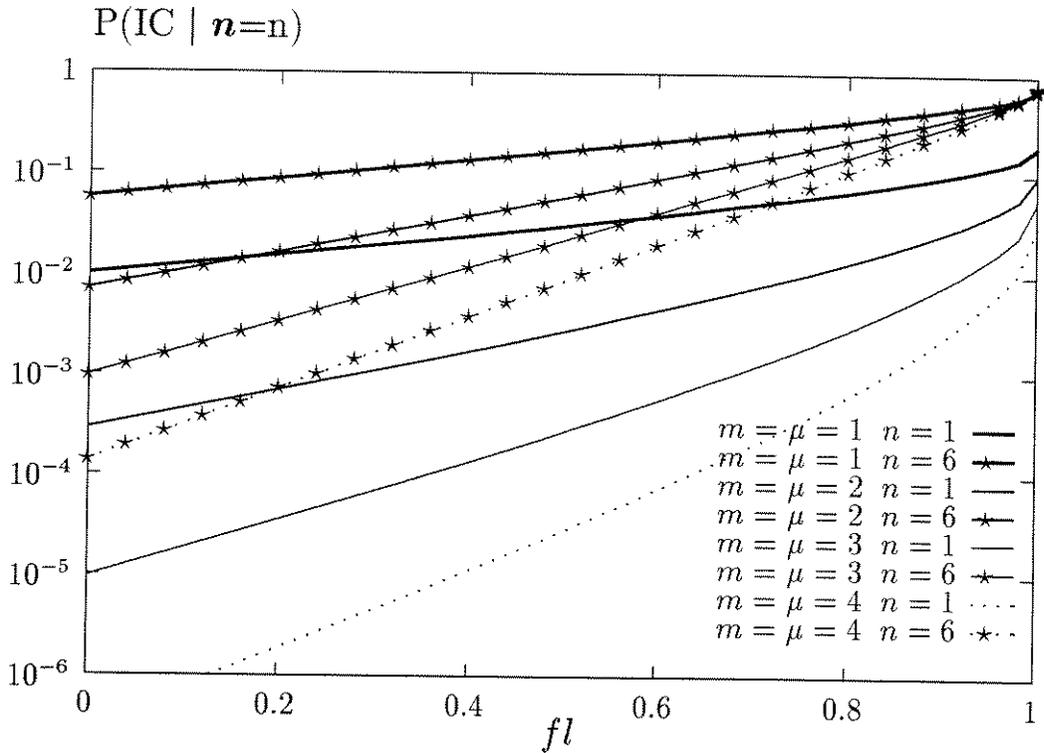


Figura 5.9: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{r_c} = 20$ dB e $R_W = 20$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes existentes; o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $\alpha = 4$.

5.7.3 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Rayleigh/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtida a partir da Equação 3.144, é dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = 1 - \left[\frac{10^{\frac{1}{10}Z_{r'_c}}}{1 + 10^{\frac{1}{10}Z_{r'_c}}} \right]^n \quad (5.27)$$

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.22.

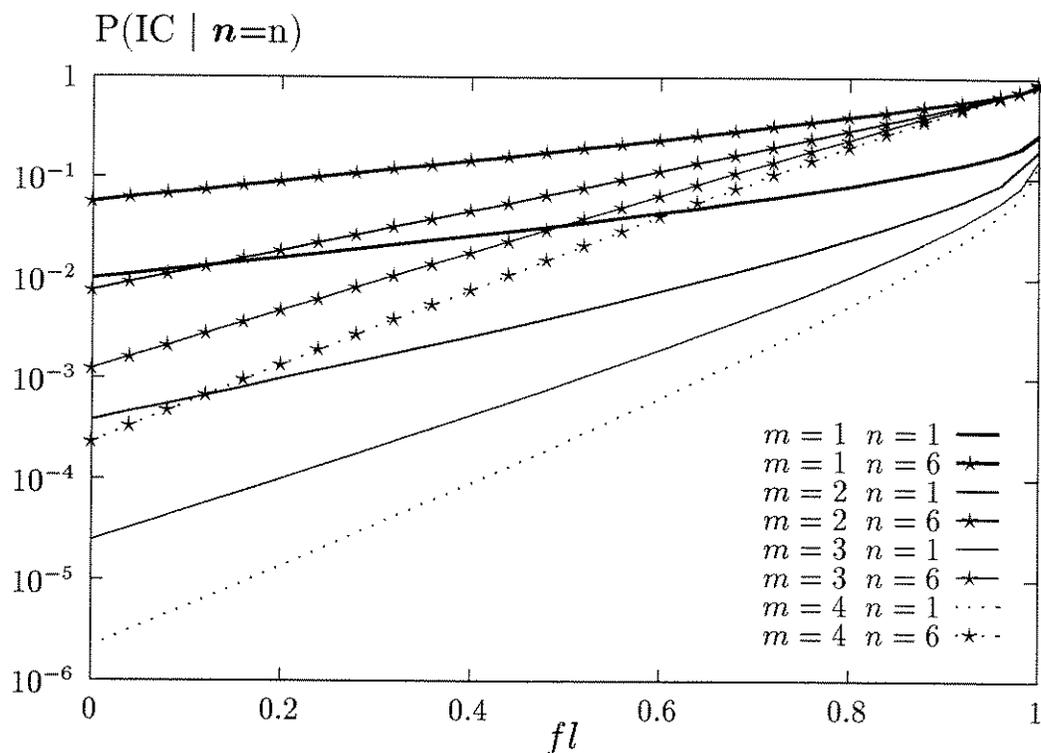


Figura 5.10: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{r_c} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes existentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\alpha = 4$.

Assim, das Equações 5.17, 5.22 e 5.27, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetro o número, n , de sinais interferentes existentes, mostradas na Figura 5.11. Considera-se $Z_{r_c} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB.

5.7.4 Comentários e Conclusões

Avaliou-se, a título de exemplo e fazendo uso do Método G, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”,

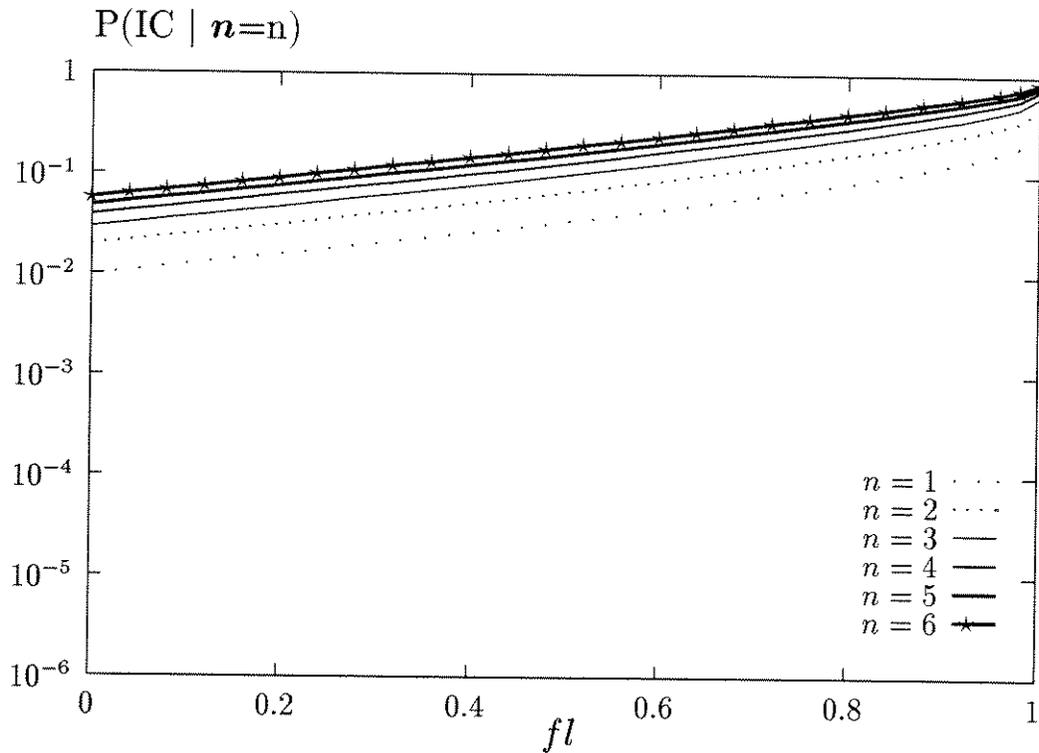


Figura 5.11: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{rc} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetro o número, n , de sinais interferentes existentes. Considera-se, ainda, $\alpha = 4$.

nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh. Assim, foram obtidas as curvas mostradas nas Figuras 5.8-5.11.

Da comparação das Figuras 5.8 e 5.9, observa-se que a influência da razão de proteção, R_W , é muito pequena. A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes diminui com o aumento da razão de proteção, R_W , entretanto, esta diminuição é pequena apesar de serem considerados valores típicos extremos dados por $R_W = 8$ dB e $R_W = 20$ dB [5, 11, 19]. Posteriormente, considerou-se apenas um destes valores devido à semelhança dos resultados obtidos. Ainda, devido ao fato de que os resultados obtidos para $R_W = 8$ dB são piores que para $R_W = 20$ dB, preferiu-se dar continuidade ao trabalho utilizando-se $R_W = 8$ dB.

Das Figuras 5.8-5.11 observa-se que a **utilização de técnicas de encaminha-**

mento alternativo implica aumento substancial da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os pontos situados na borda da célula, ou seja, para os pontos de “pior caso”.

Observa-se que este aumento se deve à expansão da célula quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo. Esta expansão implica alteração dos valores da margem para a condição de “pior caso”. Para sistemas de rádio móvel em que apenas uma opção de encaminhamento é considerada, a margem, para os pontos de “pior caso”, é dada pela margem, Z_{r_c} , dada em decibéis, na distância, r_c . Para sistemas de rádio móvel em que uma segunda opção de encaminhamento é considerada, a margem, para os pontos de “pior caso”, é dada pela margem, $Z_{r'_c}$, dada em decibéis, na distância, r'_c . É importante observar, nas Equações 5.17 e 5.22, que a margem, $Z_{r'_c}$, dada em decibéis, na distância, r'_c , diminui com o aumento da flexibilidade, fl . Conclui-se, portanto, que o aumento da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, se deve à diminuição da margem nos pontos de “pior caso”.

Considerando, ainda, que em todos os ambientes descritos no Capítulo 3, a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes aumenta com a diminuição da margem, conclui-se que **o aumento da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo ocorre para todos os ambientes de rádio móvel**. Uma avaliação mais detalhada da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para cada um destes ambientes de rádio móvel, pode ser obtida seguindo-se a mesma modelagem descrita até aqui.

É interessante observar que, do ponto de vista da interferência cocanal, o uso das técnicas encaminhamento alternativo em um ambiente de rádio móvel é tanto mais crítico quanto maior a inclinação das curvas da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, no ponto $Z = Z_{r_c}$. Como exemplo, pode-se observar na Figura 3.20 que, para um ambiente Nakagami/Rayleigh, a inclinação das curvas da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, no ponto $Z = 20$ dB, aumenta com o aumento do parâmetro de desvanecimento, m , do sinal desejado. Isto significa que, para um ambiente Nakagami/Rayleigh, o uso das técnicas de encaminhamento alternativo é tanto mais crítico quanto maior for o parâmetro de desvanecimento do sinal desejado. Observa-se na Figura 5.10 que este fato se confirma, ou seja,

a taxa de aumento da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo é tanto maior quanto maior for o parâmetro de desvanecimento do sinal desejado.

5.8 Probabilidade de Interferência Cocanal Total e Técnicas de Encaminhamento Alternativo

O cálculo da probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo é feito para os pontos de “pior caso”.

Para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal total, em qualquer um dos ambientes de rádio móvel, é necessário obter a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes e descondicioná-la fazendo uso da Equação 5.23 (ou da Equação 5.24).

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”, foi avaliada, a título de exemplo e fazendo uso do Método G, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh.

Assim, avalia-se, a título de exemplo e fazendo uso do Método G, a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh.

5.8.1 Probabilidade de Interferência Cocanal Total e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Nakagami/Nakagami

A probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”, em ambiente Nakagami/Nakagami, obtida a partir das Equações 5.24 e 5.25, é dada por

$$P(IC) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{\Gamma(m + \mu n)}{\Gamma(m) \Gamma(\mu n)} \int_0^{\frac{m}{m + \mu 10^{\frac{1}{10} Z_{r'_c}}}} u^{m-1} (1-u)^{\mu n-1} du \right] \binom{N}{n} B_c^{\frac{n}{N_c}} \left(1 - B_c^{\frac{1}{N_c}}\right)^{N-n} \quad (5.28)$$

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.22.

Assim, das Equações 5.17, 5.22 e 5.28, foram obtidas as curvas para a probabilidade

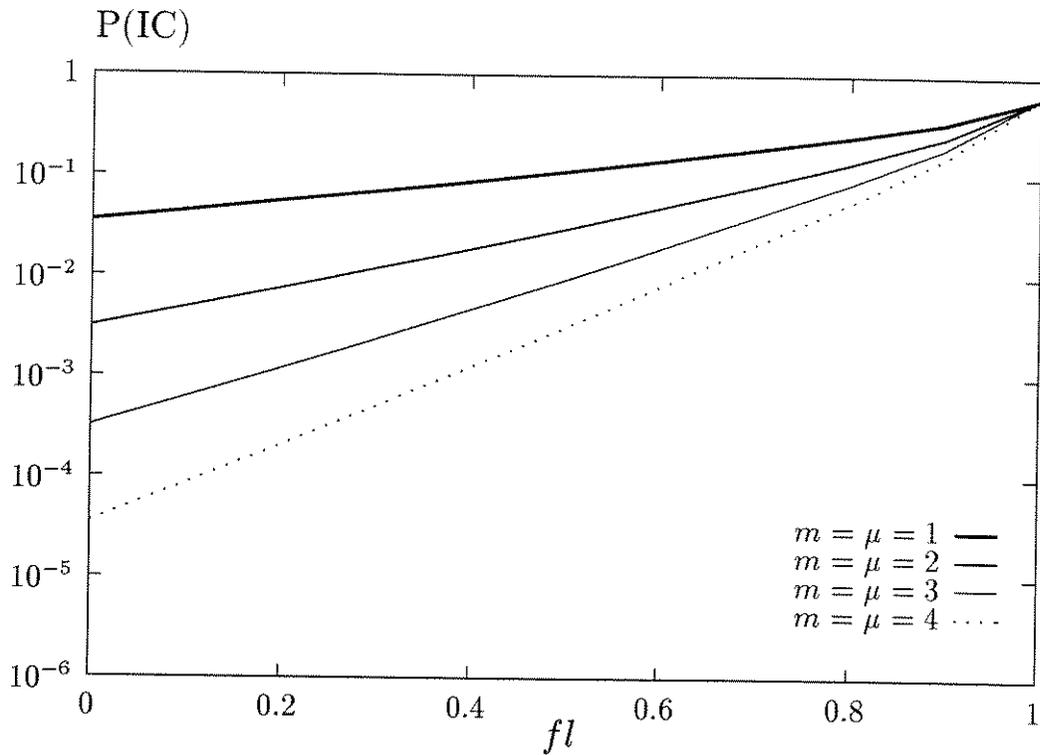


Figura 5.12: Probabilidade de interferência cocanal total quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{rc} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetros o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $\alpha = 4$.

de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetros o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes, mostradas na Figura 5.12. O grau de desvanecimento do sinal desejado e o grau de desvanecimento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $m = \mu$. Considera-se $Z_{rc} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB. Consideram-se, ainda, apenas as seis cocélulas mais próximas, ou seja, $N = 6$. Ainda, considerando $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, obtêm-se os resultados para o bloqueio, B_c , da célula mostrados na Figura 4.3. As curvas mostradas na Figura 5.12 foram obtidas a partir dos resultados para o bloqueio, B_c , da célula, considerando $L = 0$, mostrados na Figura 4.3.

5.8.2 Probabilidade de Interferência Cocanal Total e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Nakagami/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”, em ambiente Nakagami/Rayleigh, obtida a partir das Equações 5.24 e 5.26, é dada por

$$P(IC) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{\Gamma(m+n)}{\Gamma(m)\Gamma(n)} \int_0^{\frac{m}{m+10^{\frac{1}{10}} Z_{r'_c}}} u^{m-1} (1-u)^{n-1} du \right] \binom{N}{n} B_c^{\frac{n}{N_c}} \left(1 - B_c^{\frac{1}{N_c}}\right)^{N-n} \quad (5.29)$$

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.22.

Assim, da Equação 5.17, 5.22 e 5.29, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, mostradas na Figura 5.13. Considera-se $Z_{r_c} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB. Consideram-se, ainda, apenas as seis cocélulas mais próximas, ou seja, $N = 6$. As curvas mostradas na Figura 5.13 foram obtidas a partir dos resultados para o bloqueio, B_c , da célula, considerando $L = 0$, mostrados na Figura 4.3.

5.8.3 Probabilidade de Interferência Cocanal Total e Técnicas de Encaminhamento Alternativo em Ambiente Rayleigh/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtida a partir das Equações 5.24 e 5.27, é dada por

$$P(IC) = \sum_{n=1}^N \left[1 - \left[\frac{10^{\frac{1}{10}} Z_{r'_c}}{1 + 10^{\frac{1}{10}} Z_{r'_c}} \right]^n \right] \binom{N}{n} B_c^{\frac{n}{N_c}} \left(1 - B_c^{\frac{1}{N_c}}\right)^{N-n} \quad (5.30)$$

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.22.

Assim, das Equações 5.17, 5.22 e 5.30, foi obtida a curva para a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , mostrada na Figura 5.14. Considera-se $Z_{r_c} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB. Consideram-se, ainda, apenas as seis cocélulas mais próximas, ou seja, $N = 6$. As curvas mostradas na Figura 5.14 foram obtidas a partir dos resultados para o bloqueio, B_c , da célula, considerando $L = 0$, mostrados na Figura 4.3.

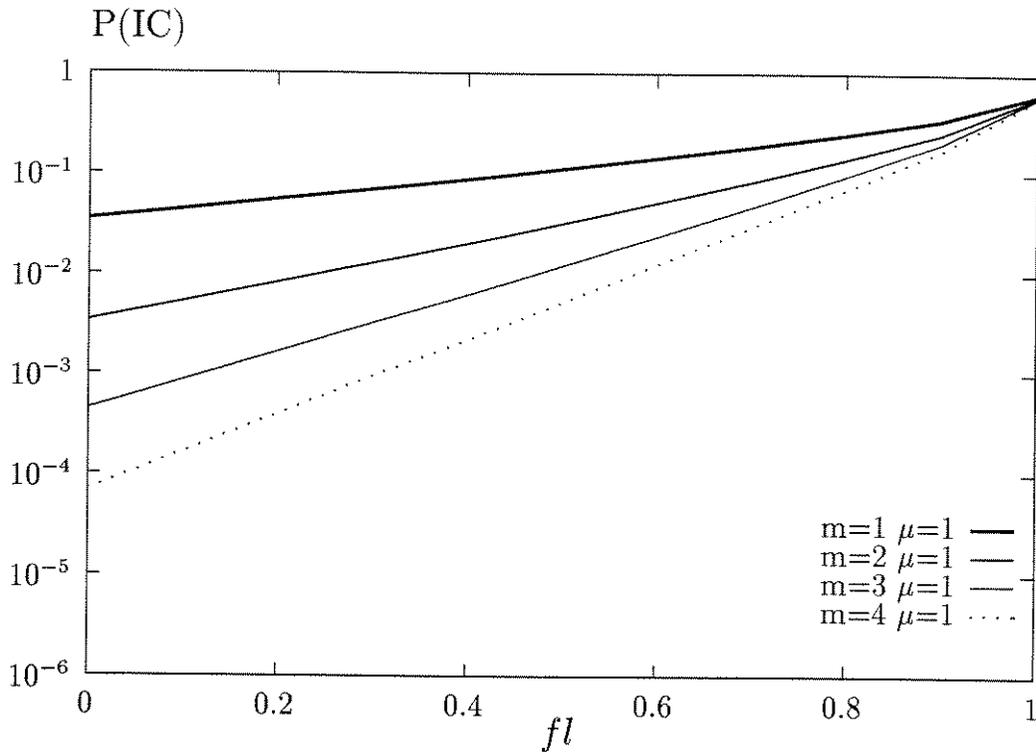


Figura 5.13: Probabilidade de interferência cocanal total quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{rc} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetro o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\alpha = 4$.

5.8.4 Comentários e Conclusões

Avaliou-se, a título de exemplo e fazendo uso do Método G, a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, para os pontos de “pior caso”, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh. Assim, foram obtidas as curvas mostradas nas Figuras 5.12-5.14.

Das Figuras 5.12-5.14 observa-se que a utilização de técnicas de encaminhamento alternativo implica aumento substancial da probabilidade de interferência cocanal total, para os pontos situados na borda da célula, ou seja, para os pontos de “pior caso”. Observa-se que este aumento se deve à expansão da célula quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo e, portanto, ocorre para todos os ambientes de rádio móvel.

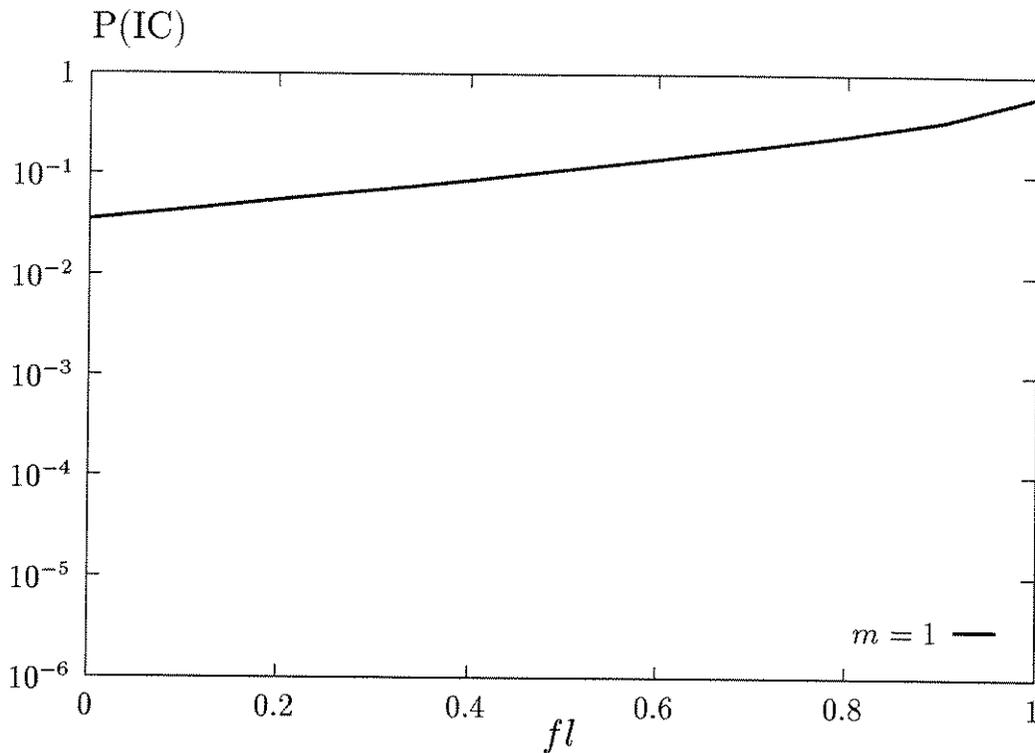


Figura 5.14: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{rc} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB. Considere-se, ainda, $\alpha = 4$.

Uma avaliação mais detalhada da probabilidade de interferência cocanal total, para cada um dos demais ambientes de rádio móvel, pode ser obtida seguindo-se a mesma modelagem descrita até aqui. Ainda, é interessante observar que, do ponto de vista da interferência cocanal, o uso das técnicas encaminhamento alternativo em um ambiente de rádio móvel é tanto mais crítico quanto maior inclinação das curvas da probabilidade de interferência cocanal total, no ponto $Z = Z_{rc}$.

5.9 Interferência Cocanal, Técnicas de Encaminhamento Alternativo e as Duas Opções de Encaminhamento

Uma forma de avaliar a interferência cocanal, para sistemas de rádio móvel nos quais apenas uma opção de encaminhamento é considerada, é calcular a probabilidade de interferência cocanal para os pontos de “pior caso”. Neste caso, calcular esta probabilidade implica calcular a distância destes pontos até a estação rádio base de primeira opção e calcular a probabilidade de interferência cocanal associada a esta distância. Como apenas uma opção de encaminhamento é possível, cada posição de rádio móvel está associada a apenas uma estação rádio base - a estação rádio base de primeira opção.

Da mesma maneira, uma primeira forma proposta de avaliar a interferência cocanal quando do uso de técnicas de encaminhamento alternativo é calcular a probabilidade de interferência cocanal para os pontos de “pior caso”. Neste caso, calcular esta probabilidade implica calcular a distância destes pontos até a estação rádio base de segunda opção e calcular a probabilidade de interferência cocanal associada a esta distância. Portanto, a posição de “pior caso” está associada a apenas uma estação rádio base - a estação rádio base de segunda opção - o que significa que foi imposta a condição de que o roteamento alternativo seja efetivamente feito.

Os resultados mostrados até aqui para a probabilidade de interferência cocanal quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, portanto, são resultados para um um rádio móvel que:

- Está situado na região de sobreposição.
- Tem sua chamada roteada alternativamente para para a estação rádio base de segunda opção.
- Está situado no ponto mais distante possível da estação rádio base de segunda opção de forma que a comunicação com esta estação rádio base seja ainda adequada.

Uma forma adicional de avaliar a probabilidade de interferência cocanal quando do uso das técnicas de roteamento alternativo é proposta. Sugere-se avaliar esta probabilidade para um rádio móvel situado em um dos pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada, considerando que este rádio móvel tem sua chamada roteada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de roteamento

alternativo. A probabilidade de interferência cocanal para estes pontos é dada por uma ponderação da probabilidade de interferência cocanal associada à distância destes pontos até a estação rádio base de primeira opção e da probabilidade de interferência cocanal associada à distância destes pontos até a estação rádio base de segunda opção. Esta ponderação é feita levando-se em consideração a probabilidade de efetivo roteamento alternativo desta chamada. Considerando que nestes pontos a chamada pertence à corrente de tráfego flexível, sabe-se que esta chamada só será roteada alternativamente se forem cumpridos os critérios exigidos pelo algoritmo de alocação de canais.

5.10 Probabilidade de Decisão de Roteamento Alternativo

Duas condições devem ser satisfeitas para que uma chamada seja efetivamente roteada alternativamente:

- A chamada deve pertencer à corrente de tráfego flexível.
- Os critérios para que o algoritmo de alocação de canais tome a decisão de procurar, para servir ao tráfego flexível, a célula com a qual este possui segunda melhor comunicação devem ser satisfeitos.

Assim, considerando que uma chamada pertence à corrente de tráfego flexível, a probabilidade de que o algoritmo tome a decisão de encaminhar alternativamente esta chamada é dada pela probabilidade, $P(DRA)$, de decisão de roteamento alternativo.

Como já foi visto no Capítulo 4, esta decisão é tomada de acordo com a técnica de encaminhamento alternativo considerada. Assim, para

- Retentativa Direcionada (Directed Retry) - a decisão é tomada quando a célula com a qual possui melhor comunicação, ou seja, a célula de primeira opção, estiver bloqueada.
- Variação do Limiar de Bloqueio - a decisão é tomada quando o número de canais da célula com a qual possui melhor comunicação, ou seja, da célula de primeira opção, exceder ou igualar o limiar de bloqueio e a célula de segunda opção possuir menor número de canais ocupados que a célula de primeira opção. Ainda, quando o número de canais ocupados na célula de primeira opção for igual ao número de canais ocupados na célula de segunda

opção, a decisão é tomada de acordo com a variante do algoritmo adotada. As duas variantes possíveis são:

- Variante 1: Enviar o tráfego flexível para a célula de primeira opção.
- Variante 2: Repartir o tráfego flexível enviando as chamadas alternadamente para a célula de primeira opção e para a célula de segunda opção.

Considerando o sistema de rádio móvel de duas células, descrito no Capítulo 4, em que são utilizadas as técnicas de encaminhamento alternativo, é possível obter a probabilidade, $P(DRA)$, de que o algoritmo considerado tome a decisão de rotear alternativamente as chamadas, dada por

- Considerando a Variante 1:

$$P(DRA) = \sum_{i=L}^{N_c} \sum_{j=0}^i p_{ij} - \sum_{k=L}^{N_c} p_{kk} \quad (5.31)$$

- Considerando a Variante 2:

$$P(DRA) = \sum_{i=L}^{N_c} \sum_{j=0}^i p_{ij} - \frac{1}{2} \sum_{k=L}^{N_c-1} p_{kk} - p_{N_c N_c} \quad (5.32)$$

É importante lembrar que $\{p_{ij} : i = 0, \dots, N_c \text{ e } j = 0, \dots, N_c\}$, são as probabilidades de estado estacionárias da Cadeia de Markov à tempo contínuo descritas no Capítulo 4.

Assim, das Equações 4.1, 4.2, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.24, 4.25, 4.31, 4.32, 4.36,² 4.38, 5.31 e 5.32, foram otidas as curvas mostradas nas Figuras 5.15 e 5.16.

Nas Figuras 5.15 e 5.16 são mostradas, para o sistema de rádio móvel de duas células, descrito no Capítulo 4, no qual as técnicas de encaminhamento alternativo são utilizadas, as curvas da probabilidade, $P(DRA)$, de decisão de roteamento alternativo, em função da flexibilidade, fl . Considera-se $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula. Na Figura 5.15, considera-se a Variante 1. Na Figura 5.16, considera-se a Variante 2.

É importante observar que, considerando que uma chamada pertence à corrente de tráfego flexível, o algoritmo de alocação de canais:

- Toma a decisão de encaminhar alternativamente esta chamada com probabilidade dada pela probabilidade, $P(DRA)$, de decisão de roteamento alternativo.

²Os termos da matriz \mathcal{C} , dada pela Equação 4.36, são obtidos, com o auxílio de métodos numéricos de inversão de matrizes, a partir dos termos, dados pela Equação 4.32, da matriz \mathcal{A}' , dada pela Equação 4.31.

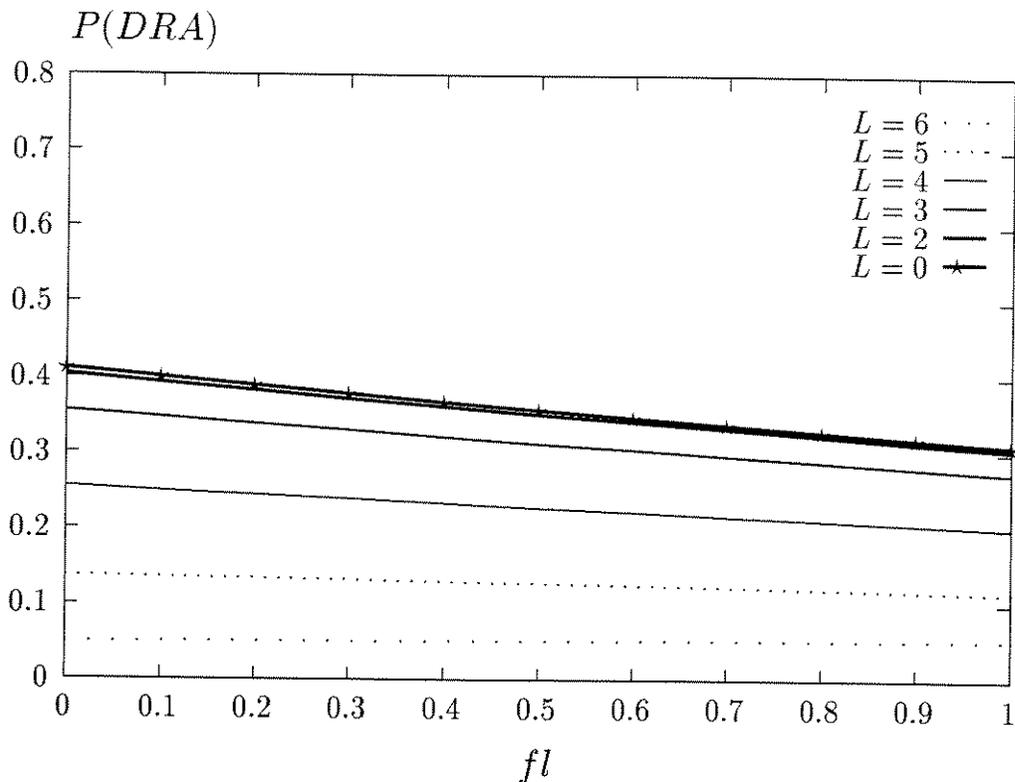


Figura 5.15: Probabilidade de decisão de roteamento alternativo para a Variante 1, em função da flexibilidade, fl , para $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L .

- Toma a decisão de bloquear esta chamada com probabilidade dada pela probabilidade, B_s , probabilidade de bloqueio do sistema.
- Toma a decisão de encaminhar normalmente esta chamada com probabilidade dada pela probabilidade, $P(DRN) = 1 - P(DRA) - B_s$, de decisão de roteamento normal.

5.11 Geometria do Sistema de Rádio Móvel, Técnicas de Encaminhamento Alternativo e as Duas Opções de Encaminhamento

Uma segunda forma de avaliar a probabilidade de interferência cocanal quando do uso das técnicas de roteamento alternativo é calcular a probabilidade de interferência cocanal

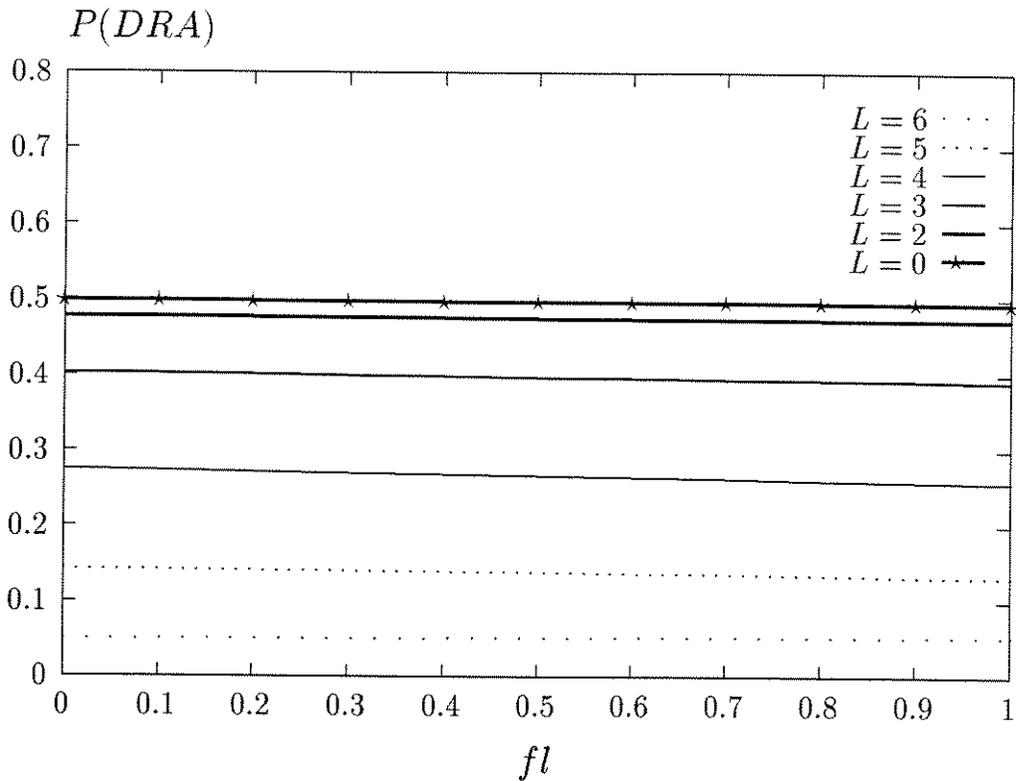


Figura 5.16: Probabilidade de decisão de roteamento alternativo para a Variante 2, em função da flexibilidade, fl , para $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L .

para um rádio móvel situado em um dos pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais a comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada, considerando que este rádio móvel tem sua chamada roteada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo. Para calcular a probabilidade de interferência cocanal em um destes pontos é necessário determinar a distância de um destes pontos até a estação rádio base de primeira opção e a distância de um destes pontos até a estação rádio base de segunda opção. Quando o rádio móvel considerado está sendo encaminhado alternativamente tem-se a situação de “pior caso” e a análise feita anteriormente para a distância, d_2 , do rádio móvel à estação rádio base de segunda opção é válida. Entretanto, quando este rádio móvel está sendo encaminhado normalmente esta não é a situação de “pior caso” e, portanto, torna-se necessário reavaliar a geometria do sistema de rádio móvel de forma a obter a distância, d_1 , do rádio móvel à estação

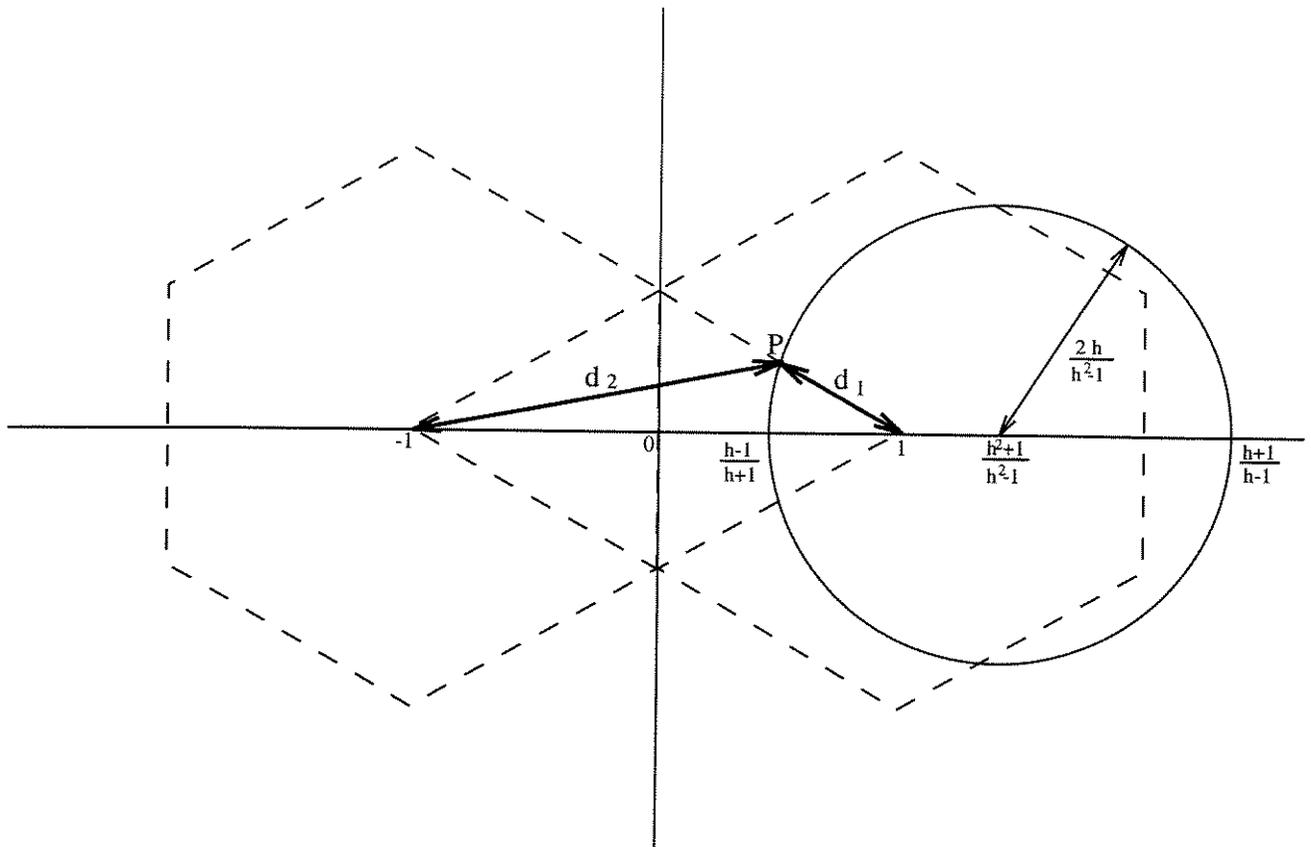


Figura 5.17: As distância entre um rádio móvel situado no ponto P e as estações rádio base de primeira opção e de segunda opção.

rádio base de primeira opção.

A Figura 5.17 mostra a distância, d_1 , do rádio móvel à estação rádio base de primeira opção e a distância, d_2 , do rádio móvel à estação rádio base de segunda opção, a título de exemplo, para o ponto P.

O ponto P é um dos pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais a comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada.

É importante observar, pela simetria da Figura 5.18, que a distância, d_1 , do rádio móvel até a estação rádio base de primeira opção, coincide para o ponto P e para o ponto Q.

Da análise feita anteriormente para a distância, d_2 , do rádio móvel à estação rádio base de segunda opção, para a situação de “pior caso”, observa-se que uma solução possível para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal para um rádio móvel situado no ponto P, considerando que a chamada é encaminhada alternativamente, é obtida utilizando-se uma aproximação para a distância, d_2 , de um rádio móvel situado no ponto P até a estação rádio base

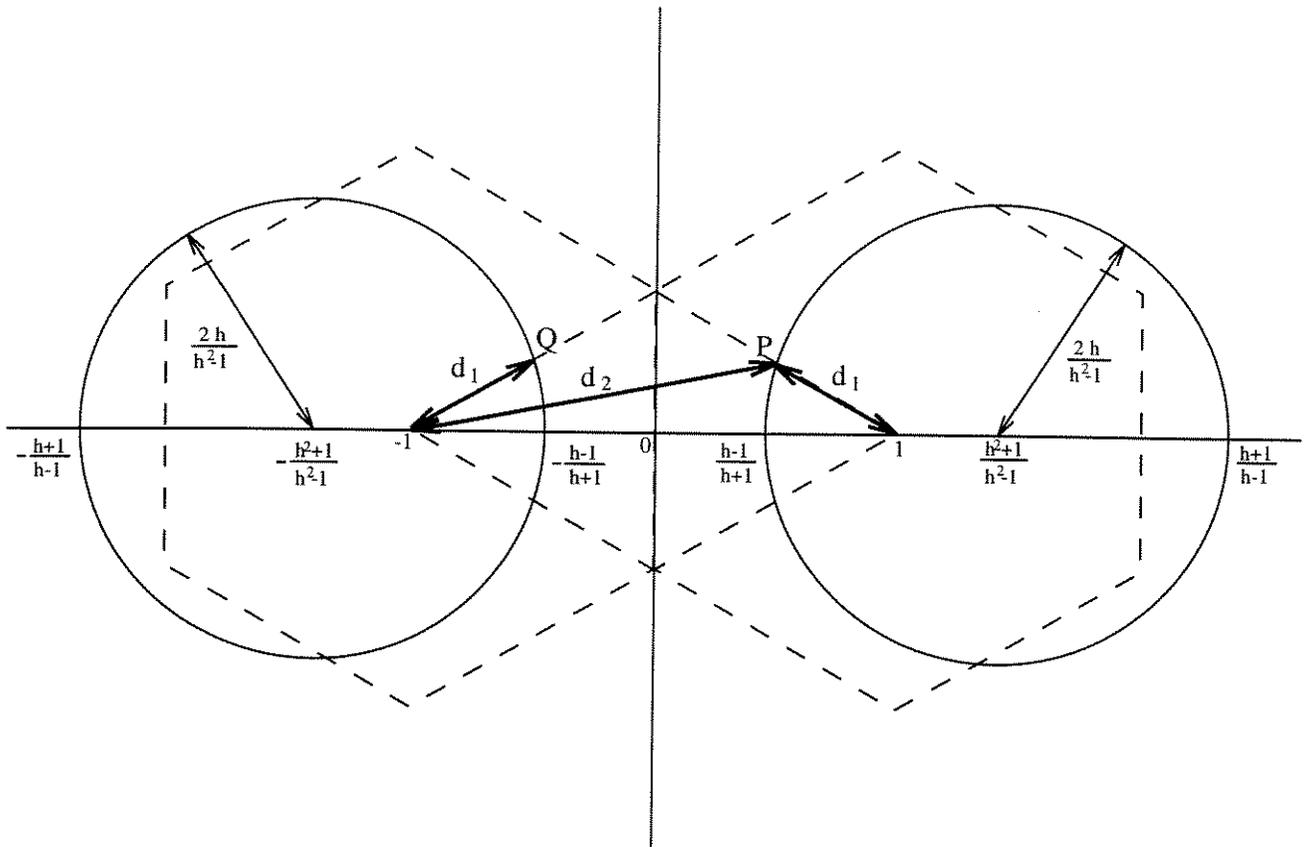


Figura 5.18: A distância entre um rádio móvel situado no ponto Q e a estação rádio base de primeira opção.

de segunda opção, dada por

$$d_2 \approx r'_c = r_c \left(1 + \frac{h-1}{h+1} \right) \quad (5.33)$$

onde h é a razão de distância, dada pela Equação 5.17, aqui repetida por conveniência,

$$h = \frac{2}{\sqrt{1-fl}} - 1 \quad (5.34)$$

Fazendo uso de um hexágono com apótema, a''_c , dado por

$$a''_c = a_c \left(1 - \frac{h-1}{h+1} \right) \quad (5.35)$$

e, portanto, com raio, r''_c , dado por

$$r''_c = r_c \left(1 - \frac{h-1}{h+1} \right) \quad (5.36)$$

mostrado na Figura 5.19, sugere-se, para possibilitar o cálculo da probabilidade de interferência cocanal para um rádio móvel situado ponto Q, considerando que a chamada é encaminhada

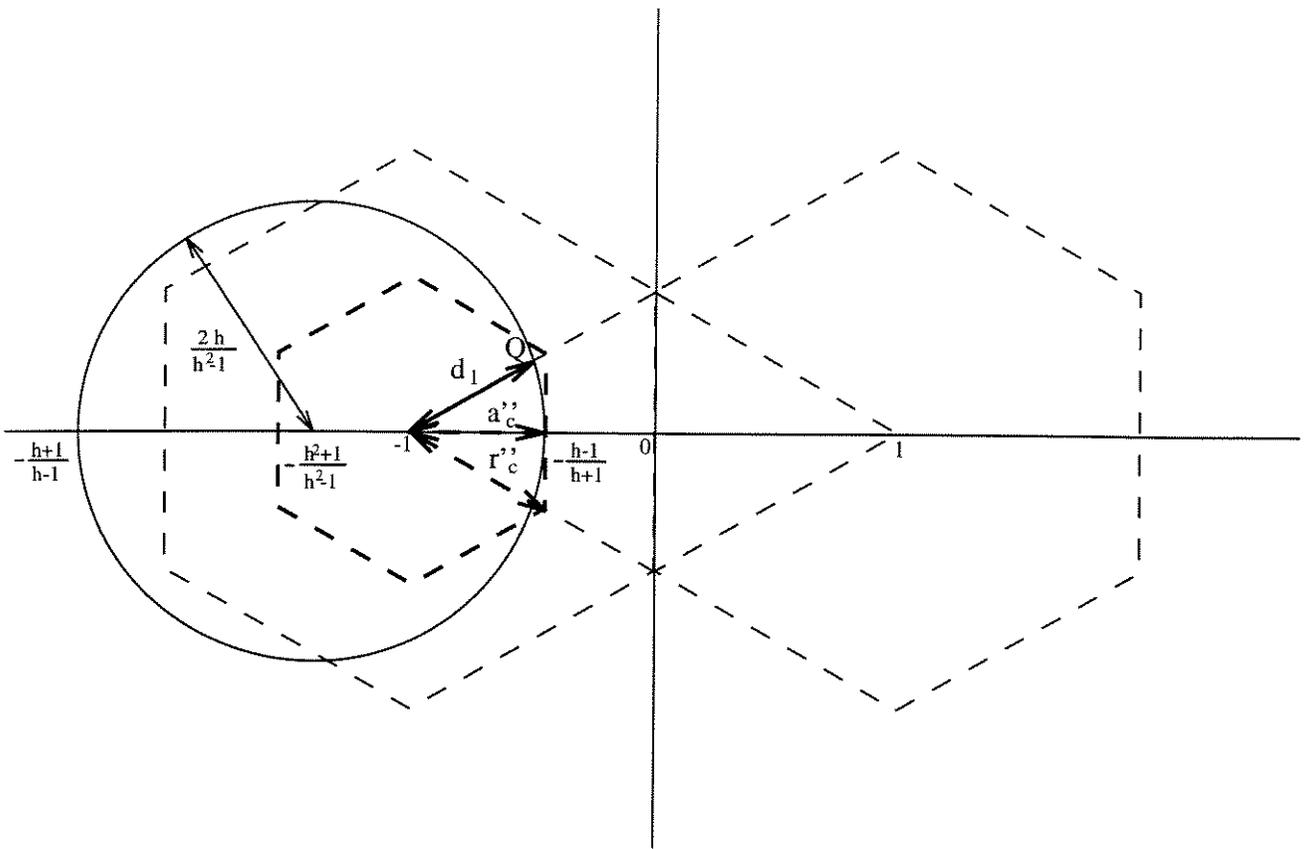


Figura 5.19: Uma aproximação proposta para a distância, d_1 , entre o rádio móvel situado no ponto P e a estação rádio base de primeira opção.

normalmente, utilizar uma aproximação para a distância, d_1 , de um rádio móvel situado no ponto Q até a estação rádio base de primeira opção, dada por

$$d_1 \approx r''_c = r_c \left(1 - \frac{h-1}{h+1} \right) \tag{5.37}$$

onde h é a razão de distância.

Observa-se que para possibilitar o cálculo da probabilidade de interferência cocanal para um rádio móvel situado ponto P, considerando que a chamada é encaminhada normalmente, é possível utilizar também a aproximação para a distância, d_1 , de um rádio móvel situado no ponto P até a estação rádio base de primeira opção, dada pela Equação 5.37.

Observa-se que o modelo proposto é pessimista, ou seja, $r''_c \geq d_1$. A partir de cálculos geométricos foram obtidos valores aproximados para o erro relativo $(d_1 - r''_c)/r''_c$, dados por: 0% para $fl = 0$; 5% para $fl = 0,25$; 12,5% para $fl = 0,75$, e 0% para $fl = 1$.

Portanto, conclui-se que a aproximação proposta para a distância d_1 , de um rádio

móvel situado no ponto P até a estação rádio base de primeira opção, é razoável.

5.12 Parâmetro Margem, Técnicas de Encaminhamento Alternativo e as Duas Opções de Encaminhamento

Observou-se que, considerando que a chamada é encaminhada alternativamente, um rádio móvel situado no ponto P está à distância, r'_c , do transmissor desejado (que é o transmissor de segunda opção). Considerando-se, ainda, que neste ponto todos os transmissores interferentes estão situados à distância, $D - r'_c$, do rádio móvel considerado, obtém-se a margem, $Z_{r'_c}$, dada em decibéis, na distância, r'_c , dada pela Equação 5.22, aqui repetida por conveniência

$$Z_{r'_c} = 10 \alpha \log \left(\frac{1 + 10^{\frac{Z_{r_c} + R_W}{10 \alpha}}}{1 + \frac{h-1}{h+1}} - 1 \right) - R_W \quad (5.38)$$

onde Z_{r_c} é a margem, dada em decibéis, na distância, r_c ; R_W , é a razão de proteção da potência; h é a razão de distâncias, e α é o coeficiente de perda de percurso.

Observa-se que, considerando que a chamada é encaminhada normalmente, um rádio móvel situado no ponto P está à distância, r''_c , do transmissor desejado (que é o transmissor de primeira opção). Considerando-se, ainda, que neste ponto todos os transmissores interferentes estão situados à distância, $D - r''_c$, do rádio móvel considerado, obtém-se, de forma análoga, a margem, $Z_{r''_c}$, dada em decibéis, na distância, r''_c , dada por

$$Z_{r''_c} = 10 \alpha \log \left(\frac{1 + 10^{\frac{Z_{r_c} + R_W}{10 \alpha}}}{1 - \frac{h-1}{h+1}} - 1 \right) - R_W \quad (5.39)$$

Das Equações 5.38 e 5.39, percebe-se que para sistemas móveis nos quais uma segunda opção de encaminhamento é considerada, a margem, $Z_{r'_c}$, dada em decibéis, na distância, r'_c , e a margem, $Z_{r''_c}$, dada em decibéis, na distância, r''_c , dependem da razão de distância, h , ou seja, depende da flexibilidade, fl .

5.13 Probabilidade de Interferência Cocanal, Técnicas de Encaminhamento Alternativo e as Duas Opções de Encaminhamento - Considerações Gerais.

Uma outra forma de avaliar a probabilidade de interferência cocanal para sistemas de rádio móvel quando do uso das técnicas de roteamento alternativo foi proposta. Para esta

avaliação deve-se observar que:

- Como já foi visto na Secção 5.6, tanto as alterações da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes ativos quanto as alterações do bloqueio da célula, que ocorrem quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, exercem influência sobre a probabilidade de interferência cocanal total.
- As alterações do bloqueio da célula para sistemas móveis quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo foram avaliadas na Secção 4.3.
- A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, depende da margem, Z , dada em decibéis.
- A margem, Z , dada em decibéis, depende da posição do rádio móvel considerado.
- Considera-se um rádio móvel situado em um dos pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais a comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada, considerando que este rádio móvel tem sua chamada roteada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de roteamento alternativo.
- Aproximações para as distâncias do rádio móvel considerado até as estações de primeira opção e de segunda opção são propostas.
- A probabilidade de interferência cocanal é dada por uma ponderação da probabilidade de interferência cocanal associada à distância do rádio móvel considerado até a estação rádio base de primeira opção e da probabilidade de interferência cocanal associada à distância do rádio móvel considerado até a estação rádio base de segunda opção. Esta ponderação é feita levando-se em consideração a probabilidade de efetivo roteamento alternativo desta chamada.

5.14 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes, Técnicas de Encaminhamento Alternativo e as Duas Opções de Encaminhamento

O cálculo da probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo é feito para um rádio móvel situado em um dos pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais a comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada, considerando que este rádio móvel tem sua chamada roteada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção, de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo.

Assim, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, é obtida ponderando-se a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RA)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento alternativo da chamada, e a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RN)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento normal da chamada. Assim, obtém-se

$$P(IC | \mathbf{n} = n) = P(IC | \mathbf{n} = n, RA) P(RA) + P(IC | \mathbf{n} = n, RN) P(RN) \tag{5.40}$$

onde

$$P(RA) = \frac{P(DRA)}{P(DRA) + P(DRN)} \tag{5.41}$$

é a probabilidade de que a chamada seja roteada alternativamente;

$$P(RN) = \frac{P(DRN)}{P(DRA) + P(DRN)} \tag{5.42}$$

é a probabilidade de que a chamada seja roteada normalmente;

$$P(DRN) = 1 - P(DRA) - B_s \tag{5.43}$$

é a probabilidade de decisão de roteamento normal; $P(DRA)$ é a probabilidade de decisão de roteamento alternativo, e B_s é a probabilidade de bloqueio do sistema.

Para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes e ao roteamento alternativo da chamada, em qualquer um dos ambientes

de rádio móvel, é necessário obter a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes em função da margem, $Z_{r'_c}$, dada em decibéis, na distância, r'_c .

Para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes e ao roteamento normal da chamada, em qualquer um dos ambientes de rádio móvel, é necessário obter a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes em função da margem, $Z_{r''_c}$, dada em decibéis, na distância, r''_c .

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes foi exaustivamente avaliada para diversos ambientes de rádio móvel. Avalia-se, então, a título de exemplo e fazendo uso do Método G, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh:

- A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes e ao roteamento alternativo da chamada.
- A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes e ao roteamento normal da chamada.
- A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo considerando as duas opções de encaminhamento alternativo.

5.14.1 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Alternativo da Chamada em Ambiente Nakagami/Nakagami

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RA)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento alternativo da chamada, em ambiente Nakagami/Nakagami, obtida a partir da Equação 3.142, é dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n, RA) = \frac{\Gamma(m + \mu n)}{\Gamma(m) \Gamma(\mu n)} \int_0^{\frac{m}{m + \mu 10^{\frac{1}{10} Z_{r'_c}}}} u^{m-1} (1 - u)^{\mu n - 1} du \quad (5.44)$$

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.38.

As curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RA)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento alternativo da chamada,

em ambiente Nakagami/Nakagami, obtidas das Equações 5.34, 5.38 e 5.44, coincidem com as curvas mostradas na Figura 5.8 e 5.9.

5.14.2 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Alternativo da Chamada em Ambiente Nakagami/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RA)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento alternativo da chamada, em ambiente Nakagami/Rayleigh, obtida a partir da Equação 3.143, é dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n, RA) = \frac{\Gamma(m+n)}{\Gamma(m)\Gamma(n)} \int_0^{\frac{m}{m+10^{\frac{1}{10}}Z_{r'_c}}} u^{m-1} (1-u)^{n-1} du \quad (5.45)$$

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.38.

As curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RA)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento alternativo da chamada, em ambiente Nakagami/Rayleigh, obtidas das Equações 5.34, 5.38 e 5.45, coincidem com as curvas mostradas na Figura 5.10.

5.14.3 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Alternativo da Chamada em Ambiente Rayleigh/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RA)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento alternativo da chamada, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtida a partir da Equação 3.144, é dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n, RA) = 1 - \left[\frac{10^{\frac{1}{10}}Z_{r'_c}}{1 + 10^{\frac{1}{10}}Z_{r'_c}} \right]^n \quad (5.46)$$

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.38.

As curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RA)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento alternativo da chamada, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtidas das Equações 5.34, 5.38 e 5.46, coincidem com as curvas mostradas na Figura 5.11.

5.14.4 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Normal da Chamada em Ambiente Nakagami/Nakagami

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RN)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento normal da chamada, em ambiente Nakagami/Nakagami, obtida a partir da Equação 3.142, é dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n, RN) = \frac{\Gamma(m + \mu n)}{\Gamma(m) \Gamma(\mu n)} \int_0^{\frac{m}{m + \mu 10^{\frac{1}{10} Z_{r_c}''}}} u^{m-1} (1 - u)^{\mu n - 1} du \quad (5.47)$$

onde Z_{r_c}'' a margem, dada em decibéis, na distância r_c'' , dada pela Equação 5.39.

Assim, das Equações 5.34, 5.39 e 5.47, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RN)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento normal das chamadas, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes; o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes, mostradas nas Figuras 5.20. O grau de desvanecimento do sinal desejado e o grau de desvanecimento dos sinais interferentes são considerados como sendo idênticos, ou seja, $m = \mu$. Considera-se $Z_{r_c} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB.

5.14.5 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Normal da Chamada em Ambiente Nakagami/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RN)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento normal da chamada, em ambiente Nakagami/Rayleigh, obtida a partir da Equação 3.143, é dada por

$$P(IC | \mathbf{n} = n, RN) = \frac{\Gamma(m + n)}{\Gamma(m) \Gamma(n)} \int_0^{\frac{m}{m + 10^{\frac{1}{10} Z_{r_c}''}}} u^{m-1} (1 - u)^{n-1} du \quad (5.48)$$

onde Z_{r_c}'' a margem, dada em decibéis, na distância r_c'' , dada pela Equação 5.39.

Assim, das Equações 5.34, 5.39 e 5.48, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n, RN)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes e ao roteamento normal da chamada, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes existentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, mostradas na Figura 5.21. Considera-se $Z_{r_c} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB.

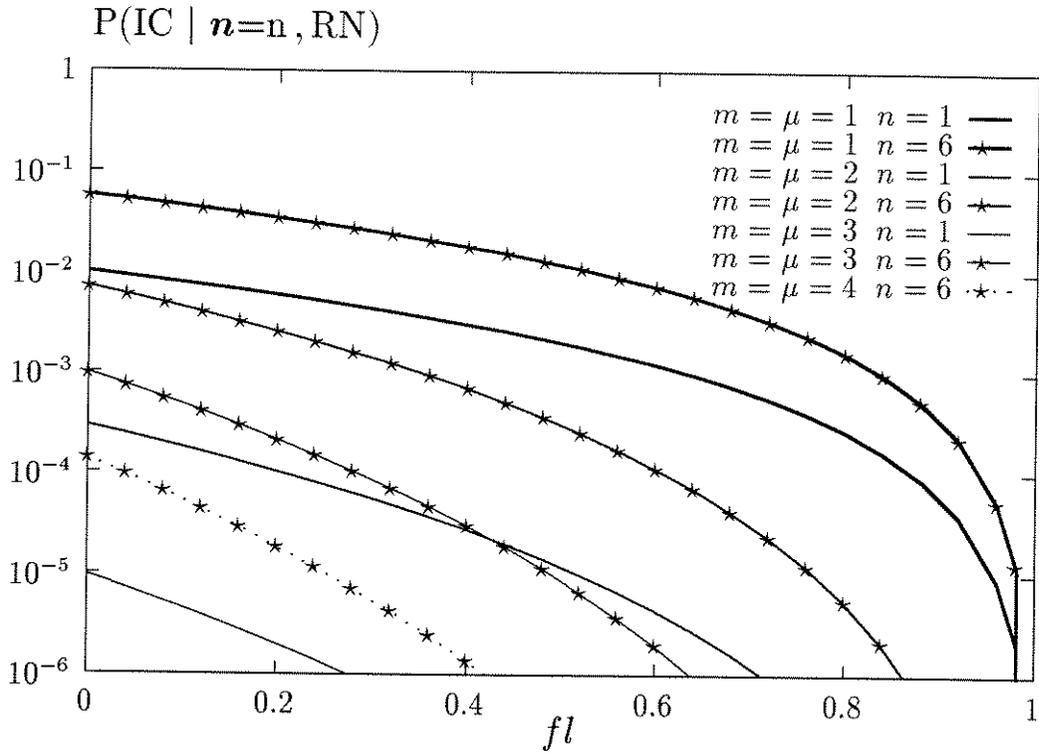


Figura 5.20: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes e ao roteamento normal da chamada, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{r_c} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes existentes; o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado, e o grau de desvanecimento, μ , dos sinais interferentes. Considera-se, ainda, $\alpha = 4$.

5.14.6 Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes e ao Roteamento Normal da Chamada em Ambiente Rayleigh/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n, RN)$, condicional ao número, n , de interferências existentes e ao roteamento normal da chamada, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtida a partir da Equação 3.144, é dada por

$$P(IC | n = n, RN) = 1 - \left[\frac{10^{\frac{1}{10} Z_{r_c}''}}{1 + 10^{\frac{1}{10} Z_{r_c}''}} \right]^n \tag{5.49}$$

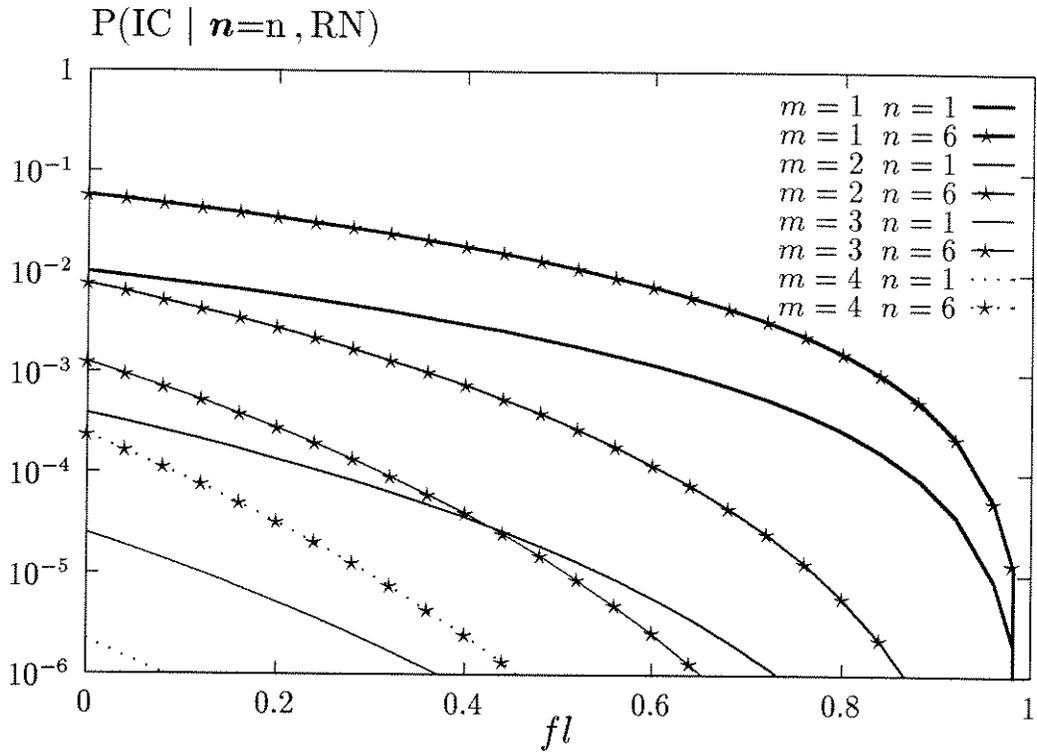


Figura 5.21: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes e ao roteamento normal da chamada, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{r_c} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes existentes e o grau de desvanecimento, m , do sinal desejado. Considera-se, ainda, $\alpha = 4$.

onde $Z_{r_c''}$ a margem, dada em decibéis, na distância r_c'' , dada pela Equação 5.39.

Assim, das Equações 5.34, 5.39 e 5.49, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n, RN)$, condicional ao número, n , de interferências existentes e ao roteamento normal da chamada, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetro o número, n , de sinais interferentes existentes, mostradas na Figura 5.22. Considera-se $Z_{r_c} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB.

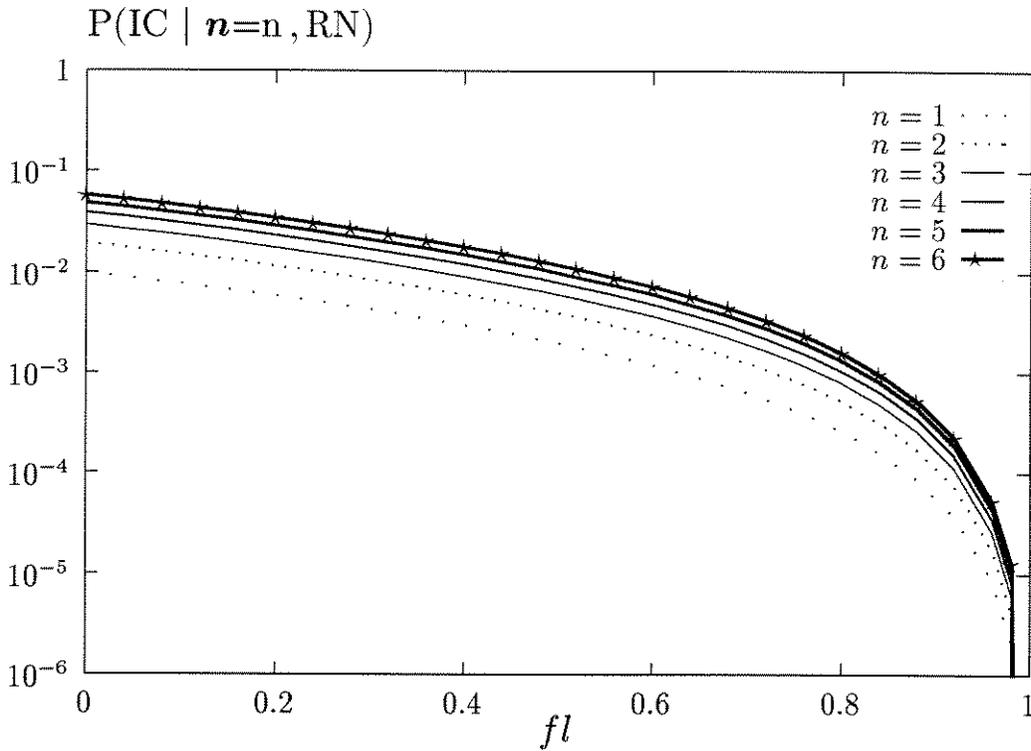


Figura 5.22: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes e ao roteamento normal da chamada, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{rc} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetro o número, n , de sinais interferentes existentes. Considera-se, ainda, $\alpha = 4$.

5.14.7 Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Nakagami/Nakagami

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, considerando que a chamada é roteada para a estação rádio base de primeira opção para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Nakagami, obtida a partir das Equações 5.40, 5.41, 5.42, 5.44 e 5.47, é dada por

$$\begin{aligned}
 P(IC | n=n) = & \frac{P(DRA)}{P(DRA)+P(DRN)} \frac{\Gamma(m+\mu n)}{\Gamma(m) \Gamma(\mu n)} \int_0^{\frac{m}{m+\mu 10^{\frac{1}{10} Z_{rc}'}}} u^{m-1} (1-u)^{\mu n-1} du \\
 & + \frac{P(DRN)}{P(DRA)+P(DRN)} \frac{\Gamma(m+\mu n)}{\Gamma(m) \Gamma(\mu n)} \int_0^{\frac{m}{m+\mu 10^{\frac{1}{10} Z_{rc}''}}} u^{m-1} (1-u)^{\mu n-1} du \quad (5.50)
 \end{aligned}$$

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.38; $Z_{r''_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r''_c , dada pela Equação 5.39; $P(DRN)$ é a probabilidade de decisão de roteamento normal, dada pela Equação 5.43, e $P(DRA)$ é a probabilidade de decisão de roteamento alternativo.

Assim, das Equações 5.34, 5.38, 5.39, 5.43 e 5.50, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o limiar de bloqueio, L , mostradas nas Figuras 5.23 e 5.24. Considera-se $m = \mu = 3$, $Z_{r_c} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB. Ainda, considerando $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, obtêm-se os resultados para o bloqueio, B_s , do sistema, mostrados na Figura 4.4, e os resultados para a probabilidade, $P(DRA)$, de decisão de roteamento alternativo, mostrados nas Figuras 5.15 e 5.16. As curvas mostradas nas Figuras 5.23 e 5.24 foram obtidas a partir dos resultados para o bloqueio, B_s , do sistema, mostrados na Figura 4.4, e para a probabilidade, $P(DRA)$, de decisão de roteamento alternativo, mostrados nas Figuras 5.15 e 5.16. Considera-se na Figura 5.23, a Variante 1, e na Figura 5.24, a Variante 2.

5.14.8 Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Nakagami/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes, considerando que a chamada é roteada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de roteamento alternativo, em ambiente Nakagami/Rayleigh, obtida a partir das Equações 5.40, 5.41, 5.42, 5.45 e 5.48, é dada por

$$\begin{aligned}
 P(IC | \mathbf{n} = n) &= \frac{P(DRA)}{P(DRA) + P(DRN)} \frac{\Gamma(m+n)}{\Gamma(m)\Gamma(n)} \int_0^{\frac{m}{m+10 \frac{1}{10} Z_{r'_c}}} u^{m-1} (1-u)^{n-1} du \\
 &+ \frac{P(DRN)}{P(DRA) + P(DRN)} \frac{\Gamma(m+n)}{\Gamma(m)\Gamma(n)} \int_0^{\frac{m}{m+10 \frac{1}{10} Z_{r''_c}}} u^{m-1} (1-u)^{n-1} du \quad (5.51)
 \end{aligned}$$

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.38; $Z_{r''_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r''_c , dada pela Equação 5.39; $P(DRN)$ é a probabilidade de decisão de roteamento normal, dada pela Equação 5.43, e $P(DRA)$ é a probabilidade de decisão de roteamento alternativo.

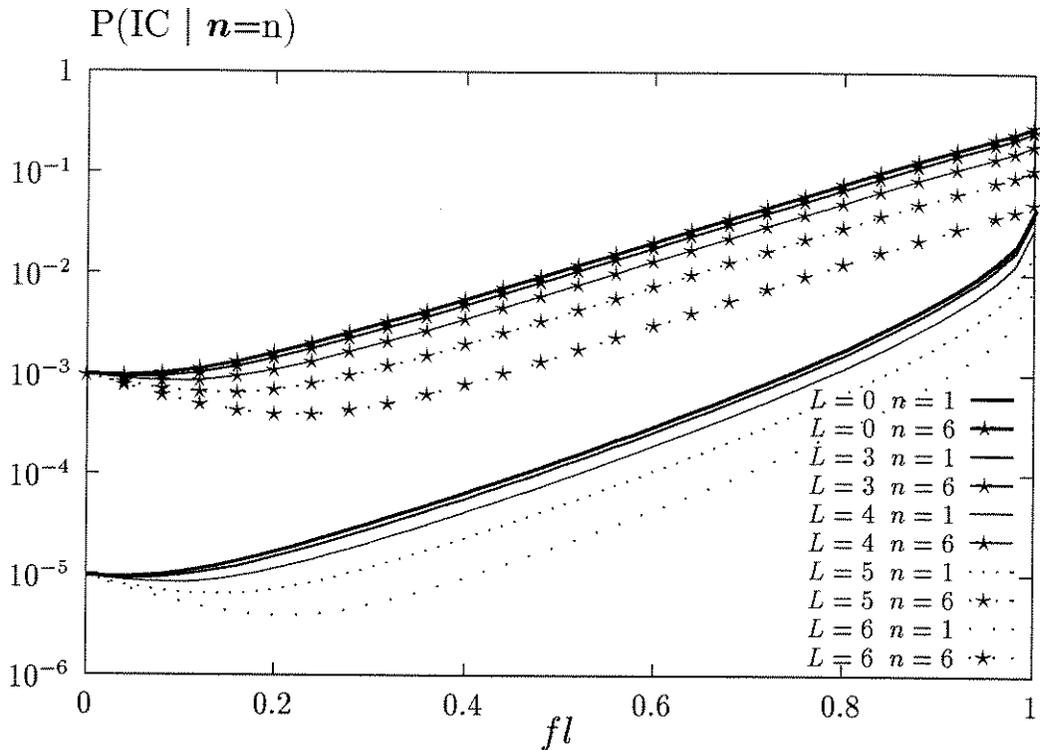


Figura 5.23: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{r_c} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes existentes e o limiar de bloqueio, L , considerando a Variante 1. Considera-se, ainda, $m = \mu = 3$ e $\alpha = 4$.

Assim, das Equações 5.34, 5.38, 5.39, 5.43 e 5.51, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetros o número, n , de interferências existentes e o limiar de bloqueio, L , mostradas na Figura 5.25. Considera-se $m = 3$, $Z_{r_c} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB. As curvas mostradas na Figura 5.25 foram obtidas a partir dos resultados para o bloqueio, B_s , do sistema, mostrados na Figura 4.4, e para a probabilidade, $P(DRA)$, de decisão de roteamento alternativo, mostrados na Figura 5.16, ou seja, considera-se, a Variante 2.

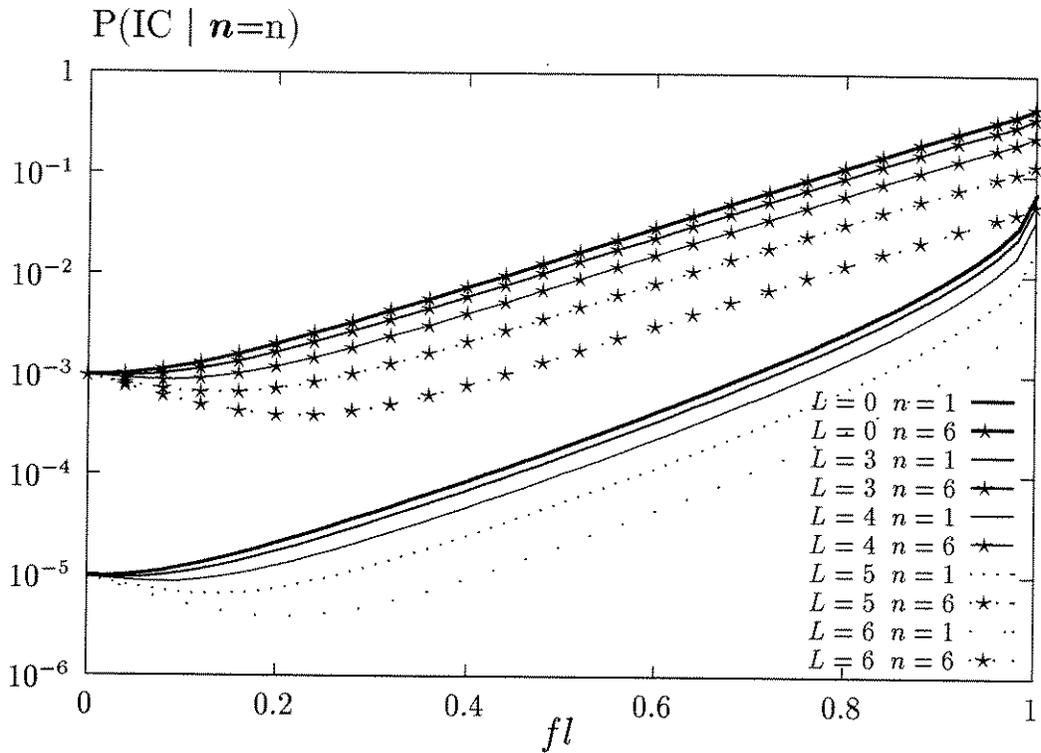


Figura 5.24: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{rc} = 20$ dB e $R_W = 20$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes existentes e o limiar de bloqueio, L , considerando a Variante 2. Considera-se, ainda, $m = \mu = 3$ e $\alpha = 4$.

5.14.9 Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Cocanal Condicional ao Número de Sinais Interferentes Existentes em Ambiente Rayleigh/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes, considerando que a chamada é roteada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de roteamento alternativo, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, obtida a partir das

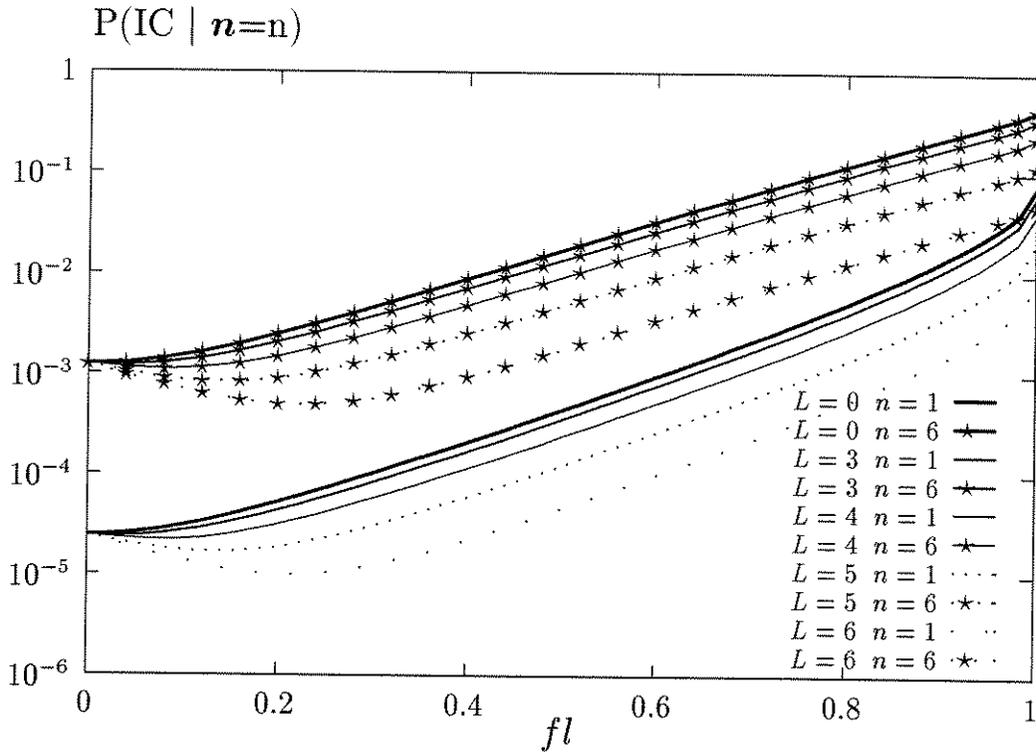


Figura 5.25: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{r_c} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetros o número, n , de sinais interferentes existentes e o limiar de bloqueio, L , considerando a Variante 2. Considera-se, ainda, $m = 3$ e $\alpha = 4$.

Equações 5.40, 5.41, 5.42, 5.46 e 5.49, é dada por

$$\begin{aligned}
 P(IC | n=n) = & 1 - \frac{P(DRA)}{P(DRA)+P(DRN)} \left[\frac{10^{\frac{1}{10}Z_{r'_c}}}{1 + 10^{\frac{1}{10}Z_{r'_c}}} \right]^n \\
 & - \frac{P(DRN)}{P(DRA)+P(DRN)} \left[\frac{10^{\frac{1}{10}Z_{r''_c}}}{1 + 10^{\frac{1}{10}Z_{r''_c}}} \right]^n
 \end{aligned} \tag{5.52}$$

onde $Z_{r'_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r'_c , dada pela Equação 5.38; $Z_{r''_c}$ a margem, dada em decibéis, na distância r''_c , dada pela Equação 5.39; $P(DRN)$ é a probabilidade de decisão de roteamento normal, dada pela Equação 5.43, e $P(DRA)$ é a probabilidade de decisão de roteamento alternativo.

Assim, das Equações 5.34, 5.38, 5.39, 5.43 e 5.52, foram obtidas as curvas para a

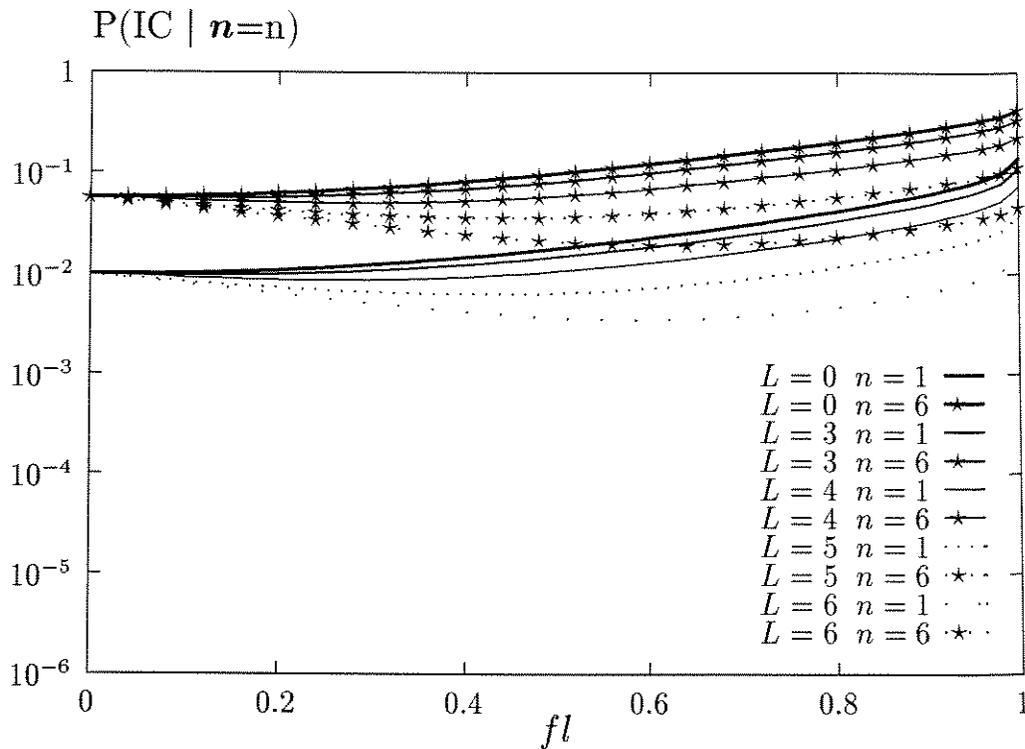


Figura 5.26: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{rc} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetro o número, n , de sinais interferentes existentes, considerando a Variante 2. Considera-se, ainda, $\alpha = 4$.

probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | n = n)$, condicional ao número, n , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetro o número, n , de sinais interferentes existentes e o limiar de bloqueio, L , mostradas na Figura 5.26. Considera-se $Z_{rc} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB. As curvas mostradas na Figura 5.26 foram obtidas a partir dos resultados para o bloqueio, B_s , do sistema, mostrados na Figura 4.4, e para a probabilidade, $P(DRA)$, de decisão de roteamento alternativo, mostrados na Figura 5.16, ou seja, considera-se a Variante 2.

5.14.10 Comentários e Conclusões

Avaliou-se, a título de exemplo e fazendo uso do Método G, a probabilidade de interferência cocanal, $P(IC | \mathbf{n} = n)$, condicional ao número, \mathbf{n} , de interferências existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em um dos pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada, considerando que este rádio móvel tem sua chamada roteada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de roteamento alternativo, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh.

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes e ao roteamento alternativo da chamada, para esta modelagem proposta coincide com a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para a primeira modelagem proposta. Na primeira modelagem, considera-se a condição de “pior caso”, portanto, o rádio móvel está situado em um dos pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada, considerando que sua chamada é roteada para a estação base de segunda opção. Nestas condições, observou-se que a utilização das técnicas de encaminhamento alternativo implica aumento substancial da interferência cocanal.

Nas Figuras 5.20-5.22, observa-se que a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, considerando que a chamada é roteada normalmente diminui com o aumento da flexibilidade. Isto se deve à expansão da célula que ocorre com o aumento da flexibilidade. Este aumento faz com que os pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada estejam cada vez mais próximos da estação rádio base de primeira opção.

Observa-se, portanto, para a posição considerada, este rádio móvel apresenta valores muito diferentes para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, para os dois encaminhamentos possíveis das chamadas. Esta diferença aumenta com o aumento da flexibilidade, porquanto com o aumento da flexibilidade ocorre expansão da célula o que significa que o rádio móvel considerado está cada vez mais próximo a estação rádio base de primeira opção e mais distante da estação rádio base de segunda opção.

O rádio móvel considerado tem sua chamada encaminhada para a estação rádio base de primeira opção com probabilidade, $P(RN)$, de roteamento normal, e para a estação rádio base de segunda opção com probabilidade, $P(RA)$, de roteamento alternativo. Assim, obtém-se

um valor médio para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes ponderando-se os resultados para os dois encaminhamentos possíveis que foram obtidos anteriormente.

Nas Figuras 5.23-5.26, observa-se que a **probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, considerando que a chamada é roteada normalmente ou alternativamente de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo, aumenta com a diminuição do limiar de bloqueio, L** . Logo, conclui-se que a técnica Retentativa Direcionada (Directed Retry) apresenta melhor desempenho, do ponto de vista da interferência cocanal, que a técnica Variação do Limiar de Bloqueio. Observa-se, também, que a diminuição do limiar de bloqueio implica maior capacidade de tráfego e, por outro lado, implica piora da interferência cocanal.

Ainda, das Figuras 5.23 e 5.24, observa-se que, do ponto de vista da interferência cocanal a Variante 1 apresenta melhores resultados que a Variante 2. Observa-se, ainda, que com o aumento do limiar de bloqueio a diferença entre os resultados para a Variante 1 e para a Variante 2 diminui. Portanto, conclui-se que para valores baixos do limiar de bloqueio a Variante 1 deve ser preferida. Posteriormente, considerou-se apenas uma das variantes devido à semelhança dos resultados obtidos. Ainda, devido ao fato de que os resultados obtidos para a Variante 2 são piores que para a Variante 1, preferiu-se dar continuidade ao trabalho utilizando-se a Variante 2.

A escolha de um determinado limiar de bloqueio é uma decisão importante e não pode ser feita sem a análise da interferência cocanal. Note ainda, nas Figuras 5.23-5.26, que os valores obtidos para a $fl = 0$ podem ser utilizados como referência pois são os piores valores admitidos da interferência cocanal para sistemas em que as técnicas de encaminhamento alternativo não são utilizadas. Propõem-se que para escolha de um limiar de bloqueio seja feita levando-se em consideração que os valores da interferência cocanal não devem ultrapassar estes valores de referência.

Considerando este critério, observa-se que o uso das técnicas de encaminhamento alternativo em ambiente Nakagami/Nakagami é tão crítico quanto em Nakagami/Rayleigh que é muito mais crítico que em ambiente Rayleigh/Rayleigh. Considerando-se, como exemplo, o ambiente Rayleigh/Rayleigh que é menos crítico, observa-se, na Figura 5.26, que o uso das técnicas de limiar de bloqueio é possível:

- para $L = 6$ e $0 \leq fl \leq 1$.
- para $L = 5$ e $0 \leq fl \leq 0,8$.
- para $L = 4$ e $0 \leq fl \leq 0,5$.
- para $L = 3$ e $0 \leq fl \leq 0,3$.
- para $L = 1$ e $0 \leq fl \leq 0,2$.

Observa-se, como exemplo, que para $0,3 \leq fl \leq 0,5$ é aconselhável utilizar as técnicas de encaminhamento alternativo com limiar de bloqueio, $L = 4$. Observa-se, na Figura 4.5, que para estes valores, obtém-se acentuada diminuição do bloqueio médio do sistema de rádio móvel, e que estes valores de bloqueio são muito próximos aos obtidos para valores menores do limiar de bloqueio. Ou seja, a avaliação da interferência cocanal é necessária para otimizar o uso das técnicas de encaminhamento alternativo.

Seguindo-se a modelagem que foi descrita, é possível analisar a interferência cocanal para os demais ambientes de rádio móvel.

Já foi visto na primeira forma de análise proposta que, do ponto de vista da interferência cocanal, o uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em um ambiente de rádio móvel é tanto mais crítico quanto maior a inclinação das curvas da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, no ponto $Z = Z_{rc}$. Esta conclusão também é válida para esta modelagem e se deve à probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes e ao roteamento alternativo da chamada.

5.15 Probabilidade de Interferência Cocanal Total, Técnicas de Encaminhamento Alternativo e as Duas Opções de Encaminhamento

O cálculo da probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo é feito para um dos pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada, considerando que este rádio móvel tem sua chamada roteada para a estação rádio base

de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh.

Para este cálculo, em qualquer um dos ambientes de rádio móvel, é necessário obter a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes e descondicioná-la fazendo uso da Equação 5.23 (ou da Equação 5.24).

A probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de interferências existentes, considerando que a chamada é encaminhada alternativamente ou normalmente de acordo com uma probabilidade de roteamento alternativo, foi avaliada, a título de exemplo e fazendo uso do Método G, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh.

Assim, avalia-se , a título de exemplo e fazendo uso do Método G, a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, considerando que a chamada é encaminhada alternativamente ou normalmente de acordo com uma probabilidade de roteamento alternativo, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh.

5.15.1 Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Cocanal Total em Ambiente Nakagami/Nakagami

A probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, considerando que a chamada é encaminhada alternativamente ou normalmente de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo, é obtida a partir das Equações 5.24 e 5.50.

Assim, das Equações 5.24, 5.34, 5.38 5.39, 5.43 e 5.50, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L , mostradas na Figura 5.27. Considera-se $m = \mu = 3$, $Z_{rc} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB. Consideram-se, ainda, apenas as seis cocélulas mais próximas, ou seja, $N = 6$. Ainda, considerando $N_c = 6$ canais/célula e $A_c = 3$ Erl/célula, obtêm-se os resultados para o bloqueio, B_c , da célula, mostrados na Figura 4.3; para o bloqueio, B_s , do sistema, mostrados na Figura 4.4, e os resultados para a probabilidade, $P(DRA)$, de decisão de roteamento alternativo, mostrados nas Figuras 5.15 e 5.16. As curvas mostradas na Figura 5.27 foram obtidas a partir dos resultados para o bloqueio, B_c , da célula, mostrados na Figura 4.3; para o bloqueio, B_s , do sistema, mostrados na Figura 4.4, e para a probabilidade, $P(DRA)$, de

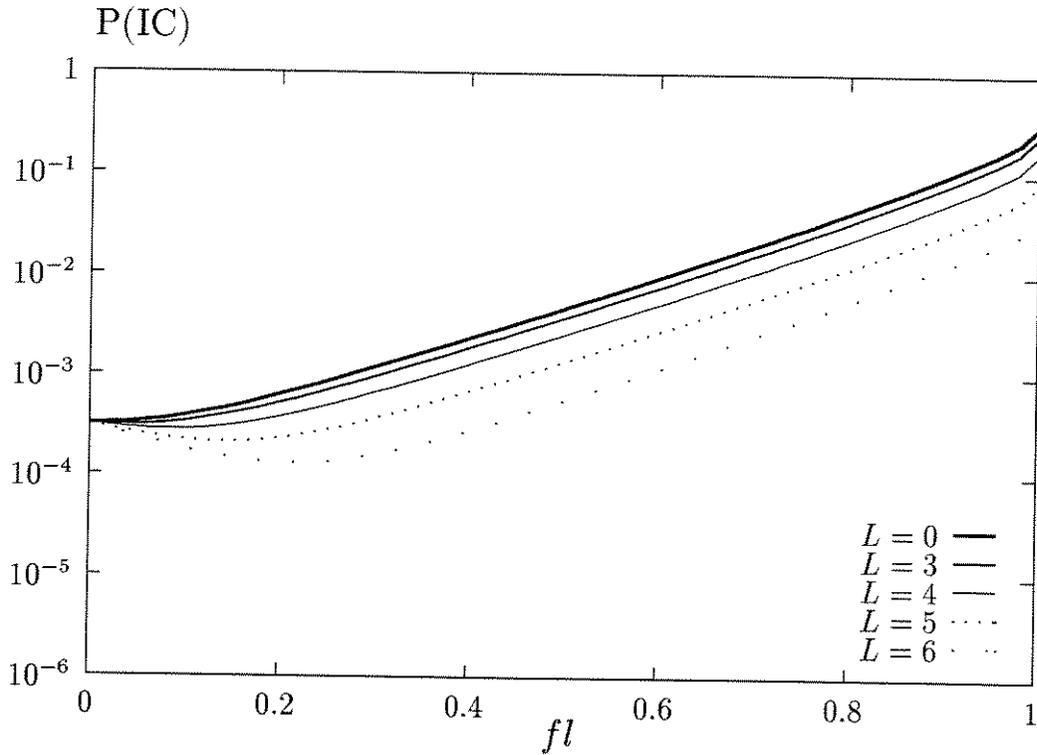


Figura 5.27: Probabilidade de interferência cocanal total quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Nakagami, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{rc} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L , considerando a Variante 2. Considera-se, ainda, $m = \mu = 3$ e $\alpha = 4$.

decisão de roteamento alternativo, mostradas na Figura 5.16, ou seja, considera-se, a Variante 2.

5.15.2 Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Cocanal Total em Ambiente Nakagami/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, considerando que a chamada é encaminhada alternativamente ou normalmente de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Rayleigh, é obtida a partir das Equações 5.24 e 5.51.

Assim, da Equação 5.24, 5.34, 5.38, 5.39, 5.43 e 5.51, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminha-

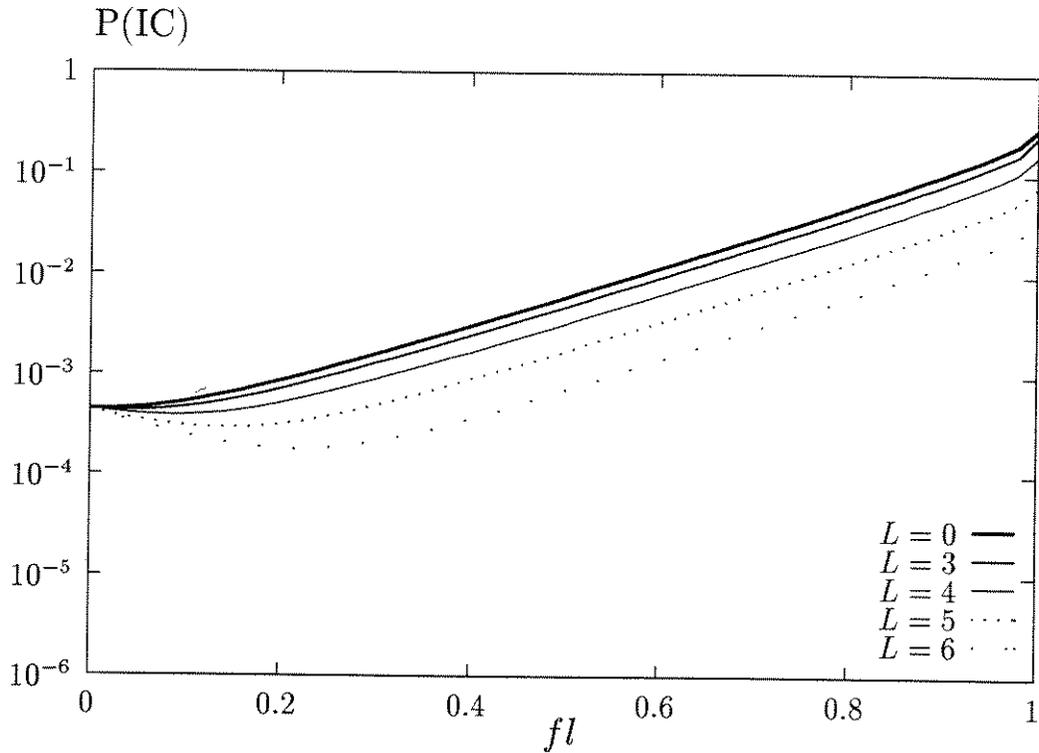


Figura 5.28: Probabilidade de interferência cocanal total quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{r_c} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetro limiar de bloqueio, L . Considera-se, ainda, $m = 3$ e $\alpha = 4$.

mento alternativo, em ambiente Nakagami/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L , mostradas na Figura 5.28. Considera-se $m = 3$, $Z_{r_c} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB. Consideram-se, ainda, apenas as seis cocélulas mais próximas, ou seja, $N = 6$. As curvas mostradas na Figura 5.28 foram obtidas a partir dos resultados a partir dos resultados para o bloqueio, B_c , da célula, mostrados na Figura 4.3; para o bloqueio, B_s , do sistema, mostrados na Figura 4.4, e para a probabilidade, $P(DRA)$, de decisão de roteamento alternativo, mostradas na Figura 5.16, ou seja, considera-se a Variante 2.

5.15.3 Duas Opções de Encaminhamento e Probabilidade de Interferência Cocanal Total em Ambiente Rayleigh/Rayleigh

A probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, considerando que a chamada é encaminhada alternativamente ou normalmente de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, é obtida a partir das Equações 5.24 e 5.52.

Assim, das Equações 5.24, 5.34, 5.38, 5.39, 5.43 e 5.52, foram obtidas as curvas para a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , tendo com parâmetro o limiar de bloqueio, L , mostradas na Figura 5.29. Considera-se $Z_{rc} = 20$ dB, $\alpha = 4$ e $R_W = 8$ dB. Consideram-se, ainda, apenas as seis cocélulas mais próximas, ou seja, $N = 6$. As curvas mostradas na Figura 5.29 foram obtidas a partir dos resultados para o bloqueio, B_c , da célula, mostrados na Figura 4.3; para o bloqueio, B_s , do sistema, mostrados na Figura 4.4, e para a probabilidade, $P(DRA)$, de decisão de roteamento alternativo, mostradas na Figura 5.16, ou seja, considera-se a Variante 2.

5.15.4 Comentários e Conclusões

Avaliou-se, a título de exemplo e fazendo uso do Método G, a probabilidade de interferência cocanal total, $P(IC)$, quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em um dos pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada, considerando que este rádio móvel tem sua chamada roteada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo, nos ambientes Nakagami/Nakagami, Nakagami/Rayleigh e Rayleigh/Rayleigh. Assim, foram obtidas as curvas mostradas nas Figuras 5.27-5.29.

Nas Figuras 5.27-5.29, observa-se que a **probabilidade de interferência cocanal total, aumenta com a diminuição do limiar de bloqueio, L** . Note ainda, nas Figuras 5.27-5.29, que os valores obtidos para a $fl = 0$ também podem ser utilizados como referência e que a escolha de um limiar de bloqueio também pode ser feita levando-se em consideração que os valores da interferência cocanal não devem ultrapassar estes valores de referência. Desta forma observa-se que as conclusões obtidas para a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, considerando as duas opções de encaminhamento,

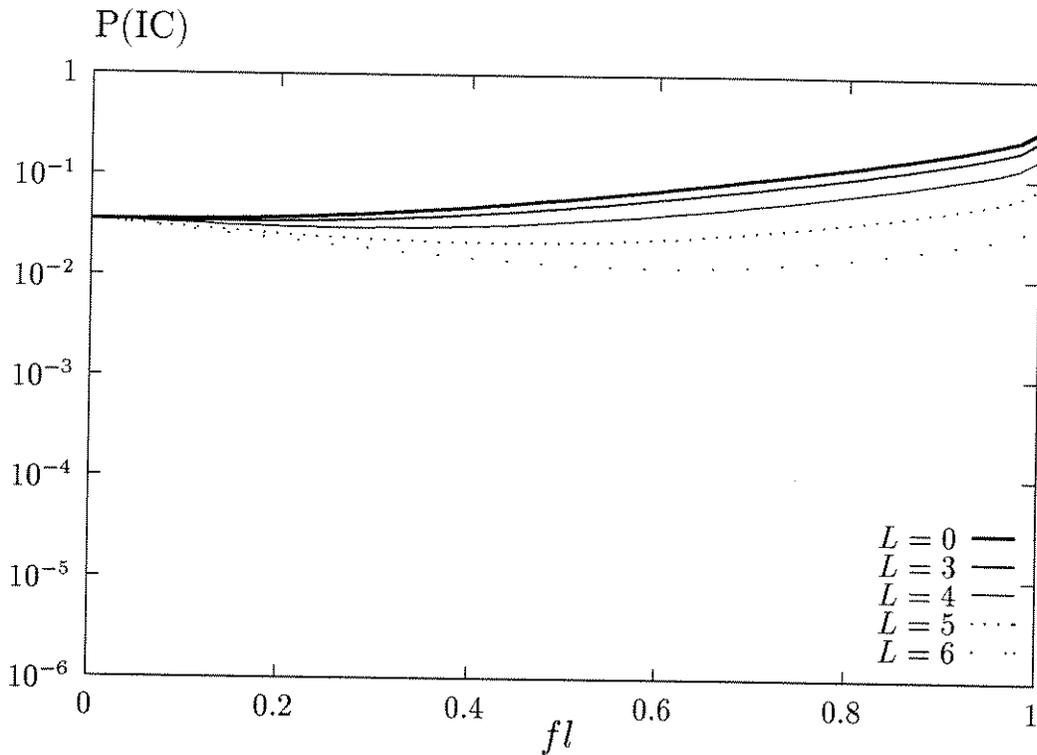


Figura 5.29: Probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo, em ambiente Rayleigh/Rayleigh, em função da flexibilidade, fl , para $Z_{rc} = 20$ dB e $R_W = 8$ dB, tendo como parâmetro o limiar de bloqueio, L . Considera-se, ainda, $\alpha = 4$.

também são válidas para a probabilidade de interferência cocanal total, considerando as duas opções de encaminhamento.

5.16 Conclusão

O uso das técnicas de encaminhamento alternativo implica melhor capacidade de tráfego. Por outro lado, quando do uso de técnicas de encaminhamento alternativo, a interferência cocanal sofre alterações. Neste capítulo foram propostas duas modelagens para avaliação da interferência cocanal em sistemas móveis nos quais as técnicas de encaminhamento alternativo são utilizadas. Esta avaliação compreendeu a análise dos parâmetros do sistema de rádio móvel que são modificados quando do uso de técnicas de encaminhamento alternativo

e que exercem influência sobre o cálculo da probabilidade de interferência cocanal. Dentre estes parâmetros destacou-se a geometria da célula. Portanto, a geometria da célula foi analisada tanto para sistemas móveis em que encaminhamentos alternativos não são considerados, quanto para aqueles em que uma segunda possibilidade de encaminhamento alternativo é considerada.

Duas formas para avaliação da interferência cocanal foram propostas:

- Avaliou-se a interferência cocanal considerando que o rádio móvel situa-se na borda da célula, ou seja, situa-se nos pontos de “pior caso”, e que o encaminhamento alternativo da chamada está sendo efetivamente feito. Nesta avaliação, sugeriu-se uma aproximação possível para a forma geométrica da célula para sistemas móveis que fazem uso das técnicas de encaminhamento alternativo.
- Avaliou-se a interferência cocanal considerando que o rádio móvel situa-se na borda da célula, e que a chamada considerada é encaminhada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo. Nesta avaliação, sugeriu-se aproximações possíveis para as distâncias entre o rádio móvel e as estações rádio base de primeira opção e de segunda opção.

Concluiu-se que em um dos pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada:

- **a utilização de técnicas de encaminhamento alternativo implica aumento substancial da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes**, considerando que a chamada é encaminhada alternativamente. Esta é a condição de “pior caso”. Observa-se, ainda, que este aumento se deve à expansão da célula quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo.
- considerando que a chamada é encaminhada normalmente ocorre diminuição substancial da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes. Observa-se que esta diminuição também se deve à expansão da célula.
- **a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, considerando que a chamada é roteada ora normalmente ora alternativamente, aumenta com a diminuição do limiar de bloqueio, L** . Portanto, a técnica Retentativa Direcionada (Directed Retry) apresenta melhor desem-

penho, do ponto de vista da interferência cocanal, que a técnica Variação do Limiar de Bloqueio.

Observa-se, também, que a diminuição do limiar de bloqueio implica melhor capacidade de tráfego e, por outro lado, implica piora da interferência cocanal. A escolha de um determinado limiar de bloqueio é, portanto, uma decisão importante e não pode ser feita sem a análise da interferência cocanal.

Sugeriu-se que para escolha de um limiar de bloqueio seja feita levando-se em consideração que os valores da interferência cocanal não devem ultrapassar a valores de referência dados pelos valores obtidos para a $fl = 0$. Estes valores são os piores valores admitidos da interferência cocanal para sistemas em que as técnicas de encaminhamento alternativo não são utilizadas.

Observou-se ainda que, do ponto de vista da interferência cocanal, o uso das técnicas encaminhamento alternativo em um ambiente de rádio móvel é tanto mais crítico quanto maior inclinação das curvas da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, no ponto $Z = Z_{rc}$.

Capítulo 6

Conclusão

6.1 Considerações Finais

Neste trabalho de tese, as diversas densidades de probabilidade do ambiente sem fio foram modeladas de maneira ampla, explorando-se as muitas lacunas existentes na literatura.

A caracterização do canal de rádio móvel engloba a predição do valor médio da potência do sinal recebido e da variabilidade do sinal em torno desta média. Neste trabalho foi dado enfoque para a avaliação da variabilidade do sinal de rádio móvel em torno da média da potência. Os modelos estatísticos utilizados para descrever o ambiente sem fio foram: Rayleigh, Nakagami, Rice, Log-normal, Suzuki, Nakagami Sombreado e Rice Sombreado. A modelagem da variabilidade do sinal de rádio móvel, para cada um dos modelos citados, compreendeu:

- A modelagem estatística da envoltória do sinal.
- A modelagem estatística da relação sinal/ruído.

A análise deste assunto na literatura existente é confusa, e por este motivo as densidades descritas tiveram seus parâmetros padronizados:

- A modelagem estatística da envoltória do sinal foi feita de forma que as densidades fossem colocadas em função da média da potência do sinal.
- A modelagem estatística da relação sinal/ruído foi feita de forma que as densidades fossem colocadas em função da média da relação sinal/ruído.

Também foram propostas modelagens originais para envoltória do sinal:

- A modelagem estatística da envoltória do sinal para o ambiente Nakagami Sombreado. Assim, foram obtidas:

- a densidade composta Nakagami/Normal.
- a densidade composta Nakagami/Log-normal.
- A modelagem estatística da envoltória do sinal para o ambiente Rice Sombreado. Assim, foram obtidas:
 - a densidade composta Rice/Normal.
 - a densidade composta Rice/Log-normal.

Ainda, o cálculo de todas as médias e variâncias não disponíveis foi feito. Assim, o cálculo das médias e das variâncias dos ambientes compostos é contribuição deste trabalho. Os ambientes compostos são: Suzuki, Nakagami Sombreado e Rice Sombreado. Portanto, são contribuições deste trabalho:

- O cálculo da média e da variância da densidade composta Rayleigh/Normal.
- O cálculo da média e da variância da densidade composta Rayleigh/Log-normal.
- O cálculo da média e da variância da densidade composta Nakagami/Normal.
- O cálculo da média e da variância da densidade composta Nakagami/Log-normal.
- O cálculo da média e da variância da densidade composta Rice/Normal.
- O cálculo da média e da variância da densidade composta Rice/Log-normal.
- O cálculo da média e da variância da densidade composta Exponencial/Normal.
- O cálculo da média e da variância da densidade composta Exponencial/Log-normal.
- O cálculo da média e da variância da densidade composta Gama/Normal.
- O cálculo da média e da variância da densidade composta Gama/Log-normal.
- O cálculo da média e da variância da densidade composta Chi-quadrada não Central/Normal.
- O cálculo da média e da variância da densidade composta Chi-quadrada não Central/Log-normal.

Ainda, os diversos modelos estatísticos para o canal de rádio móvel foram comparados entre si.

A interferência cocanal foi analisada para os diversos ambientes de rádio móvel em termos da probabilidade de interferência cocanal.

Para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal tornou-se necessário caracterizar o ambiente de rádio móvel através da modelagem estatística do sinal desejado e dos sinais interferentes. O ambiente de rádio móvel, do ponto de vista da análise da interferência cocanal, foi denominado pela composição dos nomes dos modelos que caracterizam o sinal desejado e os sinais interferentes. A denominação do ambiente de rádio móvel foi, portanto, dividida em duas partes. A primeira parte indica o modelo estatístico utilizado para caracterizar o sinal desejado e a segunda parte indica o modelo estatístico utilizado para caracterizar os sinais interferentes.

Assim, foi feita uma exaustiva análise da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes e da probabilidade de interferência cocanal total.

A análise da interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes foi feita nos ambientes: Rayleigh/Rayleigh, Nakagami/Rayleigh, Nakagami/Nakagami, Rice/Rayleigh, Rice/Rice, Rayleigh/Suzuki, Nakagami/Suzuki, Rice/Suzuki, Suzuki/Suzuki, Nakagami Sombreado/Suzuki e Rice Sombreado/Suzuki.

Em geral, mais de um método foi desenvolvido para cada ambiente. Na literatura, são encontrados métodos de cálculo para a probabilidade de interferência cocanal em alguns ambientes sem fio. Entretanto, para vários outros ambientes a análise da interferência cocanal não está disponível. Para outros ainda esta análise não é feita em função de parâmetros necessários para se incluir nela a influência do uso das técnicas de encaminhamento alternativo. Portanto, como contribuição deste trabalho, foram desenvolvidos vários métodos para suprir esta lacunas. Também como contribuição deste trabalho, todos os métodos descritos foram obtidos de forma padronizada em função de um parâmetro único. São contribuições deste trabalho de tese:

- O Método B - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rayleigh/Rayleigh.
- O Método D - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rayleigh/Rayleigh.

- O Método I - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Rayleigh.
- O Método J - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Rayleigh.
- O Método K - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Rice.
- O Método M - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rayleigh/Suzuki.
- O Método N - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rayleigh/Suzuki.
- O Método O - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Nakagami/Suzuki.
- O Método P - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice/Suzuki.
- O Método R - um método exato para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Suzuki/Suzuki.
- O Método U - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Nakagami Sombreado/Suzuki.
- O Método V - um método aproximado para o cálculo da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes em ambiente Rice Sombreado/Suzuki.

Avaliou-se, a título de exemplo, a probabilidade de interferência cocanal total para os ambientes Rayleigh/Rayleigh, Nakagami/Rayleigh e Nakagami/Nakagami.

Posteriormente, foi feita a descrição das técnicas de encaminhamento alternativo. Também foi feita uma avaliação de desempenho de um sistema móvel de duas células quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo.

A seguir, foram identificados e descritos os parâmetros do sistema móvel que sofrem modificação com do uso das técnicas de encaminhamento alternativo e que implicam alteração da interferência cocanal. Dentre os parâmetros que sofrem modificação quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo destaca-se a geometria da célula. Alguns outros parâmetros considerados foram obtidos a partir de um sistema de duas células quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo. Levando-se em consideração estas alterações, a avaliação da interferência cocanal quando o uso das técnicas de encaminhamento alternativo foi feita através de duas propostas diferentes:

- Avaliou-se a interferência cocanal considerando-se que o rádio móvel situa-se na borda da célula, ou seja, nos pontos de “pior caso”, e que o encaminhamento alternativo da chamada esteja sendo efetivamente feito. Nesta avaliação, sugeriu-se uma aproximação possível para a forma geométrica da célula para sistemas móveis que fazem uso das técnicas de encaminhamento alternativo.
- Avaliou-se a interferência cocanal considerando-se que o rádio móvel situa-se na borda da célula, e que a chamada considerada esteja sendo encaminhada para a estação rádio base de primeira opção ou para a estação rádio base de segunda opção de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo. Nesta avaliação, sugeriu-se aproximações possíveis para as distâncias entre o rádio móvel e as estações rádio base de primeira opção e de segunda opção.

A título de exemplo do desempenho do sistema, os ambientes considerados para análise foram: Rayleigh/Rayleigh, Nakagami/Rayleigh e Nakagami/Nakagami.

Concluiu-se que em um dos pontos mais distantes da estação rádio base de segunda opção nos quais a comunicação com esta estação rádio base ainda é adequada:

- **a utilização de técnicas de encaminhamento alternativo implica aumento substancial da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes**, considerando que a chamada é encaminhada alternativamente. Esta é a condição de “pior caso”. Este aumento se deve à expansão da célula quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo.

- Considerando que a chamada é encaminhada normalmente a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes diminui substancialmente. Esta diminuição também se deve a expansão da célula.
- **a probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, considerando que a chamada é roteada normalmente ou alternativamente de acordo com uma probabilidade de encaminhamento alternativo, aumenta com a diminuição do limiar de bloqueio, L .** Portanto, a técnica Retentativa Direcionada (Directed Retry) apresenta melhor desempenho, do ponto de vista da interferência cocanal, que a técnica Variação do Limiar de Bloqueio.

Conclui-se, portanto, que se por um lado a diminuição do limiar de bloqueio implica melhoria de tráfego, por outro lado, implica piora da interferência cocanal. A escolha de um determinado limiar de bloqueio é, portanto, uma decisão importante e não pode ser feita sem a análise da interferência cocanal.

Sugeriu-se que a escolha de um limiar de bloqueio seja feita levando-se em consideração que os valores da interferência cocanal não devem ultrapassar a valores de referência dados pelos valores obtidos para a $fl = 0$. Estes valores são os piores valores admitidos da interferência cocanal para sistemas em que as técnicas de encaminhamento alternativo não são utilizadas.

Observou-se ainda que, do ponto de vista da interferência cocanal, o uso das técnicas encaminhamento alternativo em um ambiente de rádio móvel é tanto mais crítico quanto maior a inclinação das curvas da probabilidade de interferência cocanal condicional ao número de sinais interferentes existentes, no ponto $Z = Z_{rc}$ onde Z_{rc} é a margem, dada em decibéis, obtida para a borda da célula padrão.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

É importante observar ainda que a avaliação da interferência cocanal depende da distância entre o rádio móvel e o transmissor desejado e das distâncias entre o rádio móvel e os transmissores interferentes.

Na literatura, por vezes, a interferência cocanal é avaliada para os pontos de “pior caso” que são os pontos situados na borda da célula. Para estes pontos a distância entre o rádio móvel e o transmissor desejado é dada pelo raio da célula, r_c . Entretanto, as distâncias entre o rádio móvel e os transmissores interferentes não estão disponíveis. Na literatura, têm

sido propostas aproximações para estas distâncias, dadas por $D - r_c$ onde D é a distância entre cocélulas. Estas aproximações foram utilizadas neste trabalho.

Neste trabalho, a análise da interferência cocanal quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo restringiu-se as pontos situados na borda da célula, ou seja, considerou-se que a chamada pertence à corrente de tráfego flexível. Para esta análise foram utilizadas aproximações para a distância entre o rádio móvel e o transmissor desejado. A partir destas aproximações, de forma análoga ao que é feito na literatura para sistemas móveis nos quais apenas uma opção de encaminhamento é considerada, foram obtidas aproximações para as distâncias entre rádio móvel aos transmissores interferentes.

Entretanto, a análise da interferência cocanal não foi feita para pontos internos da célula devido à não disponibilidade de modelagem adequada para a distância entre o rádio móvel e o transmissor desejado e para as distâncias entre o rádio móvel e os transmissores interferentes. Esta modelagem é complexa e por este motivo não foi feita.

Com esta modelagem disponível é possível saber o que acontece em média na célula com a interferência cocanal quando são utilizadas as técnicas de roteamento alternativo.

Observa-se, portanto, que a obtenção da distância entre o rádio móvel e o transmissor desejado e das distâncias entre o rádio móvel e os transmissores interferentes, para uma posição genérica do rádio móvel, é ainda uma dificuldade a ser superada. Esta avaliação pode ser feita de duas formas:

- analiticamente - mais difícil.
- por simulação - mais fácil.

Assim, algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- avaliar a geometria do sistema de rádio móvel de forma a obter distância entre o rádio móvel e o transmissor desejado e as distâncias entre o rádio móvel e os transmissores interferentes, em função do posicionamento do rádio móvel. A partir destas distâncias torna-se possível:
 - avaliar a probabilidade de interferência cocanal em função do posicionamento do rádio móvel.
 - avaliar a probabilidade de interferência cocanal média na célula.
- avaliar a geometria do sistema de rádio móvel, quando do uso de técnicas de roteamento alternativo, de forma a obter a distância entre o rádio móvel e o transmissor desejado e

as distâncias entre o rádio móvel e os transmissores interferentes, tanto considerando que o sinal desejado é o de maior potência quanto considerando que o sinal desejado é o de segunda maior potência, em função do posicionamento do rádio móvel. A partir destas distâncias torna-se possível:

- avaliar a probabilidade de interferência cocanal, quando do uso de técnicas de roteamento alternativo, em função do posicionamento do rádio móvel.
- avaliar a probabilidade de interferência cocanal, quando do uso de técnicas de roteamento alternativo média na célula.

Ainda, toda a avaliação da geometria da célula descrita até aqui foi feita a partir da adoção da forma hexagonal como um padrão para a geometria da célula. Entretanto, novas formas geométricas da célula têm sido aventadas para a utilização em microcélulas. A utilização da forma quadrada para a modelagem de microcélulas é possível. A avaliação da interferência cocanal torna-se necessária para validar o uso destas novas formas geométricas.

Assim, algumas outras sugestões para trabalhos futuros são:

- avaliar a interferência cocanal para as novas formas geométricas da célula.
- avaliar a interferência cocanal quando do uso das técnicas de encaminhamento alternativo para as novas formas geométricas da célula.

Bibliografia

- [1] Young, W. R., "Advanced Mobile Phone Service: Introduction Background and Objectives", *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 58, pp. 1-14, January 1979.
- [2] MacDonald, V. H., "The Cellular Concept", *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 58, pp. 15-41, January 1979.
- [3] Keffer, N. F., "Desempenho da Modulação GMSK no Ambiente Móvel: Aplicação a uma Rede Local sem Fio", Tese de Mestrado, Unicamp, Setembro 1993.
- [4] Yacoub, M. D., "Foundations of Mobile Radio Engineering, CRC Press", Boca Raton, Fla., 1993.
- [5] Abu-Dayya, A. A. and Beaulieu, N. C., "Outage Probabilities of Cellular Mobile Radio Systems with Multiple Nakagami Interferers", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, No. 4, pp. 757-768, November 1991.
- [6] Yao, Y. D. and Sheikh, A. U. H., "Investigations into Cochannel Interference in Microcellular Mobile Radio Systems", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 41, No. 2, pp. 114-123, May 1992.
- [7] Ho, M. J. and Stüber, G. L., "Co-channel Interference of Microcellular Systems on Shadowed Nakagami Fading Channels", *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 568-571, 1993.
- [8] Nakagami, M., "The m-Distribution - A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading", *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, W. G. Hoffman Ed., pp. 3-36, Oxford, England, 1960.
- [9] Spiegel, M. R., "Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas", *Coleção Schaum*, McGraw-Hill.

- [10] Hess, G. C., "Land-Mobile Radio System Engineering", Artech House, Boston-London, 1993.
- [11] Prasad, R. and Kegel, A., "Effects of Rician Faded and Log-normal Shadowed Signals on Spectrum Efficiency in Microcellular Radio", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 42, No. 3, pp. 274-281, August 1993.
- [12] Gradshteyn, I. S. and Ryzhik, I.W., "Table of Integrals, Series and Products", Academic Press, New York, 1965.
- [13] Schwartz, S. C. and Yeh, Y. S., "On the Distribution Function Moments of Power Sums with Log-normal Components", *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 61, No. 7, pp. 1441-1462, September 1982.
- [14] Schwartz, S. C. and Yeh, Y. S., "Outage Probability in Mobile Telephony due to Multiple Log-Normal Interferers", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-32, No. 4, pp. 380-388, April 1984.
- [15] Papoullis, A., "Probability Random Variables and Stochastic Processes", McGraw-Hill, 1984.
- [16] Muammar, R. and Gupta, S. C., "Cochannel Interference in High-Capacity Radio Systems", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-30, No. 8, pp. 1973-1978, August 1982.
- [17] Sowerby, K. W. and Williamson, A. G., "Outage Probability Calculations for Multiple Cochannel Interferers in Cellular Mobile Radio Systems", *IEE Proceedings*, vol. 135, Pt. F, No. 3, pp. 208-215, June 1988.
- [18] Kreyzig, E., "Matemática Superior", vol. 1, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro-São Paulo, 1984.
- [19] Prasad, R. and Kegel, A., "Improved Assessment of Interference Limits in Cellular Radio Performance", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, No. 2, pp. 412-419, May 1991.
- [20] Chiani, M., Tralli, V. and Verdone, R., "Outage and Spectrum Efficiency Analysis in Microcellular Systems", *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 598-601, 1993.
- [21] Prasad, R., Kegel, A. and Olsthoorn, J., "Spectrum Efficiency Analysis for Microcellular Mobile Radio Systems", *Elect. Letters*, vol. 27, No. 5, pp. 423-425, February 1991.

- [22] Prasad, R. and Arnbak, J. C., “Comments on ‘Analysis for Spectrum Efficiency in Single Cell Trunked and Cellular Mobile Radio’”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 37, No. 4, pp. 220-222, November 1988.
- [23] Shinoda, A. A. and Yacoub M. D., “Alternative Routing Strategy and Call Reshuffle in Mobile Radio Systems”, *Anais do 13^o Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, pp. 573-576, Águas de Lindóia-SP, Setembro 1995.
- [24] Mencia, J. C. E., “Desempenho de um Sistema de Comunicações Móveis com a Variação do Limiar de Bloqueio”, Tese de Mestrado, FEE-UNICAMP, Janeiro de 1991.
- [25] Abramovitz, M. and Stegun, I. A., Eds., “Handbook of Mathematical Functions”, Washington, DC, 1964.