

ANÁLISE DE ESTIMADORES
PARA CANAIS COM
DESVANECIMENTO RÁPIDO E
NÃO SELETIVO EM FREQUÊNCIA
MODELADOS DE ACORDO
COM AS DISTRIBUIÇÕES
 $\kappa - \mu$ E $\eta - \mu$

JAIME SILVA JÚNIOR

DEZEMBRO / 2006

Análise de estimadores para canais com desvanecimento rápido e não seletivo em frequência modelados de acordo com as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$.

JAIME SILVA JÚNIOR

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Telecomunicações.

Orientador: PROF. DR. SANDRO ADRIANO FASOLO

Santa Rita do Sapucaí
2006

Dissertação defendida e aprovada em 08/12/2006, pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Sandro Adriano Fasolo (INATEL - DTE)

Prof. Dr. Marcos Trevisan Vasconcellos (PUC Minas - Poços de Caldas - MG)

Prof. Dr. Geraldo Gil Ramundo Gomes (INATEL - DTE)

Prof. Dr. Carlos Roberto dos Santos
Coordenador do Curso de Mestrado

À minha querida mãe,
exemplo de competência e
dedicação ao trabalho.

Agradecimentos

À Deus que me deu saúde e força para concluir esta dissertação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sandro Adriano Fasolo, por seu apoio, atenção e paciência ao longo do meu aprendizado.

A minha família pelo incentivo, em especial a meu pai, a minha mãe e as minhas irmãs.

Aos meus amigos e colegas que sempre estiveram ao meu lado e tiveram uma palavra de incentivo e ânimo ao escutarem minhas lamentações. A todos que contribuíram e enriqueceram este trabalho através de críticas e sugestões. Em especial ao Alexandre, Celso, Fernanda, Daniel, Orlando, Ramon e Renan.

À todos os mestres que ao longo da minha vida contribuíram para minha formação.

Agradeço ao professor Edson que acreditou no meu potencial e me deu a oportunidade de participar do PED (Programa de Estágio Docente) e ao professor Carlos Augusto que se empenhou para que eu obtivesse a bolsa de estudos.

A CAPES e FINEP, pelo suporte financeiro.

Índice

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
Lista de Símbolos	x
1 Introdução	1
1.1 Sistemas de Comunicações	1
1.2 Propagação no Canal Rádio Móvel	2
1.3 Desvanecimento	2
1.4 Histórico sobre o Desvanecimento	3
1.5 Relevância do Assunto	4
1.6 Organização, Estrutura e Contribuições	5
2 Modelos estocásticos para modelagem de canais rádio móveis	6
2.1 Introdução	6
2.2 Ambiente $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$	7
2.3 Distribuição $\kappa - \mu$	8
2.3.1 Função Densidade de Probabilidade $\kappa - \mu$	9
2.3.2 Função Densidade de Probabilidade $\kappa - \mu$ da Envoltória Normalizada	11
2.3.3 Distribuição $\kappa - \mu$ e Outros Modelos de Desvanecimento	11
2.4 Distribuição $\eta - \mu$	13
2.4.1 Função Densidade de Probabilidade $\eta - \mu$	13
2.4.2 Função Densidade de Probabilidade $\eta - \mu$ da Envoltória Normalizada	17
2.4.3 Distribuição $\eta - \mu$ e Outros Modelos de Desvanecimento	18
2.5 Ambiente Nakagami- m	18
2.5.1 Função Densidade de Probabilidade Nakagami- m	19
2.5.2 Função Densidade de Probabilidade Nakagami- m da Envoltória Normalizada	20
2.6 Conclusão	20

3	Métodos de Geração de Sinais com Desvanecimento $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$	21
3.1	Introdução	21
3.2	Geração pela Definição Matemática	22
3.3	Método da Aceitação-Rejeição	22
3.3.1	Sinal $\kappa - \mu$	24
3.3.2	Sinal $\eta - \mu$	24
3.4	Método do Espectro de Smith	25
3.4.1	Sinal $\kappa - \mu$	27
3.4.2	Sinal $\eta - \mu$	29
3.5	Conclusão	30
4	Métodos de Estimação dos Parâmetros das Distribuições	32
4.1	Introdução	32
4.2	Estimadores	33
4.3	Método dos Momentos Estatísticos	33
4.3.1	Distribuição $\kappa - \mu$	35
4.3.2	Distribuição $\eta - \mu$	36
4.4	Estimador MMSE	38
4.4.1	Estimador MMSE para as distribuições $\kappa - \mu$, $\eta - \mu$ e Nakagami- m	38
4.5	Conclusão	40
5	Simulações e Resultados	41
5.1	Introdução	41
5.2	Valores estimados para os parâmetros das distribuições $\kappa - \mu$, $\eta - \mu$ e Nakagami- m	41
5.2.1	Ajuste da distribuição $\kappa - \mu$	46
5.2.2	Ajuste da distribuição $\eta - \mu$	48
5.3	Simulador de Canal	48
5.4	Considerações	53
5.5	Conclusão	57
6	Conclusões Finais	58
6.1	Propostas para Trabalhos Futuros	59
A	Simulador de Canal	60
B	Equipamentos	61
C	Publicações	62
	Referências Bibliográficas	63

Lista de Figuras

1.1	Sistema de Comunicação	1
2.1	Resumo da distribuição $\kappa - \mu$	12
2.2	Resumo da distribuição $\eta - \mu$	19
3.1	Comparação entre simulação e teoria: (a) $\kappa - \mu$, com $\kappa = 0,85$ e $\mu = 3$ e (b) $\eta - \mu$, com $\eta = 0,75$ e $\mu = 0,5$	23
3.2	(a) Funções $t(x)$, $f(x)$ e $g(x)$ para $\kappa - \mu$, com $\kappa = 0,75$ e $\mu = 1,5$. (b) FDP para o método da Aceitação-Rejeição: $\kappa - \mu$, com $\kappa = 0,75$ e $\mu = 1,5$	24
3.3	(a) Funções $t(x)$, $f(x)$ e $g(x)$ para $\eta - \mu$, com $\eta = 0,5$ e $\mu = 1$. (b) FDP para o método da Aceitação-Rejeição: $\eta - \mu$, com $\eta = 0,5$ e $\mu = 1$	25
3.4	Gerador de sinais com desvanecimento: (a) Rayleigh, (b) Rice e (c) Hoyt.	27
3.5	Implementação do gerador de sinais com desvanecimento $\kappa - \mu$ através do Método do Espectro de Smith.	28
3.6	(a) Desvanecimento $\kappa - \mu$ para $f = 900$ MHz e $v = 60$ km/h. (b) FDP para o sinal gerado através do Método do Espectro de Smith.	29
3.7	Implementação do gerador de sinais com desvanecimento $\eta - \mu$ através do Método do Espectro de Smith.	30
3.8	(a) Desvanecimento $\eta - \mu$ para $f = 900$ MHz e $v = 60$ km/h. (b) FDP para o sinal gerado através do Método do Espectro de Smith.	30
4.1	FDP's: simulada, teórica e estimada.	33
5.1	Valores dos parâmetros estimados x número de amostras, para $\kappa = 1,25$ e $\mu = 1$	42
5.2	Valores dos parâmetros estimados x número de amostras, para $\eta = 0,4$ e $\mu = 2$	43
5.3	Valores dos parâmetros estimados x tempo, para $\kappa = 1,25$ e $\mu = 1$	43
5.4	Valores dos parâmetros estimados x tempo, para $\eta = 0,4$ e $\mu = 1$	44
5.5	Comparativo entre as FDC's para $\kappa = 1,25$ e $\mu = 1$ pelo método da definição.	47
5.6	Comparativo entre as FDC's para $\kappa = 0,8$ e $\mu = 3$ pelo método da Aceitação-Rejeição.	47

5.7	Comparativo entre as FDC's para $\kappa = 0,65$ e $\mu = 2$ pelo Método do Espectro de Smith.	48
5.8	Comparativo entre as FDC's para $\eta = 0,5$ e $\mu = 1$ pelo método da definição.	49
5.9	Comparativo entre as FDC's para $\eta = 0,4$ e $\mu = 2$ pelo método da Aceitação-Rejeição.	49
5.10	Comparativo entre as FDC's para $\eta = 0,375$ e $\mu = 1,5$ pelo Método do Espectro de Smith.	50
5.11	Diagrama em blocos para aquisição do sinal.	50
5.12	Efeito do desvanecimento amostrado do simulador de canal para $f = 900$ MHz e $v = 90$ km/h.	51
5.13	Comparativo entre as FDC's para $\kappa = 2$ e $\mu = 1$ para o sinal amostrado do simulador de canal.	52
5.14	Comparativo entre as FDC's $\eta = 0,4$ e $\mu = 0,5$ para o sinal amostrado do simulador de canal.	52
5.15	Comparativo entre as FDP's para $\kappa = 1,25$ e $\mu = 2$ pelo Método do Espectro de Smith.	54
5.16	Comparativo entre as FDC's para $\kappa = 1,25$ e $\mu = 2$ pelo Método do Espectro de Smith.	54
5.17	Comparativo entre as FDP's para $\eta = 0,6$ e $\mu = 0,5$ pelo método da Aceitação-Rejeição.	55
5.18	Comparativo entre as FDC's para $\eta = 0,6$ e $\mu = 0,5$ pelo método da Aceitação-Rejeição.	55
5.19	Superfície do erro quadrático médio - vista superior.	56
5.20	Superfície do erro quadrático médio - vista inferior.	56

Lista de Tabelas

3.1	MSE entre o histograma do sinal e a FDP teórica.	31
5.1	Valores estimados para κ , μ e m , através do MME e MMSE.	44
5.2	MSE entre as FDP's simulada e teórica e entre as FDP's simulada e estimada para a distribuição $\kappa - \mu$	45
5.3	Valores estimados para η , μ e m , através do MME e MMSE.	45
5.4	MSE entre as FDP's simulada e teórica e entre as FDP's simulada e estimada para a distribuição $\eta - \mu$	46
5.5	Valores estimados para os parâmetros das distribuições $\kappa - \mu$, $\eta - \mu$ e Nakagami- m , através do MME e MMSE para os dados amostrados do simulador de canal.	51
5.6	Valores estimados com ajuste não satisfatório através do MME e satisfatório para o MMSE para a distribuição $\kappa - \mu$	53
5.7	Valores estimados com ajuste não satisfatório através do MME e satisfatório para o MMSE para a distribuição $\eta - \mu$	53

Lista de Abreviaturas e Siglas

FDP	Função densidade de probabilidade
FDC	Função de distribuição cumulativa
ISI	<i>Intersymbol Interference</i> - interferência entre símbolos
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i> - transformada rápida de Fourier inversa.
LOS	<i>Line of Sight</i> - linha de visada direta
MME	Método dos Momentos Estatísticos
MSE	<i>Mean Square Error</i> - erro quadrático médio
MMSE	<i>Minimum Mean Square Error</i> - mínimo erro quadrático médio
NLOS	<i>Non Line of Sight</i> - sem linha de visada direta
rms	<i>Root Mean Square Value</i> - raiz quadrada do valor quadrático médio ou raiz quadrada da potência média normalizada
va	variável aleatória

Lista de Símbolos

$E[\cdot]$	Valor médio ou valor esperado de uma va
$\exp(\cdot)$	Função exponencial
f	Frequência do sinal transmitido
f_m	Desvio Doppler máximo sofrido pelo sinal
$I_0(\cdot)$	Função de Bessel modificada de ordem 0
$I_v(\cdot)$	Função de Bessel modificada de ordem v
K	Parâmetro K da distribuição de Rice
$L[f(\cdot)]$	Transformada de Laplace de $f(\cdot)$
$L^{-1}[f(\cdot)]$	Transformada inversa de Laplace de $f(\cdot)$
m	Fator de desvanecimento ou parâmetro m da distribuição de Nakagami- m
n	Número de percursos
N_0	Densidade Espectral de potência do ruído
$p(\cdot)$	Função densidade de probabilidade
$P(\cdot)$	Função de distribuição cumulativa

p_i	Valor médio da componente em fase da onda do i -ésimo <i>cluster</i>
q_i	Valor médio da componente em quadratura da onda do i -ésimo <i>cluster</i>
r	Envoltória do sinal recebido distribuída de acordo com uma distribuição específica
\hat{r}	Valor rms de r
r_i	Envoltória do sinal recebido de acordo com uma distribuição específica do i -ésimo <i>cluster</i>
\hat{r}_i	Valor rms de r_i
s	Variável complexa de Laplace
$\text{sign}(\cdot)$	Função sinal
$S_{Ez}(f)$	Densidade espectral de potência do sinal resultante devido ao efeito Doppler
v	Velocidade de deslocamento do receptor móvel
$\text{Var}(\cdot)$	Variância
w	Potência instantânea do sinal
\bar{w}	Potência instantânea média do sinal
x_i	Processo aleatório independente com fdp Gaussiana com média zero e variância σ_x^2
y_i	Processo aleatório independente com fdp Gaussiana com média zero e variância σ_y^2
$\Gamma(\cdot)$	Função Gama

- η Parâmetro η da distribuição η - μ
- κ Parâmetro κ da distribuição κ - μ
- μ Parâmetro μ da distribuição κ - μ e η - μ
- ρ Envoltória normalizada do sinal em relação ao valor *rms* de r
- σ Desvio padrão
- σ^2 Variância
- Ω Valor quadrático médio de r ou potência média normalizada total
- ε Gradiente do erro quadrático médio
- ω Potência instantânea do sinal normalizada em relação à potência média do sinal

Resumo

SILVA JÚNIOR, J. Análise de estimadores para canais com desvanecimento rápido e não seletivo em frequência modelados de acordo com as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Santa Rita do Sapucaí, 2006. Instituto Nacional de Telecomunicações.

Nesta dissertação realizou-se o desenvolvimento e análise de estimadores baseados no Método dos Momentos Estatísticos e na Minimização do Erro Quadrático Médio para os parâmetros das distribuições estatísticas $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Estas distribuições são modelos gerais para caracterização de canais com desvanecimento rápido devido aos múltiplos percursos e incluem algumas das tradicionais distribuições como casos especiais. As estimativas foram realizadas usando variáveis aleatórias e sinais gerados através da definição matemática, Método da Aceitação-Rejeição e Método do Espectro de Smith. Os testes também utilizaram sinais oriundos de um simulador de canal. Os resultados mostraram que os dois métodos de estimação possuem ótimo desempenho, se for empregado um grande espaço amostral.

Palavras-chave: desvanecimento rápido, distribuição $\kappa - \mu$, distribuição $\eta - \mu$, distribuição Rayleigh, distribuição Rice, distribuição Nakagami- m , estimação de parâmetros.

Abstract

SILVA JÚNIOR, J. Análise de estimadores para canais com desvanecimento rápido e não seletivo em frequência modelados de acordo com as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Santa Rita do Sapucaí, 2006. Instituto Nacional de Telecomunicações.

This dissertation presents the development and analysis of the Method of Moments and Minimum Mean Square Error Method to parameter estimation of $\kappa - \mu$ and $\eta - \mu$ statistical distributions. These distributions are general models that characterize fast fading channels and include some of traditional distributions as special cases. The estimatives were carried out using random numbers and signals generated by mathematical definition, Acceptance-Rejection and Smith spectrum methods. The analysis also used signals from a channel simulator. The results showed that both estimation methods have a good performance if a large sample space is used.

Keywords: fast fading, $\kappa - \mu$ distribution, $\eta - \mu$ distribution, Rayleigh distribution, Rice distribution, Nakagami- m distribution, parameter estimation.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Sistemas de Comunicações

O canal de comunicação desempenha um papel fundamental nos sistemas de comunicações. Os limitantes para estes sistemas são determinados pelas características e restrições do canal.

Cada etapa, desde a transmissão até a recepção de uma informação, exige um tratamento adequado. Basicamente, um sistema de comunicação pode ser representado na forma mostrada na Figura 1.1.

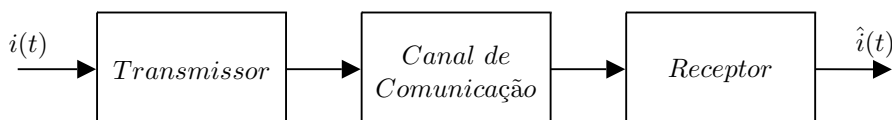


Figura 1.1: Sistema de Comunicação

O transmissor é responsável em processar o sinal da fonte de informação, $i(t)$, de forma a adequá-lo ao meio de transmissão utilizado. Para isso, leva-se em consideração as características do canal de comunicação para desenvolver as técnicas empregadas no transmissor, tais como compressão, criptografia, codificação e a modulação.

O canal insere a maior parte das degradações sofridas por um sinal de comunicação. O comportamento e as características do canal dependem do meio físico empregado na transmissão do sinal. Como exemplo de meios físicos de transmissão tem-se a fibra óptica, o espaço livre, o par trançado e o cabo coaxial, entre outros.

O receptor, além de realizar todas as funções de maneira inversa às empregadas no transmissor, para recuperar uma estimativa, $\hat{i}(t)$, da informação transmitida, $i(t)$, também tem como papel realizar a sincronização de frequência e de tempo de símbolo, entre outras.

1.2 Propagação no Canal Rádio Móvel

No sistema de comunicação móvel terrestre, o canal de transmissão, ou ainda, canal rádio móvel, é representado pela troposfera e pela superfície terrestre com suas características topográficas e morfológicas. A modelagem destes canais sem fio (do inglês *wireless*), devido ao seu comportamento aleatório, são de difícil análise. Exigem estudos teóricos e dados estatísticos para sua caracterização. Os elementos deste canal que tornam aleatórios os comportamentos dos níveis e fases dos sinais de recepção são a mobilidade, assim como os mecanismos de propagação, ou seja, múltiplas reflexões, refrações e difrações que ocorrem no percurso entre o transmissor e o receptor. Os canais guiados, por sua vez, são estáveis e previsíveis.

Analisar o comportamento de um ambiente rádio móvel consiste em utilizar os modelos tradicionais de propagação com o objetivo de prever a potência média do sinal recebido a uma determinada distância do transmissor (**Propagação em Grande Escala**), tais como os modelos teóricos (Espaço Livre e Terreno Plano) e empíricos (Método de Okumura e formulação de Hata). Outra estimativa importante é a variação temporal da potência instantânea em curtos intervalos de tempo ou pequenos deslocamentos espaciais (**Propagação em Pequena Escala**), tais como os modelos formulados com base na teoria de processos estocásticos (Rayleigh, Rice, Nakagami- m , $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$).

1.3 Desvanecimento

Basicamente, o ambiente rádio móvel possui como característica principal a propagação por múltiplos percursos. No canal rádio móvel, o percurso do sinal pode ocorrer diretamente entre o transmissor e o receptor, condição conhecida como linha de visada (LOS - *Line-of-Sight*). A condição de LOS resulta em uma boa qualidade do sinal de recepção. Entretanto, em sistemas de comunicações móveis, geralmente não existe linha de visada entre o transmissor e o receptor. Neste caso a condição de propagação é conhecida como sem linha de visada (NLOS - *Non-Line-of-Sight*). Esta é a condição de propagação de ambientes urbanos, devido aos prédios, árvores, torres e outras obstruções existentes em relação a altura da antena.

O sinal que chega até o receptor é proveniente da combinação da sobreposição de ondas vindas de diversas direções. Este fenômeno, conhecido como múltiplos percursos, é provocado pela reflexão, refração e espalhamento do sinal transmitido nos obstáculos presentes na troposfera. O sinal recebido, devido aos múltiplos percursos, é composto por uma combinação de réplicas atenuadas e atrasadas temporalmente em relação ao sinal transmitido, o que provoca variações na amplitude do sinal recebido, podendo até atenuar sua potência em mais de 60 dB.

Estas variações na potência instantânea do sinal recebido são chamadas de desvane-

cimento rápido (*fast fading*) e causam rápidas flutuações na envoltória do sinal de rádio dentro de um curto período de tempo ou distância. Os efeitos dos múltiplos percursos podem ser explicados pelas interferências construtiva e destrutiva devido ao deslocamento de fase. Devido à estes efeitos, pode ocorrer uma interferência intra-símbolos, ou seja, quando um símbolo interfere nele mesmo.

O desvanecimento por múltiplos percursos pode ser mitigado através de técnicas de diversidade, as quais combina coerentemente múltiplas versões recebidas do sinal transmitido. Por exemplo, uma das formas de se implementar diversidade é através da utilização de múltiplas antenas de recepção, separadas adequadamente.

Além das rápidas flutuações da envoltória do sinal recebido em intervalos de tempo pequenos ou devido ao deslocamento espacial do receptor, os múltiplos percursos também podem provocar interferência entre símbolos (*Inter Symbol Interference* - ISI), devido a dispersão temporal causado pelo atraso de propagação de cada múltiplo percurso. A interferência entre símbolos (ISI) ocorre quando o período de símbolo for menor que o maior atraso de uma das componentes dos múltiplos percursos [1], configurando um desvanecimento seletivo em frequência. Na comunicação digital, por exemplo, a ISI provoca erros de bit e afeta a qualidade da comunicação. Para combater a ISI pode-se empregar, na modulação com portadora única, equalizadores de canal. Em outras técnicas de modulação, como por exemplo, nos sistemas com múltiplas portadoras, emprega-se o tempo de guarda e as portadoras pilotos. Assim como emprega-se o receptor Rake nos sistemas de espalhamento espectral por seqüência direta. A ISI não será tratada.

Uma outra característica do ambiente rádio móvel é o efeito Doppler, que consiste num deslocamento da frequência da portadora de um sinal recebido devido ao movimento relativo entre o transmissor e o receptor, ou devido ao movimento dos objetos entre o transmissor e o receptor. O efeito Doppler gera uma modulação aleatória em frequência nas componentes dos múltiplos percursos, degradando o desempenho dos sistemas de comunicações móveis.

Neste texto, o termo desvanecimento será relacionado com o desvanecimento rápido e não seletivo em frequência.

1.4 Histórico sobre o Desvanecimento

O primeiro modelo estatístico usado para descrever o efeito do ambiente de propagação devido aos múltiplos percursos do canal rádio móvel foi a distribuição de Rayleigh, em 1889. Devido aos múltiplos percursos, a potência instantânea do sinal que se propaga no canal de comunicação varia de forma aleatória sofrendo um desvanecimento rápido. A distribuição de Rayleigh é adequada para descrever essas variações do sinal, principalmente em propagações por ondas troposféricas, ionosféricas e em grandes centros urbanos, onde não existe linha de visada direta [2], [3]. Esta distribuição pode ser considerada como um modelo estatístico padrão para a pior situação de propagação.

O comportamento estatístico do desvanecimento devido aos múltiplos percursos depende do tipo do ambiente de propagação do canal radio móvel. Outros modelos foram desenvolvidos para diferentes ambientes de propagação, entre os quais: Hoyt (1947), Rice (1948), Weibull (1955) e Nakagami- m (1960).

Também conhecido como Nakagami- q , o modelo de Hoyt é aplicado em enlaces de satélite com uma forte cintilação ionosférica [4].

A distribuição de Rice é mais adequada em condições onde existe linha de visada direta. Esta situação pode ser observada em microcélulas de ambientes urbanos e sub-urbanos e ambientes *indoor* de picocélulas. Também pode ser aplicada em enlaces satélite e em enlaces de rádio entre embarcações [4].

A distribuição de Weibull pode ser usada para descrever o desvanecimento por múltiplos percursos, particularmente em sistemas rádio móvel na faixa de 800/900 MHz [4].

O modelo de propagação Nakagami- m foi desenvolvida a partir de medidas práticas. Este modelo de propagação tem sido utilizado para caracterizar o desvanecimento por múltiplos percursos em canais móveis, apresentando um ótimo ajuste para dados coletados em ambientes *indoor* e *outdoor* [5].

Recentemente, também com o objetivo de caracterizar o ambiente de propagação, foram desenvolvidas por Yacoub duas distribuições, chamadas de $\kappa - \mu$ [6] e $\eta - \mu$ [7]. Através da configuração adequada dos parâmetros dessas distribuições é possível obter os modelos tradicionais de propagação, como casos particulares das distribuições de Yacoub.

1.5 Relevância do Assunto

O interesse em estudar métodos de estimação de parâmetros é caracterizar o ambiente de propagação por múltiplos percursos através dos diversos modelos de distribuição existentes em um dado instante.

Através da estimativa do canal, esquemas de codificação combinados com diversidade podem ser empregados com o objetivo de tornar os sinais mais robustos ao efeito do desvanecimento.

Nos sistemas de comunicações móveis o canal é variante no tempo. Técnicas de modulação e codificação adaptativa podem ser empregadas para explorar estas variações temporais do canal. Isto permite maximizar a taxa de dados transmitidos sem erro nas situações em que o efeito do desvanecimento é menos severo e usar com maior eficiência a banda disponível. Dessa forma, a taxa de bits é aumentada no período em que o canal está bom, o que permite uma vazão maior. Por exemplo, isto é possível através de um ajuste dinâmico dos parâmetros de transmissão do sinal, como tipo de modulação e taxa de código. A idéia do ajuste dinâmico dos parâmetros é que a transmissão seja feita sempre no modo mais eficiente, mudando continuamente à medida que as condições do canal variam.

1.6 Organização, Estrutura e Contribuições

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento e análise de métodos para estimar os parâmetros de canais modelados pelas distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Os parâmetros κ, η e μ destas distribuições foram estimados através do Método dos Momentos e através do algoritmo da Minimização do Erro Quadrático Médio (*Minimum Mean Square Error* - MMSE). Uma descrição de cada capítulo é apresentada a seguir.

No **Capítulo 2** será apresentada uma breve descrição sobre as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, da representação do modelo físico através de componentes em fase e em quadratura, além de ser apresentada a Função Densidade de Probabilidade (FDP) para estas distribuições.

Para gerar sinais modelados de acordo com estas distribuições foram utilizadas três técnicas diferentes:

- Através da definição teórica, utilizando-se de variáveis aleatórias gaussianas para representar as componentes em fase e em quadratura;
- Método da Aceitação-Rejeição e
- Método do Espectro de Smith.

Estas três técnicas são descritas no **Capítulo 3**.

No **Capítulo 4** tem-se o desenvolvimento matemático dos estimadores dos parâmetros das distribuições $\kappa - \mu$, $\eta - \mu$ e Nakagami- m .

As simulações e resultados para os estimadores dos parâmetros κ, η e μ das distribuições são apresentados no **Capítulo 5**. Envoltórias distintas de sinais modelados pelas distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$ foram geradas para validação dos estimadores propostos. Neste capítulo, também são apresentados os resultados para os parâmetros estimados de um sinal gerado por equipamento de simulação de canal.

No **Capítulo 6** tem-se as conclusões finais e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Modelos estocásticos para modelagem de canais rádio móveis

2.1 Introdução

O desenvolvimento tecnológico dos últimos anos têm permitido aos sistemas de comunicações móveis alcançarem altas taxas de transmissão de dados. A compreensão dos fenômenos físicos envolvidos na propagação do sinal permite desenvolver técnicas e sistemas robustos às degradações introduzidas pelo canal. Existem três fenômenos principais responsáveis pela degradação de um sinal rádio móvel [8]:

- perda no percurso devido à propagação em grande escala;
- sombreamento e
- desvanecimento por múltiplos percursos.

A perda por propagação (*path loss*) é a atenuação do sinal devido a propagação da onda eletromagnética no percurso entre o transmissor e o receptor. As técnicas de modelagem do canal para esse fenômeno têm por objetivo prever a potência média do sinal recebido a uma determinada distância do transmissor.

O sombreamento descreve variações da amplitude do sinal ao redor da média devido a difração, espalhamento e múltiplos percursos provocados por obstáculos no percurso entre o transmissor e o receptor. Tipicamente pode ser modelado por uma função densidade de probabilidade log-normal [8].

Já o desvanecimento por múltiplos percursos faz com que a potência instantânea do sinal recebido possa variar até mais de 60 dB abaixo do valor médio [8]. Este efeito ocorre devido ao sinal recebido ser formado pela combinação dos sinais dos diferentes percursos

de propagação. A velocidade de movimento do receptor e/ou transmissor e/ou dos objetos ao redor destes determinam a rapidez do desvanecimento no canal.

O sinal recebido é formado pela sobreposição desses três fenômenos.

Os principais modelos para analisar o desvanecimento rápido utilizam uma abordagem estocástica para caracterizar o ambiente de propagação afetado por múltiplos percursos.

Neste capítulo, apresenta-se novos modelos estocásticos, conhecidos por $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, além do modelo Nakagami- m , para descrever as flutuações instantâneas da envoltória do sinal recebido devido ao desvanecimento por múltiplos percursos.

2.2 Ambiente $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$

Tradicionalmente, existem várias distribuições que modelam o efeito do desvanecimento rápido na amplitude e na fase do sinal recebido. Algumas dessas distribuições, como por exemplo, os modelos de Rayleigh, Rice e Nakagami- m assumem que o ambiente de propagação é um campo de espalhamento homogêneo. Segundo Braun [9], um campo de espalhamento homogêneo possui as seguintes características:

- Grande número de ondas parciais;
- Amplitudes das ondas parciais idênticas;
- Nenhuma correlação entre as diferentes ondas parciais;
- Nenhuma correlação entre as fases e amplitudes;
- Distribuição de fase homogênea entre $[0, 2\pi]$.

De acordo com o Teorema Central do Limite, as distribuições citadas podem ser modeladas por um processo Gaussiano complexo. Para um número suficiente de ondas espalhadas (variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas), a resposta impulsiva do canal pode ser modelada por um processo Gaussiano independente da distribuição de cada componente. Dessa forma, utiliza-se uma função densidade de probabilidade Gaussiana com determinadas média e variância para representar a somatória das inúmeras ondas que chegam ao receptor e que são formadas por componentes em fase e quadratura. Esse conjunto de ondas que chegam ao receptor é definido como *cluster*. A distribuição de Rayleigh pode ser utilizada para modelar um ambiente sem linha de visada direta, ou seja, sem uma onda com potência dominante em relação as demais ondas que formam o *cluster*, e no processo Gaussiano complexo, admite-se que as variáveis aleatórias das componentes em fase e quadratura possuem média zero e variâncias idênticas. Um ambiente com linha de visada direta, ou seja, onde uma onda possui potência dominante em relação as demais ondas do cluster, é melhor modelado pela distribuição de Rice. Neste caso, as variáveis aleatórias

em fase e quadratura possuem médias iguais e diferentes de zero com mesma variâncias. A partir de dados práticos, a distribuição de Nakagami- m pode ser compreendida como uma combinação de *clusters* de diferentes múltiplos percursos sem nenhuma componente dominante dentro de cada *cluster*. No ambiente Hoyt, considera-se a existência de apenas um *cluster* e assume-se que as componentes em fase e em quadratura do sinal desvanecido apresentam desvios padrões diferentes, não havendo dentre as várias ondas espalhadas uma que predomine sobre as demais.

Os recentes modelos de distribuição desenvolvidos por Yacoub [6] [7] são obtidos a partir da suposição de um ambiente de propagação não homogêneo. O sinal recebido é composto pelo somatório de n *clusters* de propagação. Dessa forma, o Teorema Central do Limite é válido dentro de um *cluster*, enquanto que na somatória dos n *clusters* ele não é evocado.

Segundo Yacoub, o seu modelo de desvanecimento considera que:

”o sinal recebido é composto de clusters de ondas de múltiplos percursos se propagando em um ambiente não homogêneo. Dentro de cada cluster, as fases das ondas espalhadas são aleatórias e possuem atrasos temporais semelhantes, enquanto que entre os vários clusters, os atrasos são relativamente grandes. Assume-se que as ondas dos múltiplos percursos dos vários clusters têm potências iguais, mas dentro de cada cluster é encontrado uma componente dominante que apresenta potência arbitrária [6].”

2.3 Distribuição $\kappa - \mu$

Representando a envoltória r da distribuição $\kappa - \mu$ em termos das componentes em fase, x_i , e em quadratura, y_i , dos n *clusters* com desvanecimento, a envoltória r é dada por [6]:

$$r^2 = \sum_{i=1}^n (x_i + p_i)^2 + \sum_{i=1}^n (y_i + q_i)^2, \quad (2.1)$$

onde x_i e y_i são processos aleatórios independentes com função densidade de probabilidade Gaussiana com médias iguais a

$$E[x_i] = E[y_i] = 0 \quad (2.2)$$

e variâncias

$$Var[x_i] = Var[y_i] = E[x_i^2] = E[y_i^2] = \sigma^2. \quad (2.3)$$

As variáveis p_i e q_i representam os valores médios das componentes em fase e quadratura do i^{th} *cluster*, respectivamente.

2.3.1 Função Densidade de Probabilidade $\kappa - \mu$

A função densidade de probabilidade $p(r^2)$ é encontrada através de alteração de variáveis e uma série de manipulações matemáticas a partir de (2.1), adotando-se que:

$$\xi_i = (x_i + p_i)^2 \quad e \quad \psi_i = (y_i + q_i)^2 \quad (2.4)$$

e assim, tem-se a envoltória r dada por:

$$r^2 = \sum_{i=1}^n \xi_i + \sum_{i=1}^n \psi_i. \quad (2.5)$$

Primeiramente, para encontrar a FDP $p(r^2)$ é necessário calcular as FDP's $p(\xi_i)$ e $p(\psi_i)$. Para isso, usando a mudança das variáveis x_i e y_i para as variáveis ξ_i e ψ_i , respectivamente, e após algumas manipulações algébricas obtém-se

$$p(\lambda_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_i}\sigma} \exp\left(-\frac{\lambda_i + s_i^2}{2\sigma^2}\right) \cosh\left(\frac{\sqrt{\lambda_i}s_i}{\sigma^2}\right), \quad (2.6)$$

onde $\lambda_i = \xi_i$ e $s_i = p_i$ ou $\lambda_i = \psi_i$ e $s_i = q_i$.

Para obter a FDP $p(r^2)$ realiza-se a multiplicação das transformadas de Laplace das FDP's das componentes em fase e quadratura, ao invés de realizar a convolução entre $p(\xi_i)$ e $p(\psi_i)$. Esta simplificação é possível pois ξ_i e ψ_i são processos mutuamente independentes composto por n elementos em fase e quadratura, respectivamente [10]. A transformada de Laplace de (2.6) é dada por [11]:

$$\mathcal{L}[p(\lambda_i)] = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\sigma^2s}} \exp\left(-\frac{ss_i^2}{1 + 2\sigma^2s}\right), \quad (2.7)$$

onde s é a variável complexa de Laplace.

A multiplicação das transformadas de Laplace das FDP's das componentes em fase e quadratura resulta em

$$\mathcal{L}[p(r^2)] = \frac{1}{(1 + 2\sigma^2s)^n} \exp\left[-\frac{s \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2)}{1 + 2\sigma^2s}\right]. \quad (2.8)$$

Por fim, a FDP $\kappa - \mu$ é obtida através da transformada inversa de Laplace da Equação

(2.8) [11], logo:

$$p(r^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{r^2}{\sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2)} \right)^{\frac{n-1}{2}} \exp \left[-\frac{r^2 + \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2)}{2\sigma^2} \right] I_{n-1} \left[\frac{\sqrt{r^2 \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2)}}{\sigma^2} \right], \quad (2.9)$$

para $r \geq 0$. O termo $I_v(\cdot)$ é a função de Bessel Modificada de primeiro tipo e ordem arbitrária v .

Pode-se provar que o valor quadrático médio é dado por [6]

$$E[r^2] = 2n\sigma^2 + \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2), \quad (2.10)$$

e

$$E[r^4] = 4n\sigma^4 + 4\sigma^2 \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2) + \left[2n\sigma^2 + \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2) \right]^2, \quad (2.11)$$

e a variância da potência é dada por [6]

$$Var[r^2] = 4n\sigma^4 + 4\sigma^2 \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2). \quad (2.12)$$

Elevando-se (2.10) ao quadrado e dividindo o resultado por (2.12), obtém-se [6]

$$\frac{E^2[r^2]}{Var[r^2]} = n \times \frac{(1 + \kappa)^2}{1 + 2\kappa}, \quad (2.13)$$

para $\kappa \geq 0$, sendo κ , por definição, a razão entre a potência total da componente dominante e a potência total das componentes espalhadas. Portanto, κ é definido como:

$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2)}{2n\sigma^2}. \quad (2.14)$$

Usando (2.13) é possível definir o número de *clusters*, n , em função dos parâmetros físicos valor médio quadrático, variância e a razão entre a potência total da componente dominante e a potência total das ondas espalhadas. Estes parâmetros físicos são de natureza contínua, enquanto que o parâmetro n é de natureza discreta. Definindo μ como sendo a extensão real de n , tem-se:

$$\mu = \frac{E^2[r^2]}{Var[r^2]} \times \frac{1 + 2\kappa}{(1 + \kappa)^2}. \quad (2.15)$$

Então, a equação da FDP da envoltória do sinal recebido modelado pela distribuição $\kappa - \mu$ pode ser determinada a partir das definições anteriores e da transformação de variável

aleatória de $r^2 \rightarrow r$, resultando em

$$p(r) = \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\hat{r}\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\mu\kappa)} \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^\mu \exp\left[-\mu(1+\kappa)\left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^2\right] I_{\mu-1}\left[2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\left(\frac{r}{\hat{r}}\right)\right], \quad (2.16)$$

onde $\hat{r} = \sqrt{E[r^2]}$ é o valor *rms* de r .

2.3.2 Função Densidade de Probabilidade $\kappa - \mu$ da Envoltória Normalizada

Definindo $\rho = \frac{r}{\hat{r}}$, ou seja, como a envoltória normalizada em relação ao valor *rms* de r , obtém-se a FDP da envoltória normalizada da distribuição $\kappa - \mu$ através da aplicação desta transformação de variável aleatória em (2.16), resultando em

$$p(\rho) = \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\mu\kappa)} \rho^\mu \exp\left[-\mu(1+\kappa)\rho^2\right] I_{\mu-1}\left[2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\rho\right], \quad \rho \geq 0. \quad (2.17)$$

2.3.3 Distribuição $\kappa - \mu$ e Outros Modelos de Desvanecimento

A distribuição $\kappa - \mu$ é um modelo de distribuição geral que inclui alguns dos principais modelos de desvanecimento como casos especiais. A partir de (2.17), supondo-se a existência de apenas um *cluster*, ou seja, fazendo-se $\mu = 1$ obtém-se a FDP normalizada em relação ao valor *rms* da distribuição Rice, que é dada pela seguinte expressão [6]:

$$p(\rho) = \frac{2(1+\kappa)}{\exp(\kappa)} \rho \exp\left[-(1+\kappa)\rho^2\right] I_0\left[2\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\rho\right], \quad \rho \geq 0, \quad (2.18)$$

onde o parâmetro κ coincide com o parâmetro K da distribuição Rice.

A distribuição Rayleigh modela um ambiente sem linha de visada direta (NLOS), logo não existe uma onda com potência predominante sobre as demais componentes. Assim, a FDP normalizada em relação ao valor *rms* de r da distribuição Rayleigh é [6]:

$$p(\rho) = 2\rho \exp(-\rho^2), \quad \rho \geq 0, \quad (2.19)$$

sendo obtida de (2.18), quando $\kappa = 0$, ou ainda diretamente de (2.17), quando $\kappa = 0$ e $\mu = 1$.

”O sinal Nakagami- m pode ser entendido como a composição de clusters de ondas dos múltiplos percursos sem qualquer componente dominante dentro de cada cluster[6].” Portanto, a FDP normalizada em relação ao valor *rms* de r da distribuição Nakagami- m é obtida fazendo-se $\kappa = 0$ na Equação (2.17). Entretanto, ocorre uma indeterminação (zero dividido por zero). Para pequenos valores do argumento da função de Bessel, é válida a

seguinte aproximação [11]:

$$I_{\mu-1}(z) \approx \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^{\mu-1}}{\Gamma(\mu)} \quad (2.20)$$

Com esta aproximação em (2.17), após algumas manipulações algébricas e para $\kappa = 0$, obtém-se a FDP normalizada Nakagami- m [6]:

$$p(\rho) = \frac{2\mu^\mu}{\Gamma(\mu)} \rho^{2\mu-1} \exp(-\mu\rho^2), \quad \rho \geq 0, \quad (2.21)$$

onde o parâmetro μ coincide com parâmetro m de Nakagami.

A distribuição Semi-Gaussiana é obtida diretamente de (2.17), fazendo $\kappa = 0$ e $\mu = \frac{1}{2}$.

Na Figura 2.1 é apresentado um resumo das configurações dos parâmetros da distribuição $\kappa - \mu$ para obter alguns dos principais modelos de distribuição.

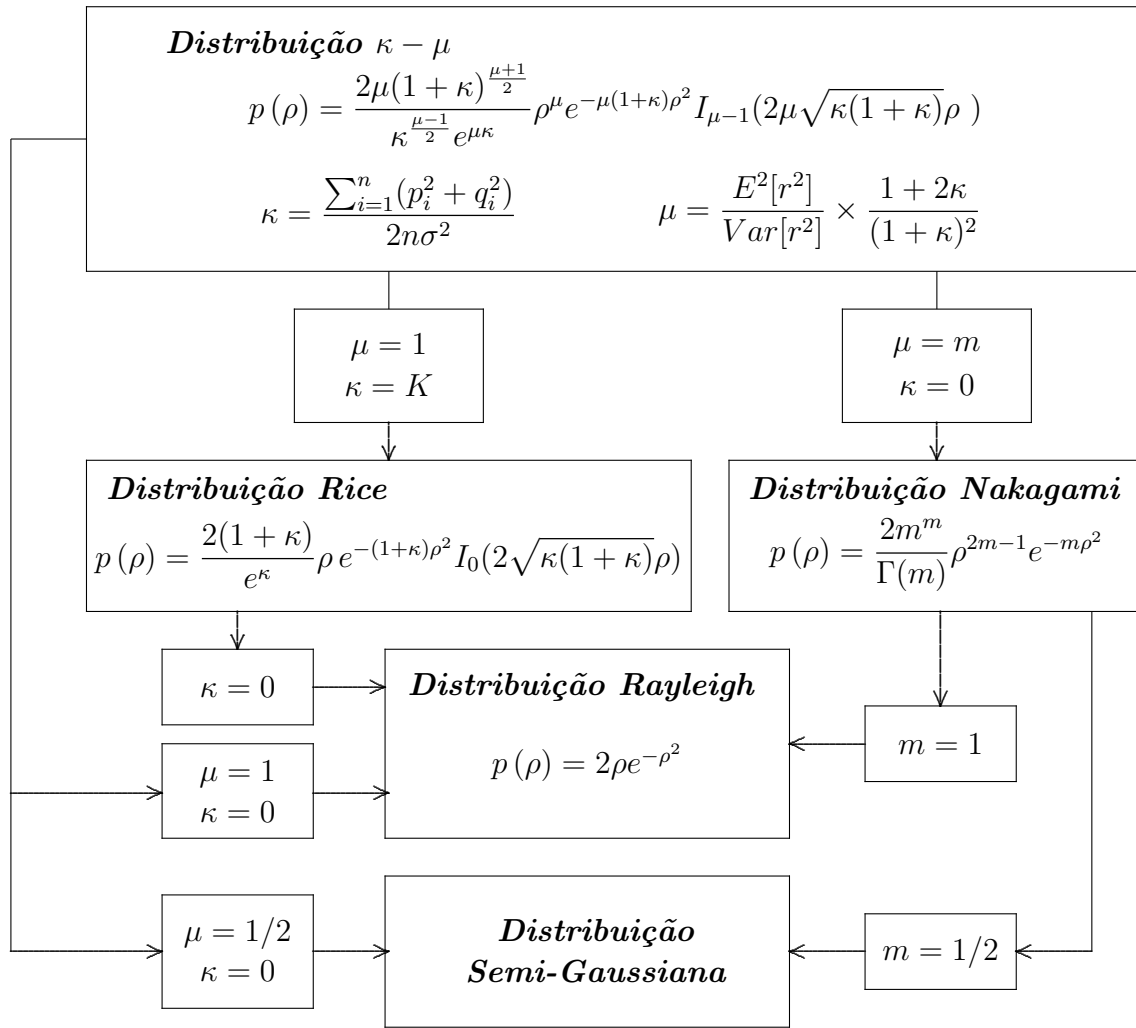


Figura 2.1: Resumo da distribuição $\kappa - \mu$.

2.4 Distribuição $\eta - \mu$

A envoltória r para a distribuição $\eta - \mu$ também pode ser escrita em termos das suas componentes em fase, x_i , e em quadratura, y_i , do sinal com desvanecimento [7]:

$$r^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2, \quad (2.22)$$

onde x_i e y_i são processos aleatórios independentes Gaussianos com média

$$E[x_i] = E[y_i] = 0 \quad (2.23)$$

e variâncias dadas por

$$Var[x_i] = E[x_i^2] = \sigma_x^2 \quad \text{e} \quad Var[y_i] = E[y_i^2] = \sigma_y^2. \quad (2.24)$$

2.4.1 Função Densidade de Probabilidade $\eta - \mu$

Através de mudanças de variáveis e manipulações algébricas a partir de (2.22) obtém-se a FDP $\eta - \mu$, $p(r)$. Uma das formas consiste, primeiramente, em conseguir a FDP do i^{th} cluster. Então, tem-se a envoltória do i^{th} cluster dado por:

$$r_i^2 = x_i^2 + y_i^2, \quad (2.25)$$

e assim,

$$r^2 = \sum_{i=1}^n r_i^2. \quad (2.26)$$

Da mesma forma que no desenvolvimento da FDP $\kappa - \mu$, a FDP $\eta - \mu$ é calculada usando-se uma transformação de variáveis aleatórias em conjunto com a transformada de Laplace. Adota-se que:

$$\delta_i = x_i^2 \quad \text{e} \quad v_i = y_i^2, \quad (2.27)$$

e, conseqüentemente, a envoltória do i^{th} cluster é

$$r_i^2 = \delta_i + v_i. \quad (2.28)$$

Sabe-se que x_i e y_i são processos Gaussianos com média zero e variâncias σ_x^2 e σ_y^2 ,

respectivamente. Portanto, de [10] tem-se que:

$$p(\alpha) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right), \quad \alpha \geq 0,$$

onde $\alpha = x_i$ e $\sigma = \sigma_x$ ou $\alpha = y_i$ e $\sigma = \sigma_y$.

Através da seguinte mudança de variáveis:

$$p(\phi) = \frac{p(\alpha)}{2\sqrt{\phi}} \Big|_{\alpha=\sqrt{\phi}} + \frac{p(\alpha)}{2\sqrt{\phi}} \Big|_{\alpha=-\sqrt{\phi}},$$

resulta em:

$$p(\phi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi\phi}} \exp\left(-\frac{\phi}{2\sigma^2}\right), \quad \phi \geq 0, \quad (2.29)$$

onde $\phi = \delta_i$ ou $\phi = v_i$.

A transformada de Laplace de $p(\phi)$ é dada por

$$\mathcal{L}[p(\phi)] = \frac{1}{\sqrt{2\sigma}\sqrt{s + \frac{1}{2\sigma^2}}}. \quad (2.30)$$

A multiplicação das transformadas de Laplace das componentes em fase e quadratura resulta em:

$$\mathcal{L}[p(r_i^2)] = \frac{1}{2\sigma_x\sigma_y\sqrt{\left(s + \frac{1}{2\sigma_x^2}\right)\left(s + \frac{1}{2\sigma_y^2}\right)}} \quad (2.31)$$

e a transformada inversa de Laplace de (2.31) é:

$$p(r_i^2) = \frac{1}{2\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{4}\left(\frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_y^2}\right)r_i^2\right] \text{I}_0\left[\frac{1}{4}\left(\frac{1}{\sigma_x^2} - \frac{1}{\sigma_y^2}\right)r_i^2\right], \quad r_i^2 \geq 0. \quad (2.32)$$

Por fim, definindo-se o parâmetro η como a relação entre a variância da componente em fase e a variância da componente em quadratura do sinal, ou seja:

$$\eta = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2} \quad (2.33)$$

e, com uma nova transformação de variáveis aleatórias tem-se $p(r_i)$, a FDP do i^{th} cluster, igual a

$$p(r_i) = \frac{\sqrt{\eta}r_i}{\sigma_x^2} \exp\left[-\frac{(\eta+1)r_i^2}{4\sigma_x^2}\right] \text{I}_0\left[\frac{(\eta-1)r_i^2}{4\sigma_x^2}\right], \quad r_i \geq 0. \quad (2.34)$$

Para a região onde $\sigma_x^2 \leq \sigma_y^2$ e $\sigma_y^2 \leq \sigma_x^2$, η assume os seguintes valores, respectivamente

[7]:

$$0 \leq \eta \leq 1 \quad \text{e} \quad 1 \leq \eta \leq \infty \quad (2.35)$$

Pode-se provar que o valor quadrático médio do i^{th} cluster é:

$$E[r_i^2] = \hat{r}_i^2 = (1 + \eta^{-1})\sigma_x^2, \quad (2.36)$$

onde \hat{r}_i é o valor *rms* de r_i .

Então, simplifica-se (2.34) para:

$$p(r_i) = \frac{2\sqrt{hr_i}}{\hat{r}_i^2} \exp\left(-\frac{hr_i^2}{\hat{r}_i^2}\right) I_0\left(\frac{Hr_i^2}{\hat{r}_i^2}\right), \quad r_i \geq 0, \quad (2.37)$$

onde:

$$h = \frac{2 + \eta^{-1} + \eta}{4} = \frac{(1 + \eta)^2}{4\eta} \quad (2.38)$$

$$H = \frac{\eta^{-1} - \eta}{4} = \frac{1 - \eta^2}{4\eta} \quad (2.39)$$

Também é possível definir a potência do sinal com desvanecimento, w , em função da envoltória do i^{th} cluster:

$$w = \sum_{i=1}^n w_i, \quad (2.40)$$

onde $w_i = \frac{r_i^2}{2}$, e calcular a FDP de w_i , $p(w_i)$, através de mudança de variável [7]:

$$p(w_i) = \frac{p(r_i)}{r_i} \Big|_{r_i=\sqrt{2w_i}}$$

$$p(w_i) = \frac{\sqrt{h}}{\bar{w}_0} \exp\left(-\frac{hw_i}{\bar{w}_0}\right) I_0\left(\frac{Hw_i}{\bar{w}_0}\right), \quad w_i \geq 0, \quad (2.41)$$

onde \bar{w}_0 é a potência média do i^{th} cluster:

$$\bar{w}_0 = E[w_i] = \frac{E[r_i^2]}{2} = \frac{\hat{r}_i^2}{2}.$$

A transformada de Laplace da soma de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas é igual ao produto das transformadas de Laplace de cada variável

aleatória. Dessa forma, a transformada de Laplace de $p(w)$ é calculada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[p(w)] &= \{\mathcal{L}[p(w_i)]\}^n \\ &= \left\{ \frac{\sqrt{h}}{\bar{w}_0 \sqrt{\left(s + \frac{h}{\bar{w}_0}\right)^2 - \left(\frac{H}{\bar{w}_0}\right)^2}} \right\}^n. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Já a FDP $\eta - \mu$ em função da potência do sinal com desvanecimento w é obtida através da transformada inversa de Laplace na Equação (2.42). Assim, tem-se que $p(w)$ é igual a:

$$p(w) = \frac{\sqrt{\pi} n^{\frac{n+1}{2}} h^{\frac{n}{2}}}{(2H)^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \bar{w}} \left(\frac{w}{\bar{w}}\right)^{\frac{n-1}{2}} \exp\left(-\frac{nhw}{\bar{w}}\right) I_{\frac{n-1}{2}}\left(\frac{nHw}{\bar{w}}\right), \quad (2.43)$$

sendo \bar{w} definido por:

$$\bar{w} = E[w] = nE[w_i] = n\bar{w}_0. \quad (2.44)$$

Para obter a FDP da distribuição $\eta - \mu$ em função da envoltória do sinal recebido r , $p(r)$, realiza-se a transformação de variável:

$$p(r) = p(w) \sqrt{2w} \Big|_{w=\frac{r^2}{2}} \quad (2.45)$$

e tem-se que $p(r)$ é igual a:

$$p(r) = \frac{2\sqrt{\pi} n^{\frac{n+1}{2}} h^{\frac{n}{2}}}{\hat{r} (2H)^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^n \exp\left[-nh \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^2\right] I_{\frac{n-1}{2}}\left[nH \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^2\right], \quad r \geq 0, \quad (2.46)$$

onde \hat{r} é o valor rms de r , ou seja:

$$\hat{r} = \sqrt{E[r^2]} = \sqrt{2\bar{w}}. \quad (2.47)$$

Pode-se provar que o valor quadrático médio de r é dado por:

$$E[r^2] = n(1 + \eta)\sigma_y^2 \quad (2.48)$$

e

$$E[r^4] = 2(n\sigma_x\sigma_y)^2 + n^2\sigma_x^4 + n^2\sigma_y^4 + 2n\sigma_x^4 + 2n\sigma_y^4, \quad (2.49)$$

e a variância da potência é dada por:

$$\text{Var}[r^2] = 2n(1 + \eta^2)\sigma_y^4. \quad (2.50)$$

Elevando-se (2.48) ao quadrado e dividindo o resultado por (2.50), tem-se:

$$\frac{E^2[r^2]}{\text{Var}[r^2]} = \frac{n(1 + \eta)^2}{2(1 + \eta^2)}. \quad (2.51)$$

Usando (2.51), é possível definir a constante $\frac{n}{2}$ em função dos parâmetros físicos valor médio quadrático, variância e potência das componentes em fase e em quadratura do sinal desvanecido. Estes parâmetros físicos são de natureza contínua, enquanto que o parâmetro $\frac{n}{2}$ é de natureza discreta (inteiro multiplicado por $\frac{1}{2}$). A distribuição $\eta - \mu$, assim como os demais modelos de desvanecimento do canal rádio móvel, é uma aproximação do chamado problema de fase aleatória [7]. A fim de tornar essa limitação do modelo menos severa, defini-se μ como sendo a extensão real de $\frac{n}{2}$, ou seja:

$$\mu = \frac{E^2[r^2]}{\text{Var}[r^2]} \frac{1 + \eta^2}{(1 + \eta)^2}. \quad (2.52)$$

A partir das definições anteriores, de mudanças de variáveis e manipulações algébricas, escreve-se (2.46), que representa a FDP de um sinal recebido modelado pela distribuição $\eta - \mu$, da seguinte forma:

$$p(r) = \frac{4\sqrt{\pi}\mu^{\mu+\frac{1}{2}}h^\mu}{\hat{r}\Gamma(\mu)H^{\mu-\frac{1}{2}}} \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^{2\mu} \exp\left[-2\mu h\left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^2\right] I_{\mu-\frac{1}{2}}\left[2\mu H\left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^2\right], \quad r \geq 0. \quad (2.53)$$

2.4.2 Função Densidade de Probabilidade $\eta - \mu$ da Envoltória Normalizada

Sabendo-se que $\rho = \frac{r}{\hat{r}}$ é a envoltória normalizada em relação ao valor *rms* de r e que $p(\rho)$ é a FDP da envoltória normalizada da distribuição $\eta - \mu$, através de uma transformação de variáveis aleatórias em (2.53), resulta em:

$$p(\rho) = \frac{4\sqrt{\pi}\mu^{\mu+\frac{1}{2}}h^\mu}{\Gamma(\mu)H^{\mu-\frac{1}{2}}}\rho^{2\mu} \exp(-2\mu h\rho^2) I_{\mu-\frac{1}{2}}(2\mu H\rho^2), \quad \rho \geq 0 \quad (2.54)$$

Também é possível expressar o parâmetro μ da Equação (2.52) em função de ρ como:

$$\mu = \frac{1}{\text{Var}(\rho^2)} \frac{1 + \eta^2}{(1 + \eta)^2} \quad (2.55)$$

2.4.3 Distribuição $\eta - \mu$ e Outros Modelos de Desvanecimento

Assim como a distribuição $\kappa - \mu$, a distribuição $\eta - \mu$ também é um modelo de distribuição geral que inclui algumas das principais distribuições de desvanecimento como casos especiais. A partir de (2.54), para o parâmetro $\mu = \frac{1}{2}$ e definindo-se a razão entre a variância da componente em fase pela variância da componente em quadratura ao quadrado, ou seja, η^2 , como o fator de Hoyt (Nakagami- q), q , obtém-se a FDP normalizada em relação ao valor *rms* de r da distribuição Hoyt, que é dada pela seguinte expressão [12]:

$$p(\rho) = 2\sqrt{h}\rho \cdot \exp(-h\rho^2) I_0(H\rho^2), \quad \rho \geq 0. \quad (2.56)$$

A distribuição de Rayleigh pode ser obtida diretamente da FDP normalizada $\eta - \mu$, fazendo-se $\eta = 1$ e $\mu = \frac{1}{2}$, ou ainda, para $\eta = 1$ em (2.56). Logo, tem-se que a FDP normalizada em relação ao valor *rms* de r da distribuição Rayleigh é [12]:

$$p(\rho) = 2\rho \cdot \exp(-\rho^2). \quad (2.57)$$

Também é possível obter a distribuição Nakagami- m assumindo-se que as variáveis gaussianas x_i e y_i apresentam variâncias idênticas. Portanto, a partir de (2.54), para $\mu = m$ e $\eta \rightarrow 0$ (ou, de modo equivalente, $\eta \rightarrow \infty$), ou ainda, da mesma forma, $\mu = m/2$ e $\eta \rightarrow 1$, é possível obter a FDP normalizada para o modelo de desvanecimento da distribuição Nakagami- m , dada por (2.21).

A distribuição Semi-Gaussiana é obtida de (2.53) fazendo $\mu = \frac{1}{2}$ e $\eta \rightarrow 0$, ou ainda, para $\mu = \frac{1}{4}$ e $\eta \rightarrow 1$.

Na Figura 2.2 tem-se um resumo para as configurações dos parâmetros da distribuição $\eta - \mu$, a fim de se obter algumas das principais distribuições.

2.5 Ambiente Nakagami- m

A envoltória do sinal recebido modelado pela distribuição Nakagami- m é composto pelo somatório de m sinais Rayleigh independentes [5]. Dessa forma, a envoltória do sinal Nakagami- m é dada por:

$$r^2 = \sum_{i=1}^m r_i^2, \quad (2.58)$$

onde cada componente r_i , $i = 1, 2, \dots, m$, corresponde a uma envoltória Rayleigh.

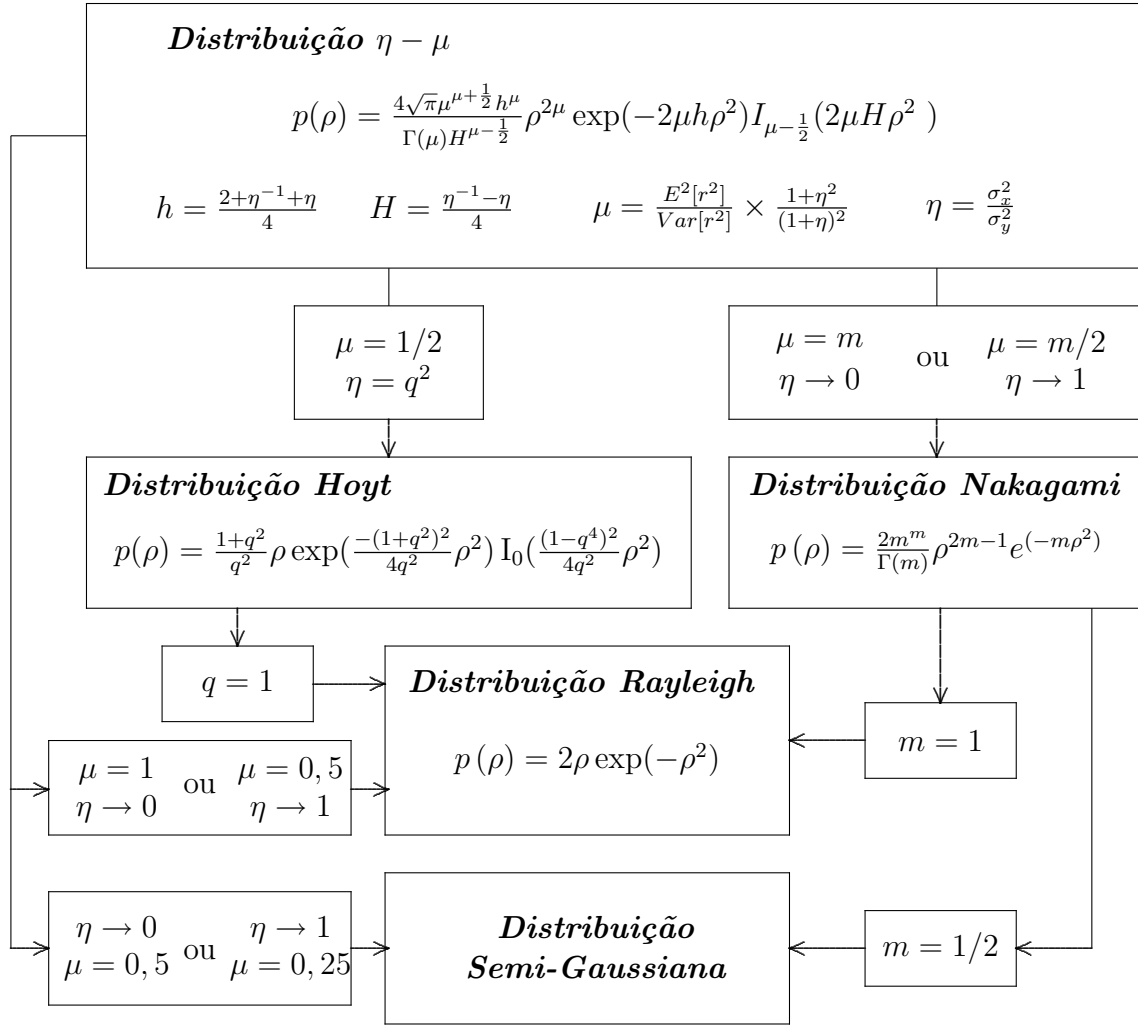


Figura 2.2: Resumo da distribuição $\eta - \mu$

2.5.1 Função Densidade de Probabilidade Nakagami- m

O ambiente de propagação Nakagami- m vem sendo estudado há muito tempo. O desenvolvimento da FDP Nakagami- m pode ser encontrado em [5]. Aqui, a FDP Nakagami- m será apenas citada.

Sabendo-se que o fator de desvanecimento m é dado por

$$m = \frac{\Omega^2}{Var[r^2]} \quad (2.59)$$

onde $\Omega = E[r^2]$, a FDP para Nakagami- m , $p(r)$, pode ser expressa como:

$$p(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} \exp\left(-\frac{mr^2}{\Omega}\right), r \geq 0, \Omega \geq 0, m \geq \frac{1}{2}. \quad (2.60)$$

2.5.2 Função Densidade de Probabilidade Nakagami- m da Envolvória Normalizada

A FDP para a distribuição Nakagami- m da envoltória normalizada em relação ao valor *rms* $p(\rho)$ é definida da seguinte forma [5]:

$$p(\rho) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)} \rho^{2m-1} \exp(-m\rho^2). \quad (2.61)$$

2.6 Conclusão

Nesse capítulo foram apresentadas as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, que são modelos gerais de distribuições estatísticas utilizadas para modelar o desvanecimento rápido de um sinal. Essas distribuições incluem algumas dos principais modelos como casos particulares, como Rayleigh e Nakagami- m , e Rice para a distribuição $\kappa - \mu$ e Hoyt para a distribuição $\eta - \mu$.

Capítulo 3

Métodos de Geração de Sinais com Desvanecimento $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$

3.1 Introdução

Na literatura são encontradas diversas formas de implementar geradores de sinais corrompidos por múltiplos percursos. Entre os primeiros modelos de geradores para sinais afetados por múltiplos percursos estão os desenvolvidos por Ossana[13] e Clarke[14]. O trabalho de Clarke baseia-se no fenômeno de espalhamento para deduzir as características estatísticas dos campos eletromagnéticos do sinal recebido por um receptor móvel[1]. Em seguida, Gans[15] elaborou uma análise espectral para o modelo de Clarke, o que permitiu a Smith[16] implementar um gerador de sinal com desvanecimento modelado pela distribuição Rayleigh e com a incorporação do efeito Doppler.

Recentemente, partindo-se do conceito desenvolvido por Smith, foram implementados geradores para sinais com outros tipos de desvanecimento: Hoyt e $\eta - \mu$, desenvolvido por Fasolo[17], e Rice e $\kappa - \mu$, desenvolvidos por Duque[18].

Este capítulo apresenta três métodos estatísticos para gerar números aleatórios e sinais com desvanecimento modelados pelas distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Estes métodos são implementadas de acordo com as seguintes técnicas:

- Definição matemática das distribuições;
- Aceitação-Rejeição, e
- Espectro de Smith.

As Seções 3.2 e 3.3 apresentam os métodos estatísticos para gerar números aleatórios modelados de acordo com a FDP das distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Uma das formas de

incorporar o efeito Doppler ao sinal é através da utilização de um filtro passa-baixa. O máximo desvio Doppler do sinal é determinado através da frequência de corte do filtro. Entretanto, tal técnica altera a FDP do sinal filtrado e não será utilizada. Assim, os sinais implementados por estes métodos representam apenas o efeito do desvanecimento devido aos múltiplos percursos.

Na Seção 3.4, além dos conceitos básicos do Método do Espectro de Smith, também serão apresentadas as adaptações para obter-se um gerador com desvanecimento Rice e Hoyt. Em seguida, são implementados os geradores para as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$.

Os geradores foram desenvolvidos utilizando-se o *Matlab*® como plataforma de simulação.

3.2 Geração pela Definição Matemática

O sinal é gerado usando a definição matemática apresentada no Capítulo 2. Esta técnica é baseada na somatória de vários *clusters*, do tipo Rice para a $\kappa - \mu$ e Hoyt para a $\eta - \mu$. Então, é necessário gerar um número adequado de variáveis aleatórias Gaussianas para formação dos *clusters* necessários. Devido ao fato deste método ser baseado em uma somatória, cujo índice sempre é um número inteiro, esta abordagem limita-se a geração de sinais com determinados valores. Por exemplo, para a distribuição $\kappa - \mu$, pode-se gerar somente sinais para μ com valores inteiros:

$$r^2 = \sum_{i=1}^{\mu} (x_i + p_i)^2 + \sum_{i=1}^{\mu} (y_i + q_i)^2, \quad (3.1)$$

enquanto que para a $\eta - \mu$, para valores de μ múltiplos de 1/2:

$$r^2 = \sum_{i=1}^{2\mu} x_i^2 + \sum_{i=1}^{2\mu} y_i^2. \quad (3.2)$$

A Figura 3.1(a) apresenta um comparativo para a $\kappa - \mu$ entre a $p(\rho)$ gerada por este método e sua respectiva curva teórica. Na Figura 3.1(b) tem-se os resultados para a $\eta - \mu$. As estatísticas, para cada uma das curvas, foram calculadas usando 10^6 amostras.

3.3 Método da Aceitação-Rejeição

O método direto para geração de variáveis aleatórias é o da transformação, onde é empregado a função inversa da FDC (Função Densidade Cumulativa). Entretanto, no caso da $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, esta inversão parece ser impossível, devido às FDP's serem escritas em termos

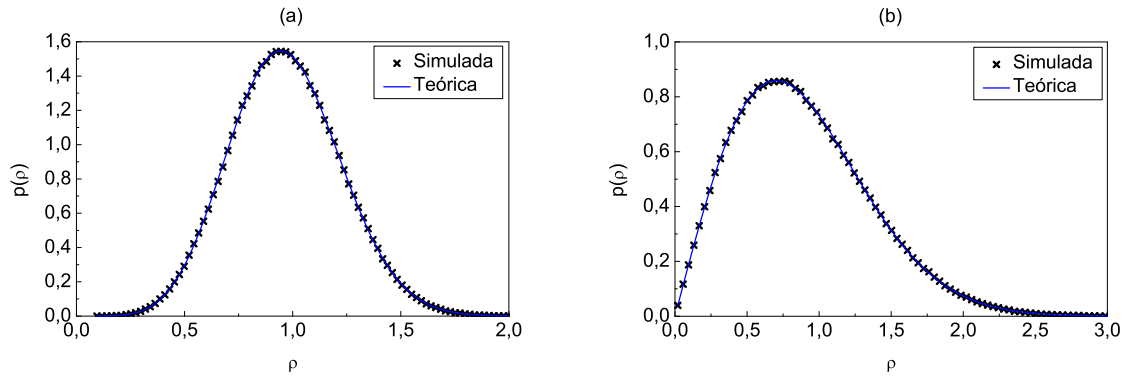


Figura 3.1: Comparação entre simulação e teoria: (a) $\kappa - \mu$, com $\kappa = 0,85$ e $\mu = 3$ e (b) $\eta - \mu$, com $\eta = 0,75$ e $\mu = 0,5$.

da função de Bessel, $I_\nu(\cdot)$.

No método da Aceitação-Rejeição[19] não é preciso realizar esta inversão, pois este método permite gerar uma seqüência aleatória de números com uma distribuição de probabilidade possuindo os mais diversos formatos. Esse método foi utilizado por Souza [20], para gerar números aleatórios distribuídos de acordo com a FDP $\kappa - \mu$ e por Lemos [12], para gerar números aleatórios distribuídos de acordo com a FDP $\eta - \mu$.

Para gerar uma variável aleatória Y com FDP $f(x)$, é necessário especificar uma função $t(x)$ que seja majoritária em relação a $f(x)$ para todos os valores de x , ou seja:

$$t(x) \geq f(x) \quad (3.3)$$

Defini-se então,

$$g(x) = \frac{t(x)}{\int_{-\infty}^{\infty} t(x)dx}, \quad (3.4)$$

para gerar uma variável aleatória Y com densidade $g(x)$.

O método Aceitação-Rejeição utiliza o seguinte algoritmo[20]:

- Gerar Y com uma FDP qualquer.
- Gerar uma distribuição uniforme entre 0 e 1, $U(0,1)$, independente de $f(x)$.
- Se $U \leq f(Y)/t(Y)$, tem-se $X = Y$. De outro modo, voltar ao passo 1.

Com esse algoritmo são gerados N números aleatórios X de acordo com a distribuição $f(x)$ desejada.

3.3.1 Sinal $\kappa - \mu$

A obtenção de variáveis aleatórias distribuídas de acordo com a FDP $\kappa - \mu$ é conseguida fazendo-se $f(x) = p(\rho)$. Calculando o máximo valor para $p(\rho)$, com $\kappa = 0,75$ e $\mu = 1,5$ encontra-se 1,073. Assim,

$$t(x) = \begin{cases} 1,073, & \text{para } 0 \leq x \leq 3 \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Como $t(x)$ é uma função uniformemente distribuída, tem-se que $g(x)$ será $U(0, 3)$. Logo, a variável aleatória será aceita quando

$$U \leq \frac{f(Y)}{1,073} \quad (3.5)$$

Essas funções $t(x)$, $f(x)$ e $g(x)$ podem ser visualizadas na Figura 3.2(a). A Figura 3.2(b) mostra uma comparação entre a FDP teórica e a FDP gerada para este método para distribuição $\kappa - \mu$ com os valores adotados.

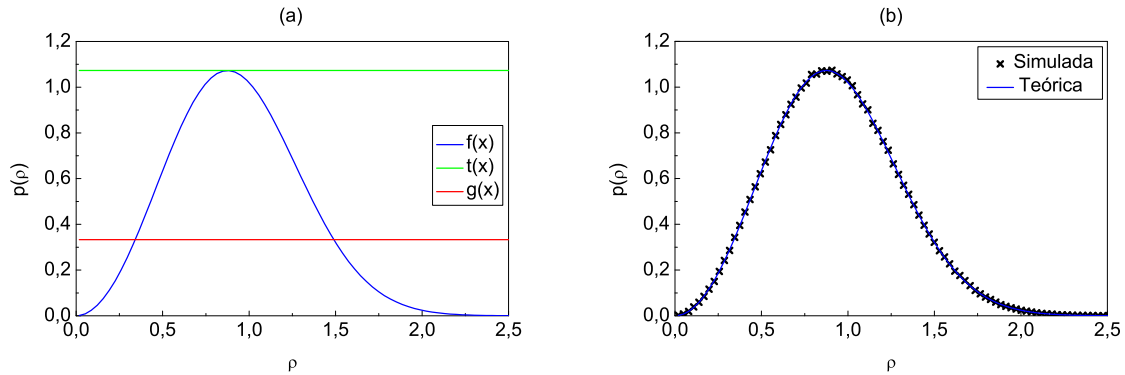


Figura 3.2: (a) Funções $t(x)$, $f(x)$ e $g(x)$ para $\kappa - \mu$, com $\kappa = 0,75$ e $\mu = 1,5$. (b) FDP para o método da Aceitação-Rejeição: $\kappa - \mu$, com $\kappa = 0,75$ e $\mu = 1,5$.

3.3.2 Sinal $\eta - \mu$

As variáveis aleatórias distribuídas de acordo com a FDP $\eta - \mu$ são obtidas de forma análoga às variáveis aleatórias geradas para a distribuição $\kappa - \mu$. Para isso, faz-se $f(x) = p(\rho)$ e determina-se a função majoritária $t(x)$ em relação ao máximo valor de $p(\rho)$.

As funções $t(x)$, $f(x)$ e $g(x)$ podem ser visualizadas na Figura 3.3(a). A Figura 3.3(b) mostra a comparação entre a FDP teórica e a FDP gerada para a distribuição $\eta - \mu$ com $\eta = 0,5$ e $\mu = 1$.

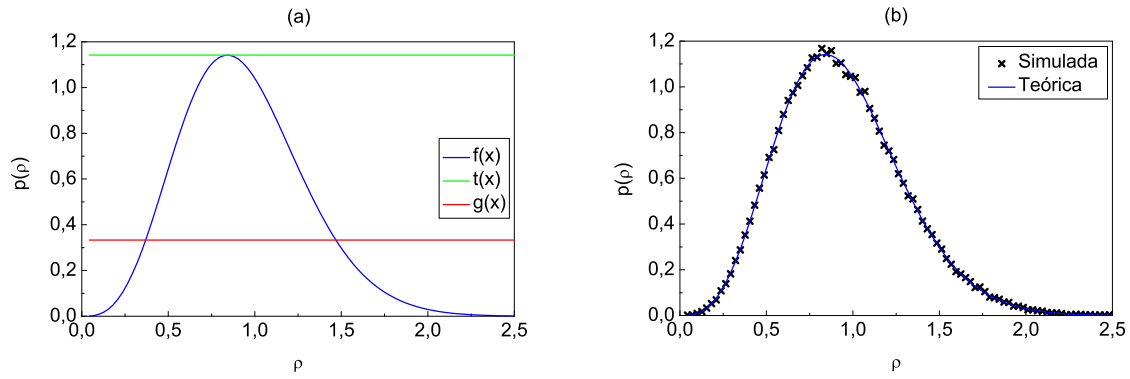


Figura 3.3: (a) Funções $t(x)$, $f(x)$ e $g(x)$ para $\eta - \mu$, com $\eta = 0,5$ e $\mu = 1$. (b) FDP para o método da Aceitação-Rejeição: $\eta - \mu$, com $\eta = 0,5$ e $\mu = 1$.

3.4 Método do Espectro de Smith

Os geradores de sinais com desvanecimento modelados através do Método do Espectro de Smith, pelas distribuições Rice, Hoyt, $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, foram desenvolvidos a partir de adaptações no gerador Rayleigh desenvolvido por Smith.

Através de dois sinais Gaussianos x e y de média nula e variância σ^2 é possível obter um sinal modelado pela distribuição de **Rayleigh**, cuja envoltória r é dada por:

$$r^2 = x^2 + y^2. \quad (3.6)$$

Basicamente, os seguintes passos são usados para se implementar um gerador de sinais Rayleigh, usando o método do espectro de Smith[1]:

1. Especificar o número de pontos no domínio da frequência (N) usados para representar $\sqrt{S_{E_Z}(f)}$ e o máximo deslocamento Doppler (f_m). Geralmente, o valor de N é uma potência de 2.
2. Calcular a distância entre as componentes de frequência adjacentes do espectro ($\Delta f = 2f_m/(N - 1)$).
3. Gerar as $N/2$ variáveis Gaussianas complexas para formar as componentes de frequências positivas.
4. Conjugar as amostras anteriores para formar as componentes de frequências negativas do espectro.
5. Para as amostras do espectro gerado, multiplicar as componentes em fase e quadratura pelas amostras do espectro Doppler. A função para $S_{E_Z}(f)$ é dada por:

$$S_{Ez}(f) = \frac{1,5}{\pi f_m \sqrt{1 - \left(\frac{f-fc}{f_m}\right)^2}}, \quad (3.7)$$

e corresponde à densidade espectral de potência do sinal resultante devido ao efeito Doppler.

6. Realizar uma IFFT no sinal resultante para obter dois sinais de tamanho N no domínio do tempo, elevá-los ao quadrado e em seguida, somá-los.
7. Finalmente, para se obter uma série de N pontos no tempo de um sinal Rayleigh com efeito Doppler, extrai-se a raiz quadrada obtida da soma anterior.

A Figura 3.4(a) apresenta o gerador através do método do espectro de Smith para o desvanecimento Rayleigh.

Um sinal modelado pela distribuição **Rice**, por definição, é obtido a partir de dois sinais Gaussianos com médias diferentes de zero. Adotando-se os dois sinais Gaussianos x e y de média nula e variância σ^2 , têm-se que a envoltória r é dada por

$$r^2 = (x + p)^2 + (y + q)^2, \quad (3.8)$$

onde p e q são os valores médios das componentes em fase e quadratura do sinal resultante de multipercursos.

Assim, a partir do gerador Rayleigh, um sinal Rice é obtido adicionando-se os valores médios p e q às componentes em fase e em quadratura. Estas modificações para obter um sinal com desvanecimento Rice através do método do espectro de Smith, são apresentados na Figura 3.4(b).

Um sinal com desvanecimento **Hoyt**, por definição, é representado através de dois sinais Gaussianos x e y de média nula e variâncias diferentes. Assim, como pode ser observado na Figura 3.4(c), para obter um gerador de sinais com desvanecimento Hoyt através do gerador com desvanecimento Rayleigh, basta ajustar os desvios padrões das componentes em fase e quadratura. O parâmetro q é dado por:

$$q = \frac{\sigma_x}{\sigma_y}, \quad (3.9)$$

onde σ_x é o desvio padrão da componente em fase e σ_y é o desvio padrão da componente em quadratura.

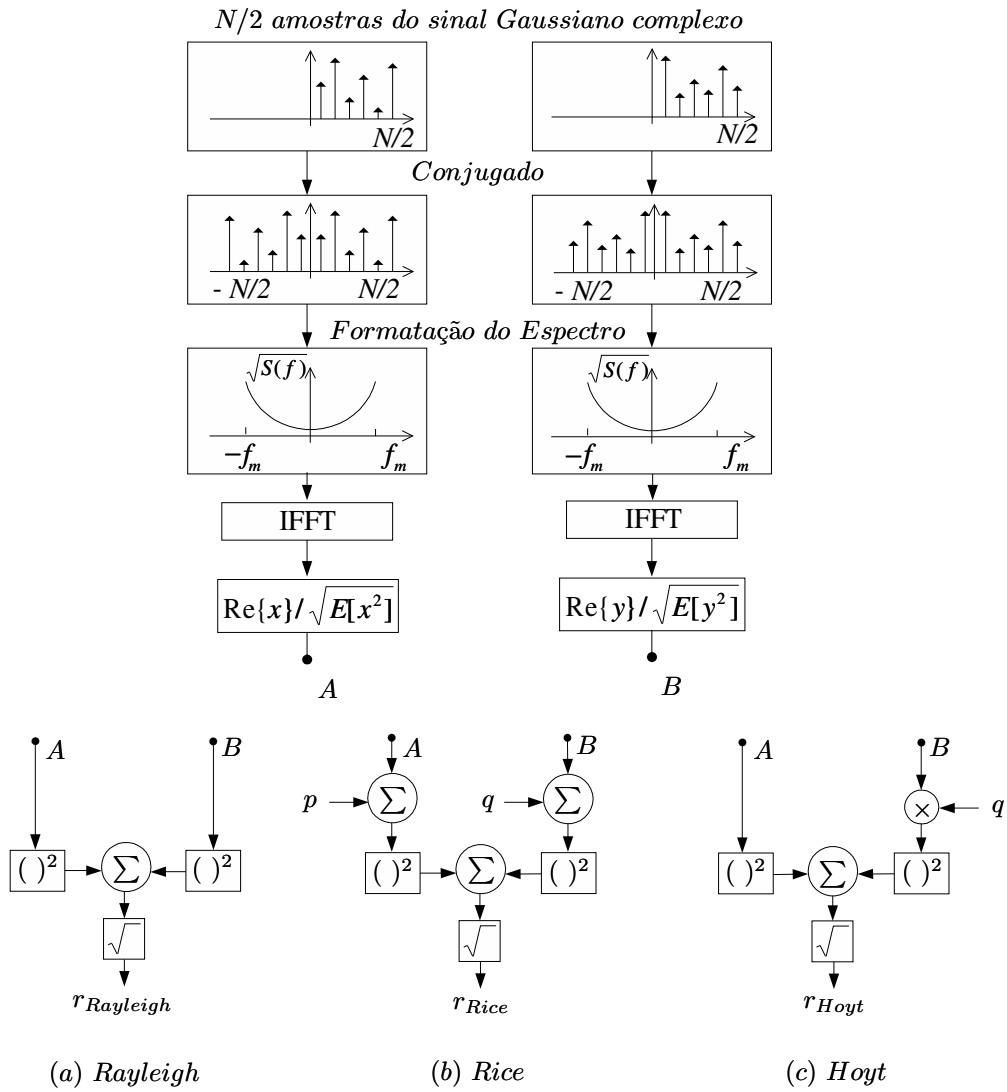


Figura 3.4: Gerador de sinais com desvanecimento: (a) Rayleigh, (b) Rice e (c) Hoyt.

3.4.1 Sinal $\kappa - \mu$

A envoltória r de um sinal com desvanecimento modelado pela distribuição $\kappa - \mu$ é dada por:

$$r^2 = \sum_{i=1}^n (x_i + p_i)^2 + \sum_{i=1}^n (y_i + q_i)^2.$$

Desta equação, admitindo-se a existência de apenas um *cluster*, é possível obter a envoltória r para um sinal modelado pela distribuição de Rice. Logo, tem-se que o i^{th} *cluster* é:

$$r_i^2 = (x_i + p_i)^2 + (y_i + q_i)^2.$$

Portanto, como cada *cluster* possui uma envoltória modelada pela distribuição de Rice, o sinal $\kappa - \mu$ pode ser definido como a somatória de vários *clusters* Rice.

$$r^2 = \sum_{i=1}^n r_i^2$$

O gerador de sinais $\kappa - \mu$ desenvolvido através do Método do Espectro de Smith é formado a partir da combinação de vários geradores Rice. O número de *clusters* do sinal é determinado pelo parâmetro μ , e apesar deste valor ser real, é possível o gerador de sinais $\kappa - \mu$ formar sinais para valores de μ múltiplos de $1/2$, devido ao gerador gaussiano, como pode ser observado na Figura 3.5.

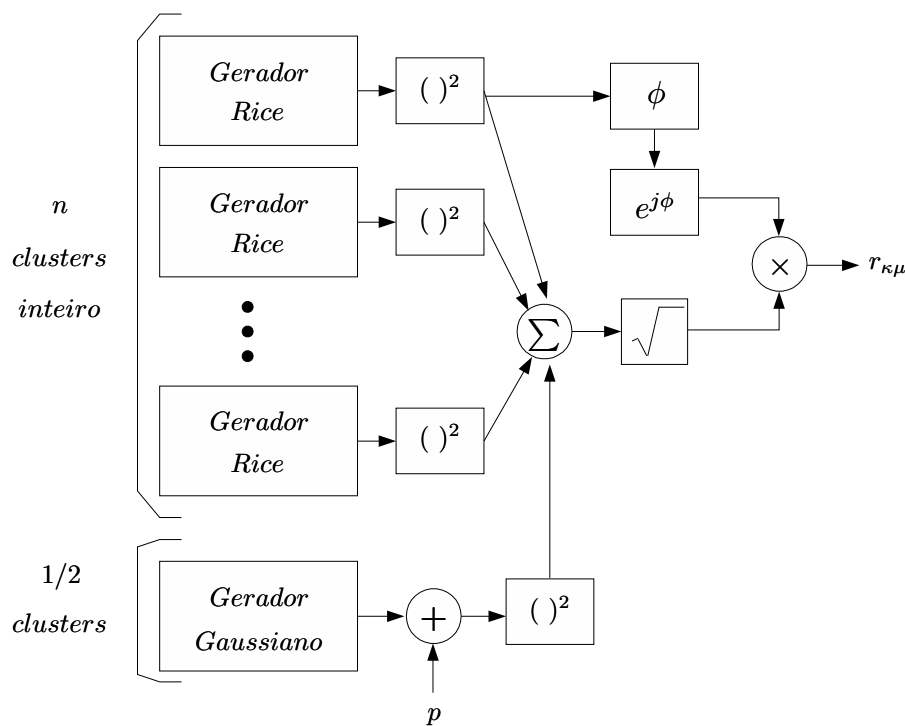


Figura 3.5: Implementação do gerador de sinais com desvanecimento $\kappa - \mu$ através do Método do Espectro de Smith.

A Figura 3.6(a) tem-se o efeito do desvanecimento $\kappa - \mu$ para um sinal na frequência de 900 MHz recebido por uma estação móvel que se desloca a uma velocidade de 60 km/h, com $\kappa = 0,5$ e $\mu = 2$. A Figura 3.6(b) faz uma comparação entre a FDP teórica e a FDP deste sinal $\kappa - \mu$ simulado através do Método do Espectro de Smith. As estatísticas foram feitas com cerca de 10^6 amostras.

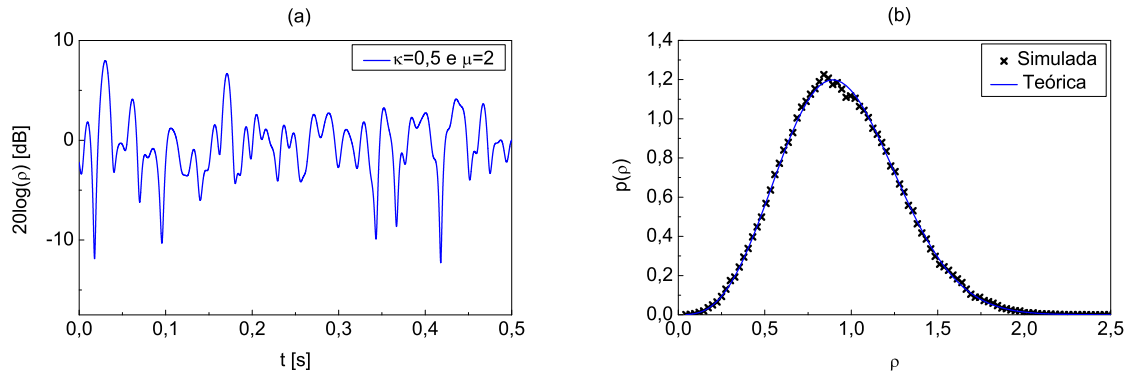


Figura 3.6: (a) Desvanecimento $\kappa - \mu$ para $f = 900$ MHz e $v = 60$ km/h. (b) FDP para o sinal gerado através do Método do Espectro de Smith.

3.4.2 Sinal $\eta - \mu$

De forma análoga ao gerador de sinais $\kappa - \mu$, pode-se obter o gerador de sinais $\eta - \mu$. A diferença é que, ao invés de se ter uma somatória de *clusters* Rice, tem-se uma somatória de *clusters* Hoyt.

Por definição, a envoltória r de um sinal com desvanecimento modelado pela distribuição $\eta - \mu$ é dada por:

$$r^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2.$$

Da equação acima, admitindo-se a existência de apenas um *cluster*, é possível obter a envoltória r para um sinal modelado pela distribuição de Hoyt. Logo, tem-se que o i^{th} *cluster* é:

$$r_i^2 = x_i^2 + y_i^2.$$

Assim, como cada *cluster* possui uma envoltória modelada pela distribuição de Hoyt, o sinal $\eta - \mu$ pode ser definido como a somatória de vários *clusters* Hoyt.

$$r^2 = \sum_{i=1}^n r_i^2$$

O gerador de sinais $\eta - \mu$ é composto por $n = \mu/2$ *clusters* modelados pela distribuição Hoyt. Esse gerador pode ser visualizado na Figura 3.7.

A Figura 3.8(a) tem-se o efeito do desvanecimento $\eta - \mu$ para um sinal na frequência de 900 MHz recebido por uma estação móvel que se desloca a uma velocidade de 60 km/h, com $\eta = 0,4$ e $\mu = 0,5$. Na Figura 3.8(b) faz-se uma comparação entre a FDP teórica e a FDP deste sinal $\eta - \mu$ simulado através do Método do Espectro de Smith. As estatísticas foram feitas com cerca de 10^6 amostras.

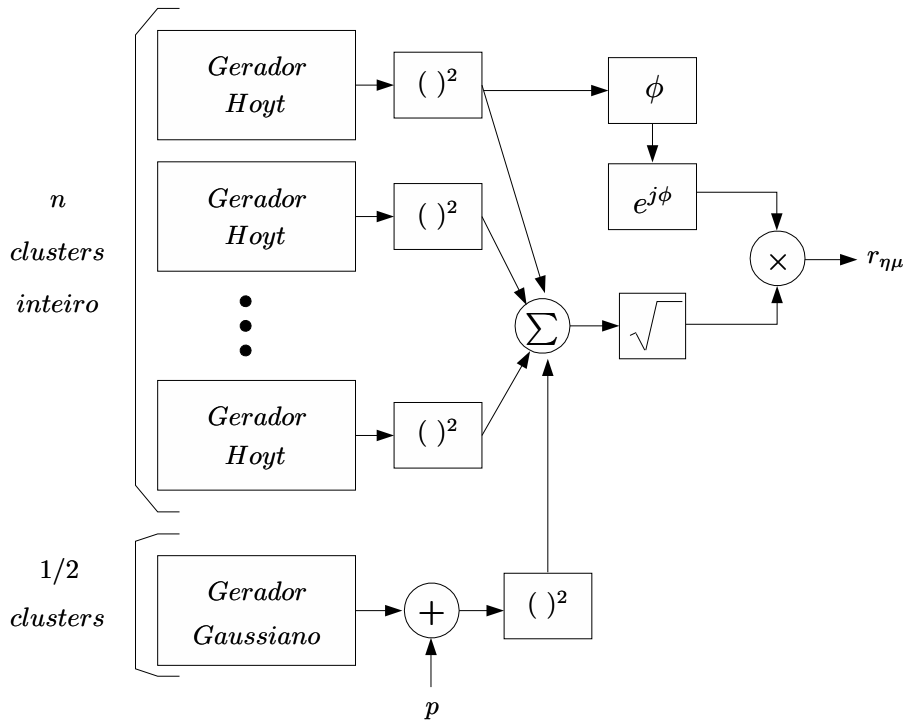


Figura 3.7: Implementação do gerador de sinais com desvanecimento $\eta - \mu$ através do Método do Espectro de Smith.

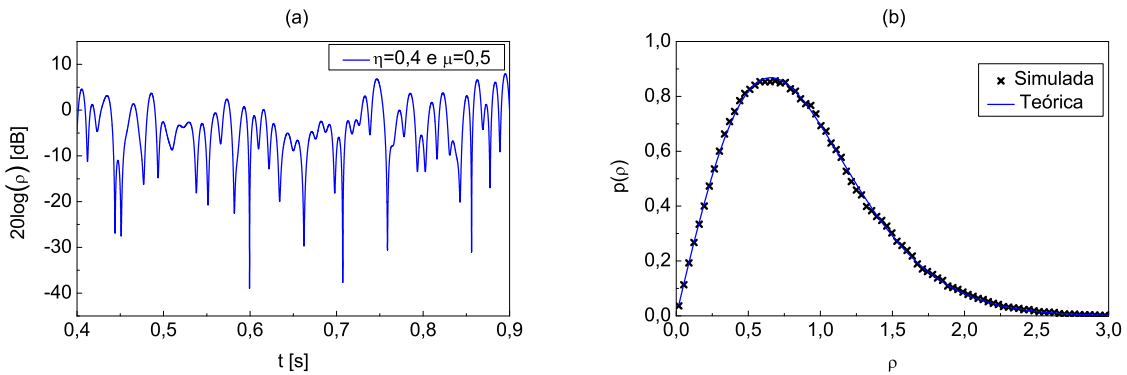


Figura 3.8: (a) Desvanecimento $\eta - \mu$ para $f = 900$ MHz e $v = 60$ km/h. (b) FDP para o sinal gerado através do Método do Espectro de Smith.

3.5 Conclusão

Este capítulo apresentou três métodos para gerar números aleatórios e sinais com desvanecimento de acordo com as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. A análise do histograma destes sinais mostra que eles possuem grande concordância com às respectivas FDP teóricas $p(\rho)$. Ainda, verifica-se pelos valores da Tabela 3.1 que o erro quadrático médio (MSE) entre o

histograma do sinal gerado e a FDP da envoltória normalizada não é igual a zero.

Tabela 3.1: MSE entre o histograma do sinal e a FDP teórica.

MSE (10^{-4})					
D		A-R		S	
κ	μ	κ	μ	κ	μ
0,85	3	0,75	1,5	0,5	2
0,2049		0,0999		1,5297	
η	μ	η	μ	η	μ
0,75	0,5	0,5	1	0,4	0,5
0,0645		0,8224		0,4935	

Estes valores para o erro quadrático médio podem ser adotados como referência para verificar o quanto os valores dos parâmetros estimados se aproximam dos valores dos parâmetros empregados para gerar os sinais.

A diferença entre os métodos propostos é que os sinais implementados através da definição, utilizando-se do conceito de variáveis aleatórias e os implementados através do Método da Aceitação-Rejeição, geram amostras aleatórias distribuídas de acordo com a FDP, enquanto que o sinal implementado através do Método do Espectro de Smith representa o efeito do desvanecimento por múltiplos percursos para um sinal se propagando em um canal móvel com um determinado efeito Doppler.

Os métodos apresentados neste capítulo serão utilizados no Capítulo 5 para gerar os sinais $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$ e estimar os parâmetros, de acordo com os estimadores propostos no Capítulo 4.

Capítulo 4

Métodos de Estimação dos Parâmetros das Distribuições

4.1 Introdução

Os valores dos parâmetros das distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$ definem uma FDP específica. Através da FDP é possível compreender o efeito dos múltiplos percursos na variação da potência instantânea de um sinal recebido.

Neste capítulo são apresentados dois métodos para estimar os parâmetros κ , η e μ das distribuições de Yacoub ($\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$), assim como o parâmetro m da distribuição de Nakagami.

Neste capítulo e no capítulo seguinte serão empregados os seguintes termos: FDP simulada, FDP teórica e FDP estimada. A FDP simulada corresponde ao histograma da envoltória gerada através de uma das técnicas descritas no capítulo anterior. As FDP's teórica e estimada correspondem a (2.17), para a distribuição $\kappa - \mu$ e a (2.54), para a distribuição $\eta - \mu$. Para a FDP teórica, os valores dos parâmetros das distribuições são os que foram empregados para gerar as envoltórias. Os valores dos parâmetros para a FDP estimada são aqueles obtidos pelos métodos propostos neste capítulo. A Figura 4.1 ilustra a diferença entre estas três FDP's.

Assim, a estimação dos valores dos parâmetros das distribuições têm por objetivo encontrar a FDP que melhor modela o efeito produzido no sinal recebido. Sinal este que propaga-se em um canal rádio móvel influenciado por múltiplos percursos.

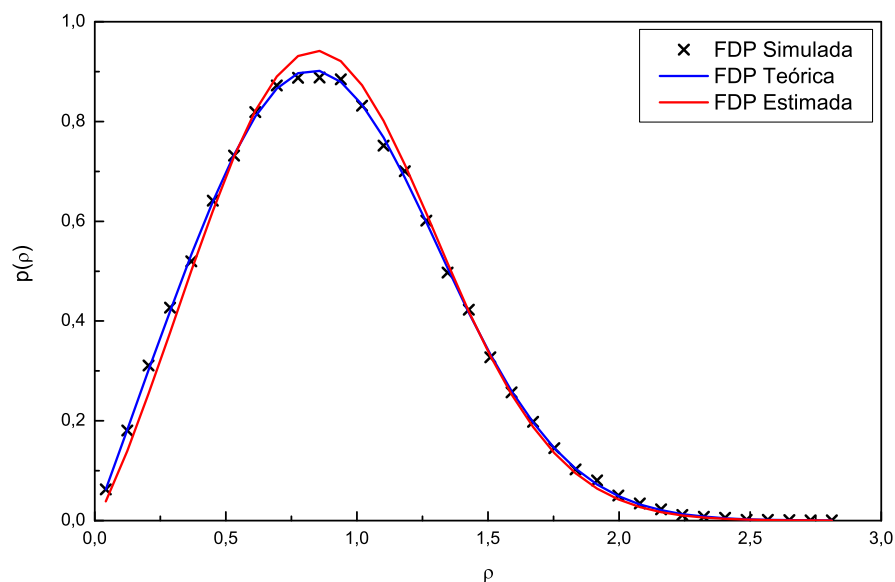


Figura 4.1: FDP's: simulada, teórica e estimada.

4.2 Estimadores

A Teoria da Estimação é um ramo da matemática que trata da estimação de valores de parâmetros baseado em um conjunto de dados práticos ou simulados. O grande propósito ao implementar um estimador é o de extrair um único ou múltiplos parâmetros desconhecidos em um determinado sinal. A Teoria da Estimação emprega vários conceitos ligados a estatística e ao processamento de sinais.

Existem diversos tipos de estimadores, por exemplo, a Minimização do Erro Quadrático Médio (MMSE - *Minimum Mean Square Error*) e o estimador baseado no Método dos Momentos Estatísticos (MME). Neste trabalho, estes dois estimadores estatísticos foram empregados, por serem métodos tradicionais e devido a simplicidade de implementação. Os valores dos parâmetros κ , η , μ e m foram estimados para caracterizar cada uma das distribuições a eles associados.

4.3 Método dos Momentos Estatísticos

O Método dos Momentos Estatísticos pode ser utilizado para estimar os valores dos parâmetros das distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Este método foi desenvolvido por Karl Pearson por volta de 1900 [22]. Baseia-se no fato de os momentos (ordinários) da amostra convergirem em probabilidade para os respectivos momentos da população.

Fundamentalmente, este método consiste em igualar um número conveniente de mo-

mentos amostrais aos momentos correspondentes da população e resolver o sistema de equações resultante para determinar os valores dos parâmetros desejados [24]. Pode-se empregar qualquer momento, entretanto, normalmente utiliza-se os primeiros momentos amostrais não nulos.

Por definição, para uma amostra aleatória de uma população (X_1, \dots, X_N) com FDP $f(x; \theta_1, \dots, \theta_k)$, caso exista, os momentos da população μ'_r , são dados por [22]:

$$\mu'_r = E[X^r], \quad r = 1, 2, \dots \quad (4.1)$$

e estarão em função dos k parâmetros,

$$\mu'_r = g(\theta_1, \dots, \theta_k). \quad (4.2)$$

Sabendo-se que os momentos da amostra são definidos por

$$M'_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^r, \quad (4.3)$$

equaciona-se o sistema de equações

$$\begin{cases} M'_1 = \mu'_1(\theta_1, \dots, \theta_k) \\ \vdots \\ M'_k = \mu'_k(\theta_1, \dots, \theta_k) \end{cases}$$

Assim, representando-se os momentos da população em termos dos parâmetros e resolvendo o sistema de equações, obtém-se os parâmetros estimados $\tilde{\theta}_1, \dots, \tilde{\theta}_k$ de $\theta_1, \dots, \theta_k$ pelo Método dos Momentos Estatísticos.

A grande vantagem do Método dos Momentos Estatístico é a simplicidade. Contudo, nem sempre pode ser utilizado, pois a aplicação do método exige a existência dos momentos da população em número suficiente. Ainda, este método não possui as propriedades de otimização dos estimadores de Máxima Verossimilhança e Mínimos Quadrados, ou seja, não leva a estimativas consideradas como as mais favoráveis. Em alguns casos, um pequeno número de amostras leva a resultados inaceitáveis. Isto raramente ocorre para um grande número de amostras.

Geralmente, as estimativas através desse método são utilizadas como valores iniciais para as estimativas através dos critérios de Máxima Verossimilhança e Mínimos Quadrados [23].

4.3.1 Distribuição $\kappa - \mu$

Para estimar os parâmetros κ e μ , através do Método dos Momentos Estatísticos, é necessário equacionar 3 momentos, formando um sistema de equações com três incógnitas. Os valores a serem estimados correspondem aos parâmetros κ , μ e variância. Os momentos estatísticos empregados foram os mais facilmente calculados.

A transformada de Laplace de $p(r^2)$, (2.8), é dada por:

$$\mathcal{L} [p(r^2)] = \frac{1}{(1 + 2\sigma^2 s)^n} \exp \left[-\frac{s \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2)}{1 + 2\sigma^2 s} \right].$$

O n -ésimo momento da envoltória r pode ser calculado através da seguinte equação [12]:

$$E [r^n] = \frac{d^n}{dv^n} \left\{ \mathcal{L}[p(r)] \Big|_{s=-v} \right\} \Big|_{v=0} \quad (4.4)$$

onde s é a variável complexa de Laplace.

Então, o valor quadrático médio de r é dado por:

$$E [r^2] = \frac{d}{dv} \left\{ \mathcal{L}[p(r^2)] \Big|_{s=-v} \right\} \Big|_{v=0} \quad (4.5)$$

ou seja:

$$E[r^2] = 2n\sigma^2 + \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2) \quad (4.6)$$

Da mesma forma:

$$E [r^4] = \frac{d^2}{dv^2} \left\{ \mathcal{L}[p(r^2)] \Big|_{s=-v} \right\} \Big|_{v=0} \quad (4.7)$$

$$E[r^4] = E^2[r^2] + 4\sigma^2 \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2) + 4n\sigma^4 \quad (4.8)$$

e ainda:

$$E [r^6] = \frac{d^3}{dv^3} \left\{ \mathcal{L}[p(r^2)] \Big|_{s=-v} \right\} \Big|_{v=0} \quad (4.9)$$

$$E[r^6] = E[r^4]E[r^2] + 2E[r^2](4\sigma^2 \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2) + 4n\sigma^4) + 24\sigma^4 \sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2) + 16n\sigma^6 \quad (4.10)$$

Por definição, κ é igual a, Equação (2.14):

$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2)}{2n\sigma^2}$$

Fazendo-se:

$$\sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2) = 2\kappa n\sigma^2, \quad (4.11)$$

é possível escrever o sistema de equações como:

$$\begin{cases} E[r^2] = 2n\sigma^2(\kappa + 1) \\ E[r^4] = E^2[r^2] + 4n\sigma^4(2\kappa + 1) \\ E[r^6] = E[r^4]E[r^2] + 2E[r^2](4n\sigma^4(2\kappa + 1)) + 16n\sigma^6(3\kappa + 1) \end{cases}$$

Resolvendo essas três equações para n , σ^2 e κ , tem-se:

$$n = \frac{E[r^2]}{2\sigma^2(1 + \kappa)} \quad (4.12)$$

$$\sigma^2 = \frac{(E[r^4] - E^2[r^2])(1 + \kappa)}{2E[r^2](1 + 2\kappa)} \quad (4.13)$$

$$\kappa^2[4a - 3b] + \kappa[4a - 4b] + [a - b] = 0 \quad (4.14)$$

onde:

$$a = \left(\frac{E[r^6] - E[r^4]E[r^2]}{2(E[r^4] - E^2[r^2])} - E[r^2] \right) E[r^2] \quad (4.15)$$

e

$$b = E[r^4] - E^2[r^2] \quad (4.16)$$

A partir dos dados simulados, primeiramente, determina-se os valores para as estatísticas $E[r^2]$, $E[r^4]$ e $E[r^6]$. Em seguida, resolve-se o sistema de equações para κ , μ e σ^2 . O número de *clusters* n , dado por (4.12), é igual ao parâmetro μ . O parâmetro κ é determinado por (4.14). Essa equação do segundo grau fornece duas raízes reais. O valor de κ é dado pela raiz real positiva.

4.3.2 Distribuição $\eta - \mu$

O desenvolvimento dos estimadores para os parâmetros η e μ da distribuição $\eta - \mu$, através do Método dos Momentos Estatísticos, segue o mesmo raciocínio apresentado para os estimadores dos parâmetros para a distribuição $\kappa - \mu$.

A transformada de Laplace das componentes em fase e quadratura é dado por (2.31):

$$\mathcal{L}[p(r_i^2)] = \frac{1}{2\sigma_x\sigma_y \sqrt{\left(s + \frac{1}{2\sigma_x^2}\right) \left(s + \frac{1}{2\sigma_y^2}\right)}}$$

A transformada de Laplace da soma de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas é igual ao produto das transformadas de Laplace de cada variável aleatória. Assim, a transformada de Laplace de $p(r)$ é calculada da seguinte forma:

$$\mathcal{L}[p(r^2)] = \{\mathcal{L}[p(r_i^2)]\}^n \quad (4.17)$$

$$\mathcal{L}[p(r^2)] = \left\{ \frac{1}{2\sigma_x\sigma_y\sqrt{\left(s + \frac{1}{2\sigma_x^2}\right)\left(s + \frac{1}{2\sigma_y^2}\right)}} \right\}^n \quad (4.18)$$

Em seguida, o n -ésimo momento da envoltória r é calculado através da (4.4), obtendo-se os seguintes momentos e o sistema de equações:

$$\begin{cases} E[r^2] = n(\eta + 1)\sigma_y^2 \\ E[r^4] = (n^2(\eta + 1)^2 + 2n(\eta^2 + 1))\sigma_y^4 \\ E[r^6] = (n^3(\eta + 1)^3 + 6n^2(\eta^3 + \eta^2 + \eta + 1) + 8n(\eta^3 + 1))\sigma_y^6 \end{cases}$$

Então, resolvendo-se o sistema para n , σ_y^2 e η , tem-se que:

$$n = \frac{E[r^2]}{(\eta + 1)\sigma_y^2} \quad (4.19)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{(E[r^4] - E^2[r^2])(\eta + 1)}{2E[r^2](\eta^2 + 1)} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} &\eta^4[E^4[r^2] + 2a^2 + 3aE^2[r^2] - E[r^2]E[r^6]] + \eta^3[2a^2] \\ &+ \eta^2[2E^4[r^2] + 6aE^2[r^2] - 2E[r^2]E[r^6]] + \eta[2a^2] \\ &+ [E^4[r^2] + 2a^2 + 3aE^2[r^2] - E[r^2]E[r^6]] = 0 \end{aligned} \quad (4.21)$$

onde:

$$a = E[r^4] - E^2[r^2] \quad (4.22)$$

Na distribuição $\eta - \mu$, o parâmetro $\mu = n/2$, onde n é o número de *clusters*, dado por (4.19). A equação do quarto grau, (4.21), fornece quatro raízes reais para o parâmetro η . Analisando essas raízes e sabendo que a distribuição $\eta - \mu$ é simétrica em torno de $0 \leq \eta \leq 1$ e $1 \leq \eta \leq \infty$, verifica-se que essas raízes formam dois pares simétricos. A escolha do par pode ser feita calculando o menor erro quadrático médio entre as FDP's simulada e estimada.

4.4 Estimador MMSE

O MMSE é um estimador que resulta nos valores dos parâmetros com o menor Erro Quadrático Médio (MSE - *Mean Square Error*) possível.

O MSE é uma medida aceitável de controle e qualidade [25]. O MSE é o valor esperado do quadrado do erro e corresponde a quanto o estimador distância-se do valor a ser estimado. Diversos algoritmos utilizados em Filtragem Adaptativa, como o LMS (*Least Mean Square*) e o RLS (*Recursive Least Square*), baseiam-se em minimizar o erro quadrático médio. O algoritmo aqui desenvolvido, assim como o LMS, também busca minimizar o MSE a cada iteração.

O MMSE será usado para estimar o comportamento do canal de acordo com alguns modelos de distribuição: $\kappa - \mu$, $\eta - \mu$ e Nakagami- m . A estimativa do canal será realizada através do ajuste dos valores dos parâmetros κ , η , μ e m para cada distribuição. A decisão do modelo mais apropriado para caracterizar o conjunto de amostras (ambiente) é feita por base no menor valor do MSE.

4.4.1 Estimador MMSE para as distribuições $\kappa - \mu$, $\eta - \mu$ e Nakagami- m

Para ajustar os parâmetros, o algoritmo desenvolvido é implementado de forma a minimizar o erro quadrático médio entre a FDP simulada e a FDP estimada para uma determinada distribuição.

Assim, a medida de controle, ou ainda, índice de desempenho é dado pelo valor esperado do erro quadrático médio entre estas duas FDP's:

$$E \left\{ \sum_{i=1}^N [p(\rho_i) - \hat{p}(\rho_i)]^2 \right\}, \quad (4.23)$$

onde $p(\rho_i)$ e $\hat{p}(\rho_i)$ correspondem a FDP simulada e a FDP estimada, respectivamente.

Em seguida, definindo-se $\xi = \kappa, \eta, \mu$ ou m , o gradiente do erro quadrático médio, ε , em relação ao parâmetro ξ é:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} E \left\{ \sum_{i=1}^N [p(\rho_i) - \hat{p}(\rho_i)]^2 \right\}, \quad (4.24)$$

onde $\partial/\partial \xi$ é a derivada parcial em relação ao parâmetro ξ .

A Equação (4.24) pode ser simplificada para:

$$\varepsilon = E \left\{ -2 \sum_{i=1}^N [\hat{p}(\rho_i) - p(\rho_i)] \frac{\partial}{\partial \xi} p(\rho_i) \right\}. \quad (4.25)$$

O critério de otimização, para o ajuste dos parâmetros, consiste em fazer a Equação

(4.25) igual a zero, ou seja, $\varepsilon = 0$. A Equação (4.23) é uma função quadrática e corresponde a uma superfície parabólica. Desta forma, o algoritmo de adaptação busca encontrar o vértice da parábola, onde as FDP's são iguais e corresponde ao mínimo erro quadrático médio. Para isso, o parâmetro ξ da FDP estimada é ajustado na direção oposta ao gradiente do erro quadrático médio, atualizado da seguinte forma:

$$\xi = \xi - \Delta p \text{sign}(\varepsilon), \quad (4.26)$$

onde Δp é o passo de atualização e $\text{sign}(\varepsilon)$ retorna o sinal do gradiente do erro dado por (4.25). Logo, a cada iteração o parâmetro ξ é ajustado, diminuindo o erro quadrático médio entre as duas FDP's.

A seguir são apresentadas as derivadas parciais das FDP's das distribuições $\kappa - \mu$, $\eta - \mu$ e Nakagami- m em relação ao parâmetro ξ utilizadas em (4.25). Para as distribuições Yacoub $\kappa - \mu$ e Yacoub $\eta - \mu$, são estimados dois parâmetros em cada distribuição: parâmetros κ e μ e parâmetros η e μ , respectivamente. Assim, é necessário calcular a derivada parcial dessas distribuições em relação aos dois parâmetros. Na distribuição Nakagami- m calcula-se apenas a derivada parcial em relação ao parâmetro m .

Derivada da FDP $\kappa - \mu$ em relação a κ e μ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \kappa} p(\rho_i) &= \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\kappa\mu)} \rho_i^\mu \exp(-\mu(1+\kappa)\rho_i^2) \left\{ \left[\frac{\frac{\mu+1}{2}}{1+\kappa} - \frac{\frac{\mu-1}{2}}{\kappa} - \mu - \mu\rho_i^2 \right] \times \right. \\ &\quad \left. I_{\mu-1}(Z) + \frac{\mu}{2} \frac{(1+2\kappa)}{\sqrt{\kappa(1+\kappa)}} \rho_i \left[I_{\mu-2}(Z) + I_\mu(Z) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \mu} p(\rho_i) &= \frac{(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\kappa\mu)} \rho_i^\mu \exp(-\mu(1+\kappa)\rho_i^2) \left\{ \left[2 + \mu \ln\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right) - 2\mu\kappa + 2\mu \ln(\rho_i) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 2\mu(1+\kappa)\rho_i^2 \right] I_{\mu-1}(Z) + 2\mu\rho_i \sqrt{\kappa(1+\kappa)} \left[I_{\mu-2}(Z) + I_\mu(Z) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Derivada da FDP $\eta - \mu$ em relação a η e μ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \eta} p(\rho_i) &= \frac{4\sqrt{\pi}\mu^{\mu+\frac{1}{2}}h^\mu}{\Gamma(\mu)H^{\mu-\frac{1}{2}}} \rho_i^{2\mu} \exp(-2\mu h\rho_i^2) \left\{ \left(\frac{-\eta^{-2}+1}{4} \right) I_{\mu-\frac{1}{2}}(Z) \left[\frac{\mu}{h} - 2\mu\rho_i^2 \right] + \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{-\eta^2-1}{4} \right) \left[\frac{-(\mu-\frac{1}{2})}{H} I_{\mu-\frac{1}{2}}(Z) + \mu\rho_i^2 \left[I_{\mu-\frac{3}{2}}(Z) + I_{\mu+\frac{1}{2}}(Z) \right] \right] \right\}. \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \mu} p(\rho_i) &= \frac{4\sqrt{\pi}\mu^{\mu+\frac{1}{2}}h^\mu}{\Gamma(\mu)H^{\mu-\frac{1}{2}}} \rho_i^{2\mu} \exp(-2\mu h\rho_i^2) \left\{ I_{\mu-\frac{1}{2}}(Z) \left[\ln\left(\frac{\mu h}{H}\right) + \frac{\mu+\frac{1}{2}}{\mu} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \Psi(\mu) + 2\ln(\rho_i) - 2h\rho_i^2 \right] + H\rho_i^2 \left[I_{\mu-\frac{3}{2}}(Z) + I_{\mu+\frac{1}{2}}(Z) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Derivada da FDP Nakagami- m em relação a m

$$\frac{\partial}{\partial m} p(\rho_i) = \frac{2m^m \rho_i^{2m-1} \exp(-m\rho_i^2)}{\Gamma(m)} \left\{ \left[(1 + \ln(m) + 2\ln(\rho_i) - \rho_i^2) \right] - \Psi(m) \right\} \quad (4.31)$$

4.5 Conclusão

Neste capítulo desenvolveu-se os estimadores baseado no Método dos Momentos Estatísticos e no algoritmo MMSE para o cálculo dos parâmetros κ e μ da distribuição $\kappa - \mu$ e η e μ para a distribuição $\eta - \mu$. Para o algoritmo MMSE são calculadas as derivadas parciais em relação aos parâmetros das distribuições citadas, assim como a derivada parcial para a FDP Nakagami- m . O estimador baseado no Método dos Momentos Estatísticos e o desenvolvimento do algoritmo MMSE constituem uma contribuição original desta dissertação.

Capítulo 5

Simulações e Resultados

5.1 Introdução

Para a validação dos estimadores propostos no Capítulo 4 foram geradas envoltórias (através da definição, método da Aceitação-Rejeição e método do espectro de Smith) de acordo com as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Os estimadores também foram empregados para caracterizar os valores dos parâmetros para sinais provenientes de um simulador real de canal.

Primeiramente, os parâmetros κ e μ e os parâmetros η e μ das envoltórias foram estimados através do Método dos Momentos Estatísticos e em seguida, ajustados pelo algoritmo MMSE. Os valores calculados pelo MME são utilizados como valores iniciais para o ajuste dos parâmetros através do algoritmo MMSE. O critério de parada do algoritmo MMSE é fazer com que (4.25) seja menor que a ordem de grandeza do MSE das Tabelas 5.2 e 5.4.

O parâmetro m da distribuição Nakagami também foi estimado. O fator de desvanecimento m é determinado através de (2.59). Ainda, tentou-se otimizar o ajuste da FDP Nakagami ao conjunto de dados através do algoritmo MMSE. O interesse em incluir a distribuição Nakagami- m nos resultados é porque essa distribuição define um plano limitante entre a distribuição $\kappa - \mu$ e a distribuição $\eta - \mu$.

Os resultados para os estimadores dos parâmetros das distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$ para o Método dos Momentos Estatístico e do algoritmo MMSE são apresentados neste capítulo.

5.2 Valores estimados para os parâmetros das distribuições $\kappa - \mu$, $\eta - \mu$ e Nakagami- m

Para que os resultados obtidos, através do Método dos Momentos Estatísticos e do MMSE, forneçam boas estimativas para os valores dos parâmetros é necessário um grande número de amostras. Os sinais gerados através do método do espectro de Smith, além de um pequeno

instante de amostragem, também necessita que a análise dos estimadores seja feita em um trecho de sinal relativamente longo. Uma análise do número de amostras necessárias para obter adequadamente os valores dos parâmetros é apresentada nas Figuras 5.1 e 5.2, para envoltórias geradas a partir da definição, enquanto que as Figuras 5.3 e 5.4 mostram o comportamento dos estimadores para envoltórias em função da duração do sinal geradas através do Método do Espectro de Smith.

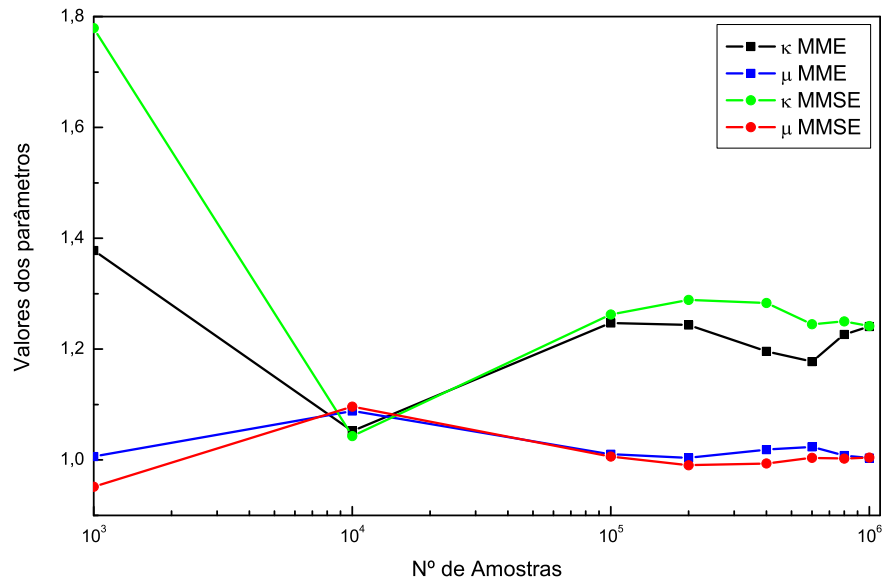


Figura 5.1: Valores dos parâmetros estimados x número de amostras, para $\kappa = 1,25$ e $\mu = 1$.

Usando o MME e o MMSE, a partir de dados gerados pela definição e Aceitação-Rejeição, verificou-se que a exatidão nas estimativas é proporcional ao número de amostras. A análise usando o método do espectro de Smith evidenciou dois casos. O primeiro, é preciso usar uma taxa de amostragem que resulte num instante de amostragem pequeno o suficiente para poder representar os nulos do sinal. Em segundo, o trecho do sinal sob análise deve ser longo para que as estatísticas converjam.

Foram gerados sinais possuindo, na média, 1 milhão de pontos para obter os resultados dos valores dos parâmetros através dos estimadores para as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, Tabela 5.1 e Tabela 5.3, respectivamente. Na análise dos sinais gerados através do método do espectro de Smith, também empregou-se em torno de 1 milhão de pontos, com um trecho de sinal de 60 segundos, velocidade do móvel de 90 km/h e frequência de operação de 900 MHz.

Os valores dos parâmetros κ e μ para os estimadores da distribuição $\kappa - \mu$ são apresentados na Tabela 5.1. Nesta são apresentados os resultados para o Método dos Momentos Estatísticos, assim como os resultados obtidos para o ajuste dos parâmetros através do algoritmo MMSE. O valor de m corresponde ao fator de desvanecimento da distribuição

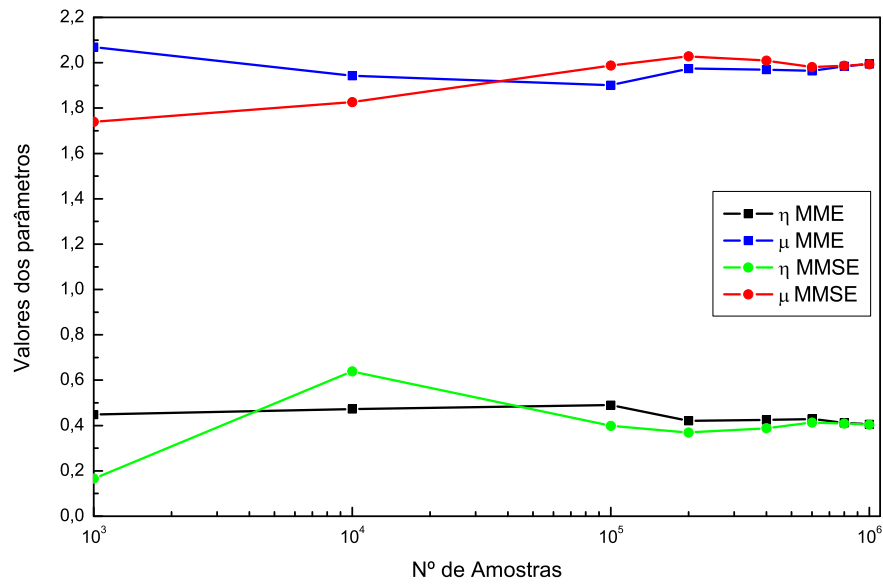


Figura 5.2: Valores dos parâmetros estimados x número de amostras, para $\eta = 0,4$ e $\mu = 2$.

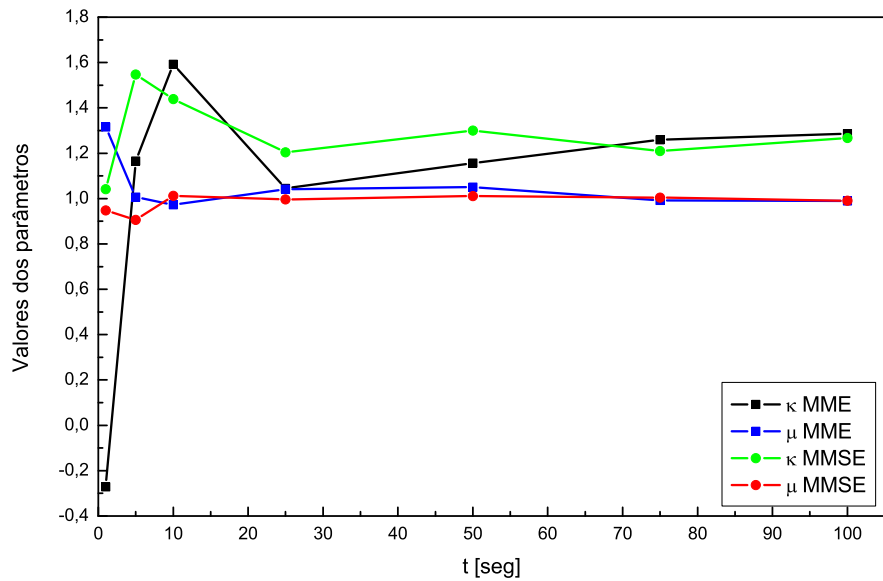


Figura 5.3: Valores dos parâmetros estimados x tempo, para $\kappa = 1,25$ e $\mu = 1$.

Nakagami e a seguinte relação é válida:

$$m = \frac{E[r^2]}{Var[r^2]} = \frac{\mu(1 + \kappa)^2}{1 + 2\kappa} \tag{5.1}$$

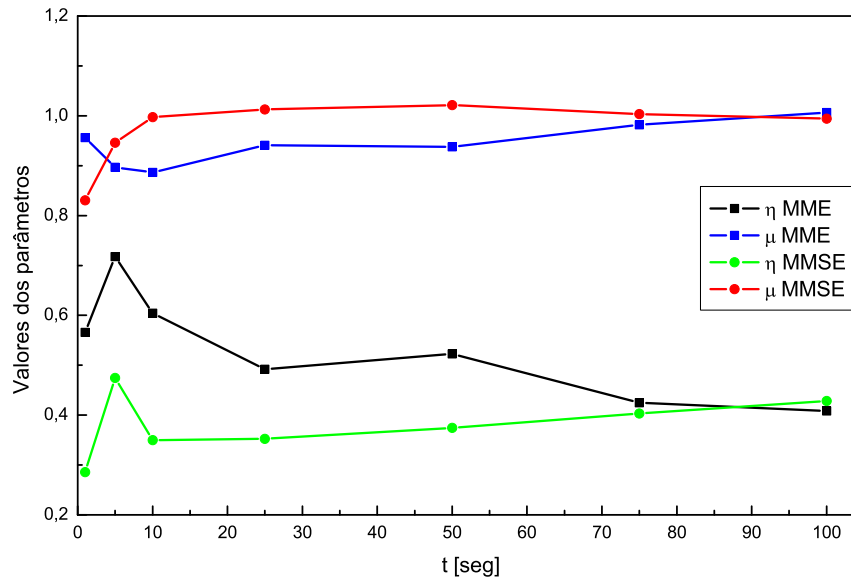


Figura 5.4: Valores dos parâmetros estimados x tempo, para $\eta = 0,4$ e $\mu = 1$.

Assim, é importante lembrar que o valor de m apresentado na Tabela 5.1, para o MME, corresponde à (5.1).

Tabela 5.1: Valores estimados para κ, μ e m , através do MME e MMSE.

Envoltória		Definição		Ac-Rejeição		Mét. Esp. Smith	
Estimador		MME	MMSE	MME	MMSE	MME	MMSE
κ	1,25	1,2406	1,2418	1,2282	1,2575	1,0195	1,2889
μ	1	1,0034	1,0042	1,0073	0,9983	1,0728	0,9835
m	1,4464	1,4470	1,3320	1,4470	1,3320	1,4397	1,3242
κ	4,5	4,5328	4,4970	4,4419	4,4632	4,5170	4,4963
μ	1	0,9948	0,9990	1,0125	1,0075	0,9996	1,0002
m	3,025	3,0255	2,9206	3,0337	2,9293	3,0325	2,9187
κ	0,75	—	—	0,7415	0,7816	1,0974	0,7219
μ	1,5	—	—	1,5052	1,4874	1,3406	1,5080
m	1,8375	—	—	1,8386	1,7583	1,8460	1,7518
κ	0,65	0,6553	0,6776	0,6498	0,6409	0,6947	0,6826
μ	2	1,9979	1,9817	1,9948	1,9970	1,9769	1,9894
m	2,3673	2,3694	2,2949	2,3611	2,2864	2,3763	2,3133
κ	0,8	0,8067	0,8124	0,7813	0,8355	1,0566	0,7734
μ	3	2,9925	2,9873	3,0249	2,9712	2,7810	3,0304
m	3,7385	3,7377	3,6641	3,7456	3,6719	3,7783	3,6687

A seguir, na Tabela 5.2, tem-se os valores dos MSE entre as FDP's simulada e teórica e entre as FDP's simulada e estimada para a distribuição $\kappa - \mu$. Os valores obtidos para o MSE possuem ordem de grandeza de 10^{-4} .

Tabela 5.2: MSE entre as FDP's simulada e teórica e entre as FDP's simulada e estimada para a distribuição $\kappa - \mu$.

MSE (10^{-4})		κ	μ	κ	μ	κ	μ	κ	μ	κ	μ
Envolt.	Método	1,25	1	4,5	1	0,75	1,5	0,65	2	0,8	3
D.	Teórico	0,110260		0,164034		-		0,107620		0,207717	
	MME	0,109839		0,165234		-		0,106752		0,208220	
	MMSE	0,108890		0,162037		-		0,100912		0,208744	
A.-R.	Teórico	0,075899		0,184247		0,099909		0,148044		0,456377	
	MME	0,082337		0,185518		0,102340		0,135354		0,455610	
	MMSE	0,074758		0,183081		0,094311		0,133002		0,449612	
S.	Teórico	0,886094		2,736877		0,641234		1,076729		2,336733	
	MME	1,509448		2,741682		1,678691		1,085625		2,618665	
	MMSE	0,889843		2,737403		0,616836		1,062845		2,335939	

Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados de η e μ para os estimadores da distribuição $\eta - \mu$. Também são incluídos os valores de m para a distribuição de Nakagami, tendo-se a seguinte relação:

$$m = \frac{E[r^2]}{Var[r^2]} = \frac{\mu(1 + \eta)^2}{1 + \eta^2}. \tag{5.2}$$

Logo, o valor de m na Tabela 5.3, para o MME, é dado por esta igualdade.

Tabela 5.3: Valores estimados para η , μ e m , através do MME e MMSE.

Envoltória		Definição		Ac-Rejeição		Mét. Esp. Smith	
Estimador		MME	MMSE	MME	MMSE	MME	MMSE
η	0,6	0,5724	0,6090	0,9196	0,6009	0,6171	0,6140
μ	0,5	0,5039	0,4982	0,4779	0,4991	0,5055	0,5093
m	0,9411	0,9384	0,9767	0,9542	0,9770	0,9574	0,9977
η	0,2	0,2028	0,2108	0,1537	0,2090	0,1139	0,2060
μ	1	0,9978	0,9844	1,0691	0,9871	1,1618	1,0060
m	1,3846	1,3866	1,5073	1,3902	1,5076	1,4232	1,5282
η	0,5	0,5109	0,5080	0,4936	0,4920	0,5060	0,5057
μ	1	0,9972	1,0000	0,9997	1,0020	0,9956	1,0063
m	1,8	1,8053	1,8811	1,7933	1,8744	1,7979	1,8925
η	0,375	0,3631	0,3718	0,3583	0,3854	0,3896	0,3911
μ	1,5	1,5133	1,5056	1,5155	1,4863	1,4989	1,4846
m	2,4863	2,4842	2,6007	2,4779	2,5928	2,5131	2,5974
η	0,4	0,4049	0,4036	0,4168	0,4044	0,4632	0,4016
μ	2	1,9941	1,9938	1,9740	1,9887	1,9177	2,0052
m	3,3793	3,3816	3,4818	3,3761	3,4754	3,3807	3,4922

A Tabela 5.4 apresenta o MSE entre as FDP's simulada e teórica e entre as FDP's simulada e estimada para a distribuição $\eta - \mu$.

Observa-se, tanto na Tabela 5.2, quanto na Tabela 5.4 que o erro quadrático médio entre as FDP's simulada e teórica e entre as FDP's simulada e estimada são próximos. Mesmo o MSE entre a FDP simulada e a teórica não é igual a zero, que pode ser considerada a

Tabela 5.4: MSE entre as FDP's simulada e teórica e entre as FDP's simulada e estimada para a distribuição $\eta - \mu$.

MSE (10^{-4})		η	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η	μ
Envolt.	Método	0,6	0,5	0,2	1	0,5	1	0,375	1,5	0,4	2
D.	Teórico	0,054225		0,059514		0,095599		0,105504		0,127970	
	MME	0,054021		0,059446		0,090795		0,108655		0,129654	
	MMSE	0,053961		0,059056		0,088529		0,103331		0,127743	
A.-R.	Teórico	0,096652		0,089175		0,822432		0,120189		0,074482	
	MME	0,804796		0,298163		0,821535		0,138095		0,074891	
	MMSE	0,094345		0,089433		0,818703		0,118321		0,067649	
S.	Teórico	0,646952		0,957367		0,868733		0,846688		1,359450	
	MME	0,429713		1,462124		0,902419		0,952381		1,716323	
	MMSE	0,409896		0,790656		0,808896		0,890170		1,360109	

situação ótima para comparação. Isto mostra que ambos os métodos conseguem obter uma estimativa adequada para os valores dos parâmetros, pois aproximaram-se do valor MSE obtido entre a FDP simulada e teórica.

Em alguns resultados, quando os valores dos parâmetros estimados através do MME não apresentaram boa concordância com os valores teóricos de simulação, o MMSE obteve um melhor ajuste. Isto pode ser verificado nestas tabelas através da redução do MSE. Alguns dos resultados das tabelas anteriores são ilustrados a seguir. Estes resultados são apresentados para envoltórias geradas através dos três métodos descritos no Capítulo 3 e diferentes valores dos parâmetros.

Ao invés de apresentar gráficos da FDP para os parâmetros estimados para as distribuições $\kappa - \mu$, $\eta - \mu$ e Nakagami- m , utilizou-se gráficos da Função de Distribuição Cumulativa (FDC), que são obtidas integrando-se a FDP, $p(\rho)$, ou seja:

$$P(\rho) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\rho)d\rho. \tag{5.3}$$

A análise das curvas estimadas para estas distribuições através da FDC permitem comparar o ajuste das distribuições aos dados mais facilmente.

5.2.1 Ajuste da distribuição $\kappa - \mu$

A Figura 5.5 à Figura 5.7 demonstram um comparativo entre o ajuste dos dados através da distribuição $\kappa - \mu$ e a distribuição Nakagami- m , para os parâmetros estimados através do Método dos Momentos Estatísticos e do algoritmo MMSE. A Figura 5.5 corresponde a $\kappa = 1, 25$ e $\mu = 1$, gerada através da definição, a Figura 5.6 corresponde a $\kappa = 0, 8$ e $\mu = 3$, gerada através do método da Aceitação-Rejeição e a Figura 5.7 correspondem a $\kappa = 0, 65$ e $\mu = 2$, gerada através do Método do Espectro de Smith.

Pode-se observar que as curvas para a distribuição $\kappa - \mu$ se ajustam perfeitamente aos dados, tanto para os parâmetros estimados através do Método dos Momentos, quanto para

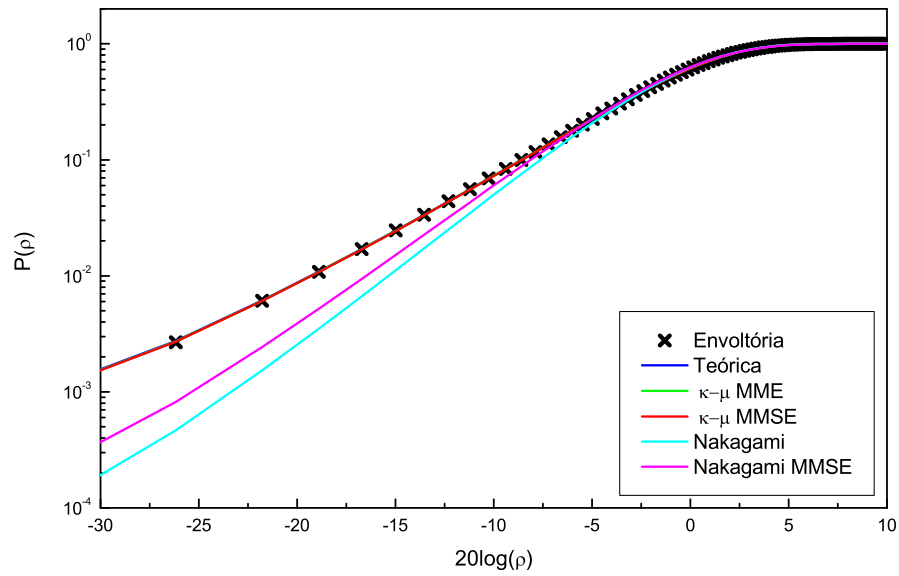


Figura 5.5: Comparativo entre as FDC's para $\kappa = 1, 25$ e $\mu = 1$ pelo método da definição.

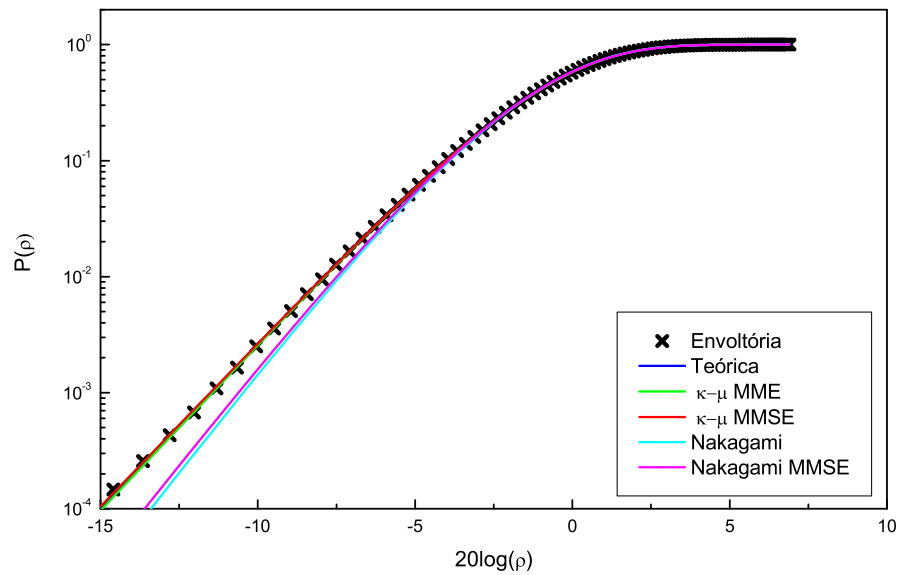


Figura 5.6: Comparativo entre as FDC's para $\kappa = 0,8$ e $\mu = 3$ pelo método da Aceitação-Rejeição.

as estimativas através do algoritmo MMSE.

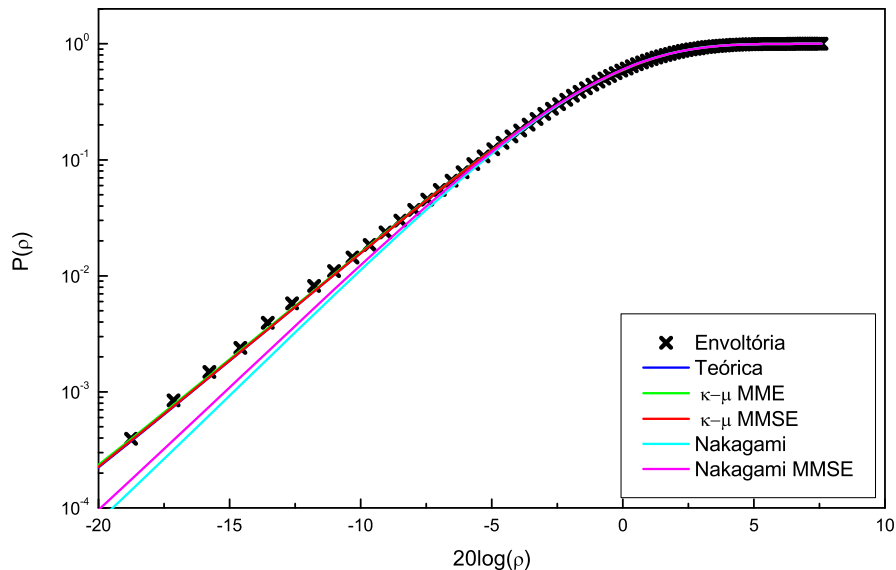


Figura 5.7: Comparativo entre as FDC's para $\kappa = 0,65$ e $\mu = 2$ pelo Método do Espectro de Smith.

5.2.2 Ajuste da distribuição $\eta - \mu$

A Figura 5.8 à Figura 5.10 ilustram um comparativo entre o ajuste dos dados através da distribuição $\eta - \mu$ e a distribuição Nakagami- m , para os parâmetros estimados através do Método dos Momentos Estatísticos e do algoritmo MMSE. A Figura 5.8 corresponde a $\eta = 0,5$ e $\mu = 1$, gerada através da definição, a Figura 5.9 corresponde a $\eta = 0,4$ e $\mu = 2$, gerada através do método da Aceitação-Rejeição e a Figura 5.10 correspondem a $\eta = 0,375$ e $\mu = 1,5$, gerada através do Método do Espectro de Smith.

Também é possível verificar nos gráficos para a distribuição $\eta - \mu$ que as curvas para os parâmetros estimados tiveram grande concordância com as curvas simuladas.

5.3 Simulador de Canal

Os estimadores apresentados foram empregados na estimação dos valores dos parâmetros de sinais com desvanecimento produzidos por um simulador real de canal. Através desse equipamento foi possível configurar sinais com apenas um *cluster*, o que resulta nas distribuições de Rice ou Hoyt. Isto corresponde a $\mu = 1$ e $\mu = 0,5$, para as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, respectivamente.

O diagrama em blocos da Figura 5.11 demonstra os passos utilizados em laboratório para a realização das medidas.

No Anexo A tem-se um resumo sobre o simulador de canal.

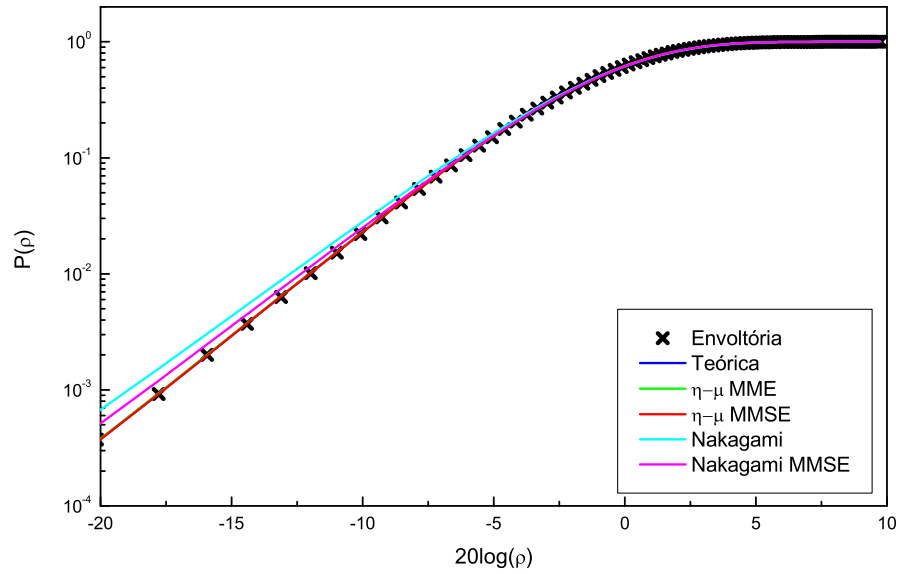


Figura 5.8: Comparativo entre as FDC's para $\eta = 0,5$ e $\mu = 1$ pelo método da definição.

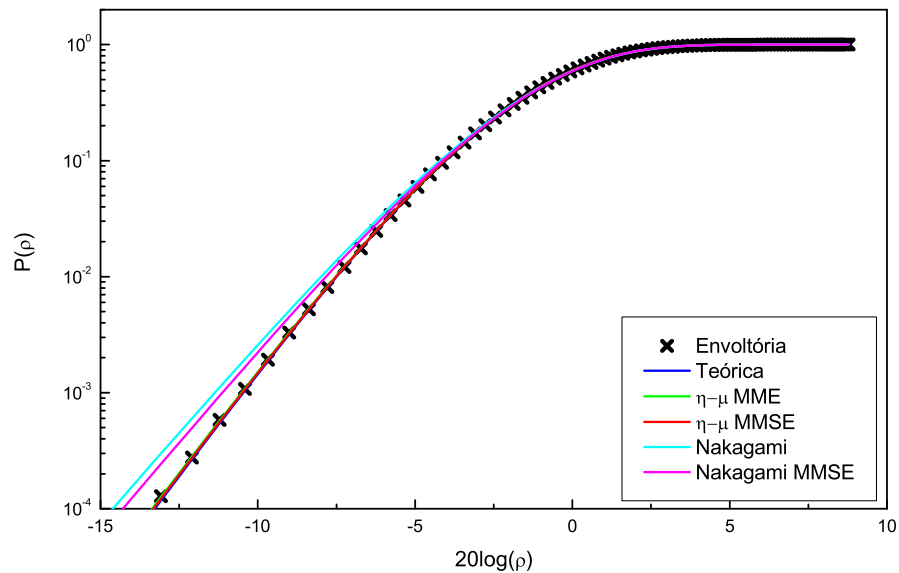


Figura 5.9: Comparativo entre as FDC's para $\eta = 0,4$ e $\mu = 2$ pelo método da Aceitação-Rejeição.

O simulador de canal tem como objetivo simular o efeito do desvanecimento rápido, ou seja, variações instantâneas na amplitude do sinal recebido por uma estação móvel que se desloca a uma certa velocidade em uma determinada frequência.

O analisador de espectro desempenhou a função de um receptor. Isto é possível ajustando-

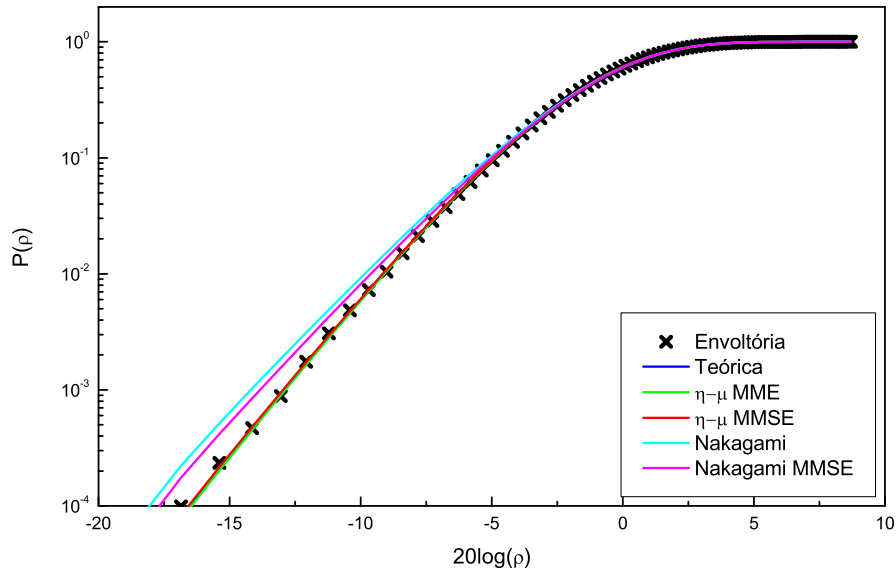


Figura 5.10: Comparativo entre as FDC's para $\eta = 0,375$ e $\mu = 1,5$ pelo Método do Espectro de Smith.



Figura 5.11: Diagrama em blocos para aquisição do sinal.

se o *span* do equipamento para zero, o que permite medir a potência da portadora. O modelo do analisador de espectro utilizado possui uma saída *Y-axis* que representa o sinal exibido na tela do equipamento. Esta saída é conectada a placa de aquisição para coleta dos dados.

A placa de aquisição foi configurada para operar com uma frequência de amostragem de 20 kHz. No computador, através do software de tratamento dos dados adquiridos pela placa, os sinais são exportados para arquivos com uma extensão compatível para a análise no *Matlab*®.

A Figura 5.12 mostra um trecho do efeito do desvanecimento, amostrado do simulador de canal, para um sinal recebido por uma estação móvel que se desloca a uma velocidade de 90 km/h e se propaga com uma frequência de 900 MHz.

A Tabela 5.5 apresenta os valores estimados pelo MME e pelo algoritmo MMSE para os sinais gerados pelo simulador de canal.

Os parâmetros da distribuição $\kappa-\mu$ foram estimados adequadamente pelos dois métodos. A Figura 5.13 ilustra esse ajuste satisfatório para $\kappa = 2$ e $\mu = 1$. Entretanto, observa-se que os parâmetros η e μ para o MME não se aproximaram dos valores esperados, embora o

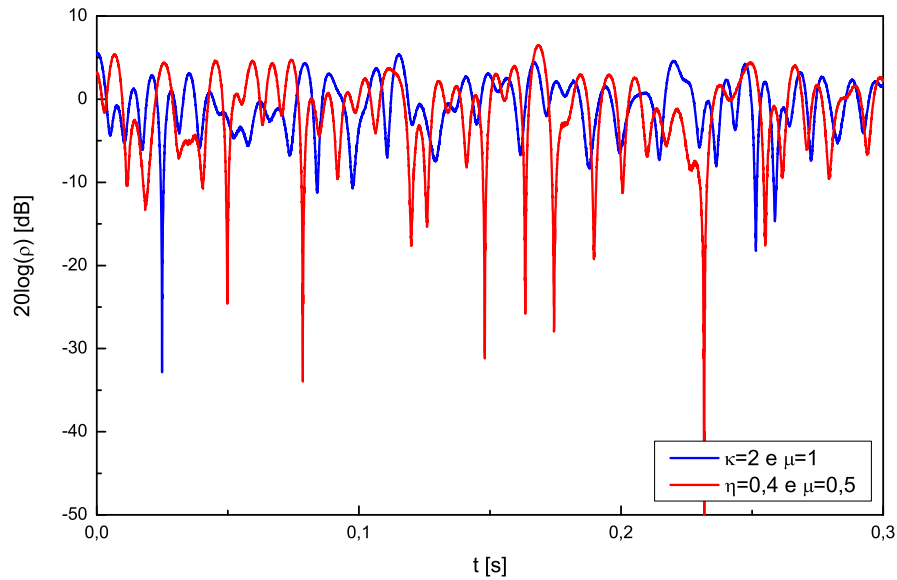


Figura 5.12: Efeito do desvanecimento amostrado do simulador de canal para $f = 900$ MHz e $v = 90$ km/h.

Tabela 5.5: Valores estimados para os parâmetros das distribuições $\kappa - \mu$, $\eta - \mu$ e Nakagami- m , através do MME e MMSE para os dados amostrados do simulador de canal.

Sinal		Simulador de Canal		Sinal		Simulador de Canal	
Estimador		MME	MMSE	Estimador	MME	MMSE	
κ	0,74	0,7499	0,7405	η	0,1	0,0346	0,0936
μ	1	1,0141	1,0157	μ	0,5	0,5703	0,5095
m	1,2208	1,2423	1,1535	m	0,5990	0,6098	0,7341
κ	1	1,0386	0,9953	η	0,16	0,0389	0,1559
μ	1	1,0046	1,0176	μ	0,5	0,6269	0,5036
m	1,3333	1,3568	1,2482	m	0,6560	0,6757	0,7993
κ	1,48	1,5330	1,4716	η	0,25	0,0528	0,2491
μ	1	1,0031	1,0230	μ	0,5	0,6858	0,5025
m	1,5531	1,5829	1,4674	m	0,7353	0,7581	0,8726
κ	2	1,9896	2,0147	η	0,4	0,6837	0,4046
μ	1	1,0212	1,0125	μ	0,5	0,4516	0,4987
m	1,8000	1,8331	1,7176	m	0,8448	0,8724	0,9400
κ	3,98	4,0095	3,9845	η	0,63	0,8819	0,6487
μ	1	1,0278	1,0295	μ	0,5	0,4861	0,5014
m	2,7679	2,8600	2,7502	m	0,9509	0,9685	0,9908

parâmetro m mantivesse a relação dada pela Equação 5.2. Como verifica-se na Figura 5.14, para $\eta = 0,4$ e $\mu = 0,5$, os parâmetros foram corretamente estimados através do algoritmo MMSE.

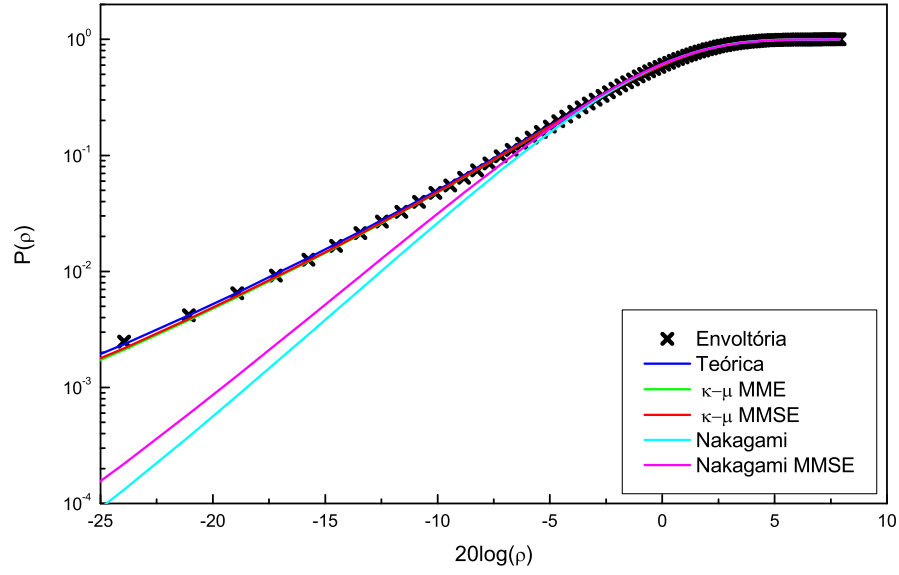


Figura 5.13: Comparativo entre as FDC's para $\kappa = 2$ e $\mu = 1$ para o sinal amostrado do simulador de canal.

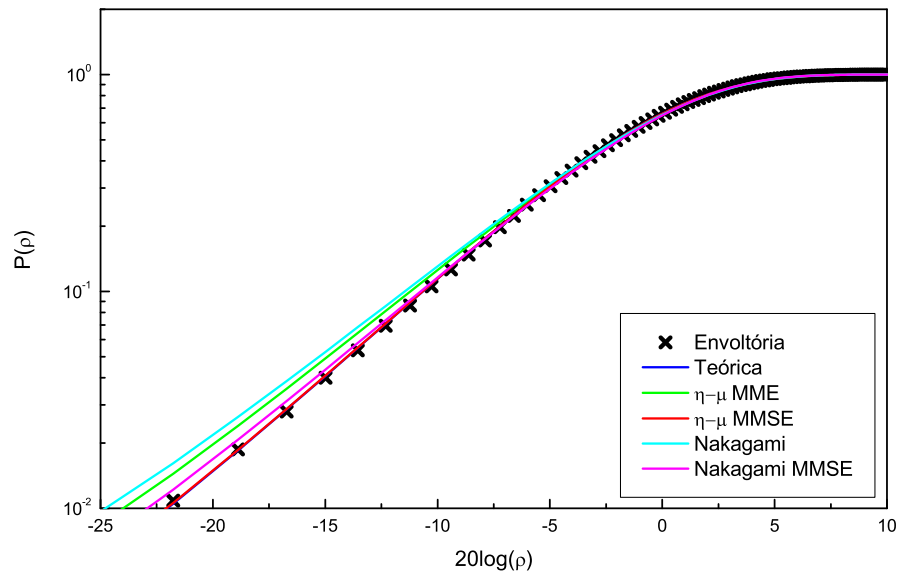


Figura 5.14: Comparativo entre as FDC's $\eta = 0,4$ e $\mu = 0,5$ para o sinal amostrado do simulador de canal.

5.4 Considerações

O Método dos Momentos Estatísticos e o algoritmo MMSE mostraram-se eficientes para estimar os parâmetros das distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Entretanto, para alguns conjuntos de dados, os parâmetros estimados pelo Método dos Momentos Estatísticos não se aproximaram aos valores teóricos utilizadas na simulação. Partindo-se dessas estimativas, conseguiu-se um melhor ajuste através do algoritmo MMSE, como pode-se observar nas Tabelas 5.6 e 5.7 para sinais gerados de acordo com as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, respectivamente. Isto também pode ser verificados em alguns dos resultados apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.3.

Tabela 5.6: Valores estimados com ajuste não satisfatório através do MME e satisfatório para o MMSE para a distribuição $\kappa - \mu$.

Envolt.	Estimador	MME	MMSE	
A.-R.	κ	0,25	0,3883	0,2698
	μ	1	0,9674	0,9981
S.	κ	1,25	0,8057	1,2384
	μ	2	2,3071	2,0233

Tabela 5.7: Valores estimados com ajuste não satisfatório através do MME e satisfatório para o MMSE para a distribuição $\eta - \mu$.

Envolt.	Estimador	MME	MMSE	
A.-R.	η	0,6	0,9196	0,6009
	μ	0,5	0,4779	0,4991
S.	η	0,4	0,4911	0,4112
	μ	1	0,9512	0,9935

Analisando-se as estatísticas dos sinais para alguns destes resultados em que as estimativas através do MME não foram satisfatórias, Figura 5.15 e Figura 5.17, nota-se que as curvas da FDP para estes parâmetros estimados apresentam uma certa concordância com a curva da FDP teórica. Entretanto ao se traçar e verificar a curva da FDC, observa-se que a curva para os parâmetros estimados pelo MME possuem boa concordância em torno da média, enquanto que a "cauda" não obteve um ajuste satisfatório. Já para os parâmetros ajustados pelo algoritmo MMSE, a FDC apresentou grande concordância, mesmo para os pontos na "cauda" da curva.

Estas estimativas instáveis do Método dos Momentos Estatísticos devem-se ao fato de existirem no cálculo do sistema de equações potências elevadas, $E[r^6]$, e pequenos erros nas amostras podem provocar uma grande variação no valor dos momentos da população.

Para o MMSE a análise da superfície do erro quadrático médio mostra que esta não possui um aspecto característico tradicional. Este tipo de superfície pode ser encontrada

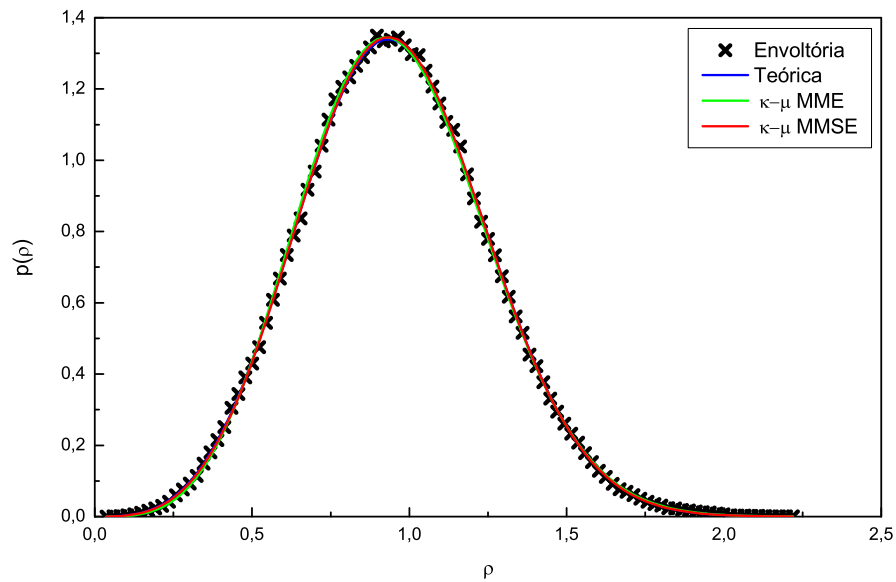


Figura 5.15: Comparativo entre as FDP's para $\kappa = 1,25$ e $\mu = 2$ pelo Método do Espectro de Smith.

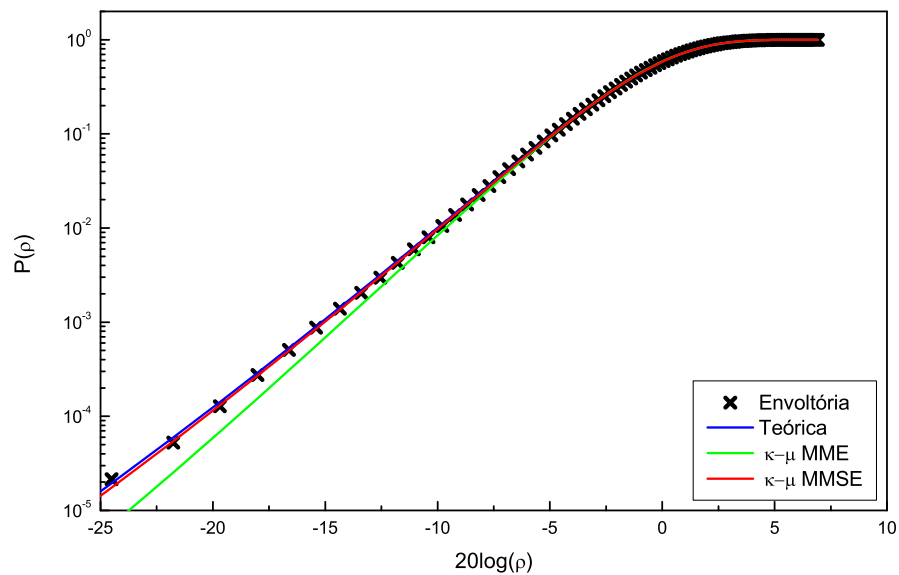


Figura 5.16: Comparativo entre as FDC's para $\kappa = 1,25$ e $\mu = 2$ pelo Método do Espectro de Smith.

quando o modelo for não linear. A concavidade do vértice da curva é muito pouco acen- tuada. Existe uma faixa de valores em torno do parâmetro que parecem fornecer o mesmo valor numérico do MSE ou muito próximos. Assim, existem FDP's muito similares que tendem a um mesmo MSE. O interessante é que a variação dos valores dos parâmetros

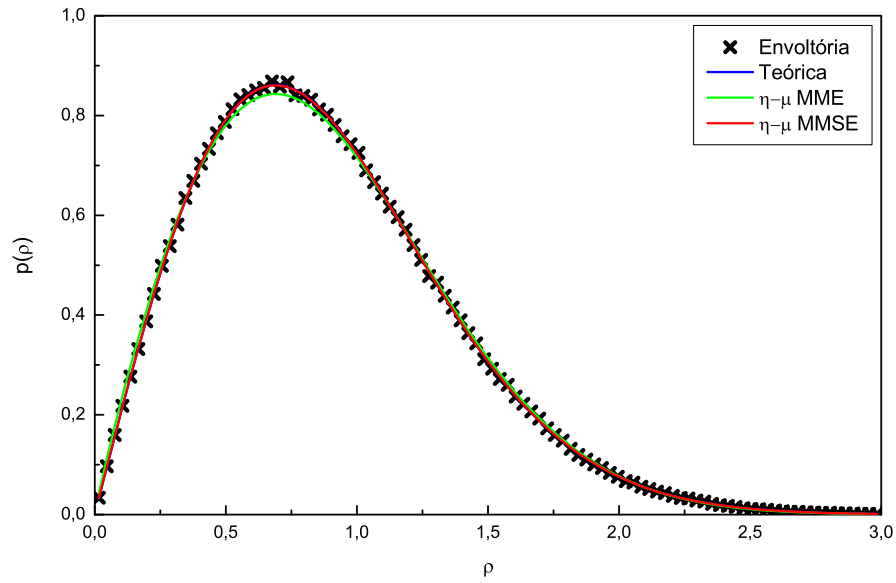


Figura 5.17: Comparativo entre as FDP's para $\eta = 0,6$ e $\mu = 0,5$ pelo método da Aceitação-Rejeição.

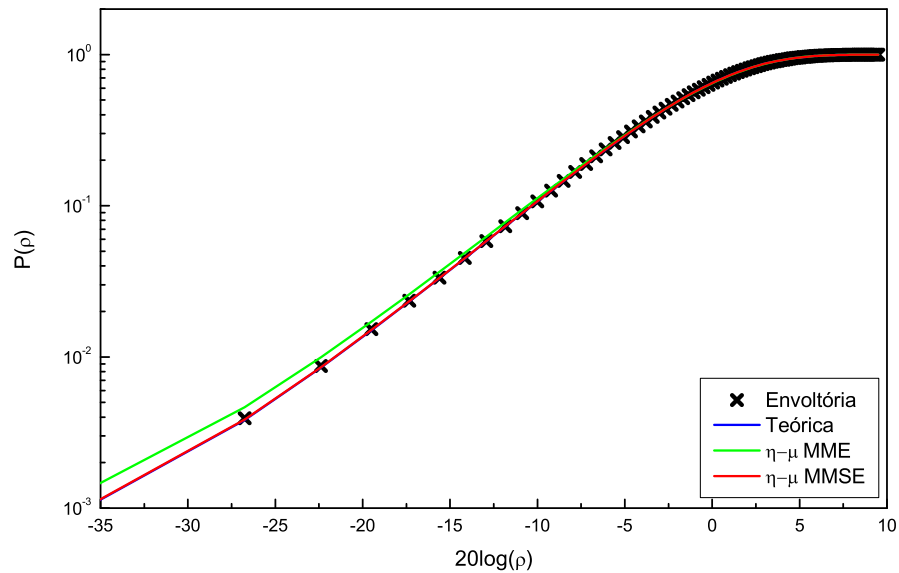


Figura 5.18: Comparativo entre as FDC's para $\eta = 0,6$ e $\mu = 0,5$ pelo método da Aceitação-Rejeição.

nessa região é aproximadamente determinada pela relação com o parâmetro m de Nakagami. Na distribuição $\kappa - \mu$, por exemplo, isto pode ser compreendido fisicamente que um aumento do número de *cluster* que chegam ao receptor, para manter a mesma potência do sinal recebido, é necessário uma menor potência do raio direto e vice-versa.

As Figuras 5.19 e 5.20 mostram a característica da superfície de erro, para uma envoltória gerada através do método do espectro de Smith, com $v = 90$ km/h, $f = 900$ MHz, $\kappa = 1,25$ e $\mu = 2$. Os resultados para os valores dos parâmetros estimados foram apresentados na Tabela 5.6.

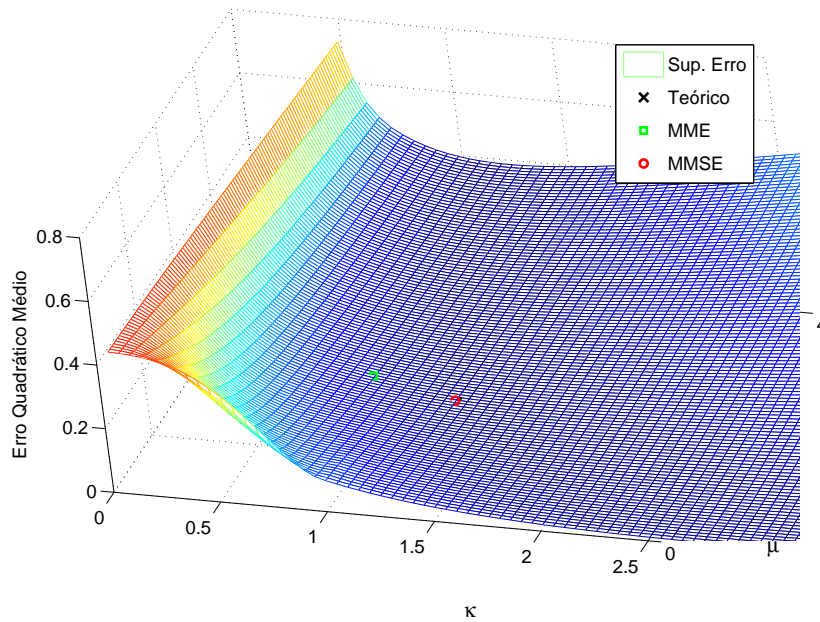


Figura 5.19: Superfície do erro quadrático médio - vista superior.

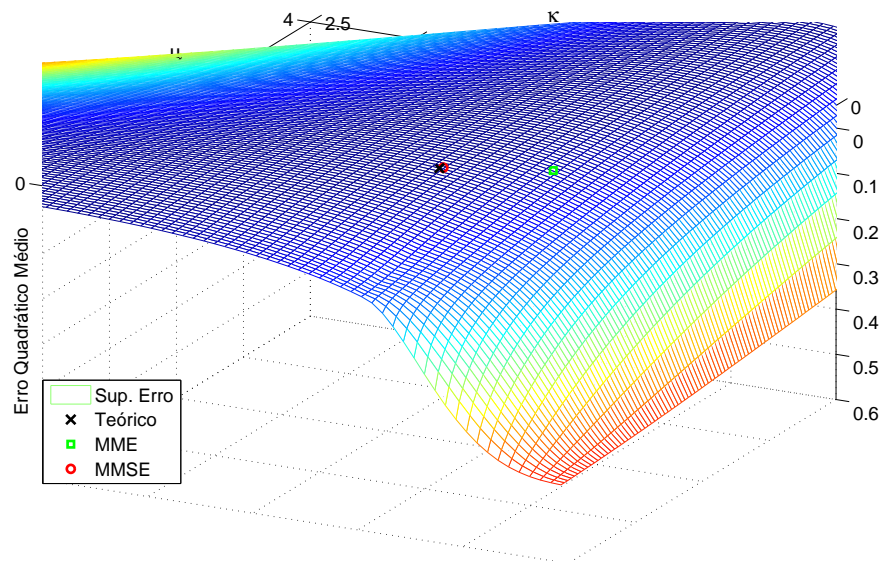


Figura 5.20: Superfície do erro quadrático médio - vista inferior.

5.5 Conclusão

Este capítulo apresentou os resultados das estimativas dos parâmetros κ , η e μ pelo Método dos Momentos Estatísticos e pelo algoritmo MMSE para diferentes envoltórias geradas de acordo com as distribuições estatísticas $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$.

Os estimadores para os parâmetros das distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, através do Método dos Momentos Estatísticos e do algoritmo MMSE, conseguiram estimar adequadamente os parâmetros e ajustar um conjunto de dados às distribuições. Como regra geral, podemos verificar nos gráficos que quando os dados encontram-se acima da curva Nakagami- m , um melhor ajuste é realizado pela distribuição $\kappa - \mu$, enquanto que se os dados estiverem abaixo da curva Nakagami- m , então esses dados são melhor caracterizados pela distribuição $\eta - \mu$.

Observa-se, através dos gráficos da FDC, que as curvas para os parâmetros estimados possuem um ajuste satisfatório aos dados simulados.

Sabe-se que a distribuição Nakagami- m , para alguns conjuntos de dados experimentais, possuem uma boa aproximação em torno da média, enquanto que a "cauda", não apresenta um ajuste satisfatório através dessa distribuição. Também verifica-se nesse capítulo que as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, podem ser usadas para melhor caracterizar um canal com desvanecimento devido aos múltiplos percursos, onde a distribuição Nakagami- m não apresenta uma aproximação ideal para a "cauda" da curva.

Capítulo 6

Conclusões Finais

O objetivo deste trabalho foi a análise de diferentes métodos para estimar os valores dos parâmetros das distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Os métodos utilizados foram o Método dos Momentos Estatísticos e o MMSE. Também foi utilizado o MMSE para calcular o parâmetro m da distribuição de Nakagami.

O trabalho iniciou-se com os fundamentos teóricos sobre as distribuições estatísticas $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, através da apresentação do modelo matemático e a obtenção das FDP's para estas distribuições.

Em seguida realizou-se um estudo apresentando diferentes técnicas para geração de números aleatórios e sinais com desvanecimento modelados de acordo com as distribuições estatísticas $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Este trabalho de análise de estimadores não poderia ser feito com sinais obtidos em campo, pois não seria possível determinar os valores reais dos parâmetros para comparar com os estimados. O histograma dos sinais gerados pelas técnicas implementadas apresentam grande concordância com as curvas da FDP teórica das distribuições.

As contribuições originais deste trabalho são o desenvolvimento dos estimadores baseado no Método dos Momentos Estatísticos e no algoritmo MMSE. O desenvolvimento matemático dos estimadores para estes métodos, as soluções para os sistemas de equações, as derivadas parciais - para as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$ - também são incluídas como contribuições inéditas deste trabalho.

Por fim, um resumo dos resultados foi apresentado na forma de tabelas e gráficos. Observou-se que o Método dos Momentos Estatísticos para um número de pontos elevados consegue estimar adequadamente os valores dos parâmetros. Os valores dos parâmetros obtidos pelo algoritmo MMSE também foram coerentes e próximos aos valores usados na configuração das simulações. Os valores dos parâmetros obtidos através do Método dos Momentos Estatísticos foram utilizados como valores iniciais para o ajuste através do MMSE. A comparação do MSE entre as FDP's simulada, estimada e teórica mostrou que ambos os métodos conseguem estimar adequadamente os valores dos parâmetros. Em alguns casos, onde o MME não mostrou-se satisfatório, o MMSE foi mais robusto e permitiu

um ajuste mais próximo do valor esperado.

A análise dos estimadores também mostrou a possibilidade de caracterizar o efeito do desvanecimento de um sinal devido aos múltiplos percursos de acordo com as distribuições $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$. Entretanto, uma aplicação prática da caracterização do canal através dos valores dos parâmetros, de forma a atuar como critério de escolha da modulação, codificação ou diversidade, talvez não seja trivial. Devido ao grande número de amostras e janelas temporais longas necessárias para uma estimativa confiável, em situações de alta velocidade do receptor, as características do canal podem variar durante a determinação dos parâmetros, condição em que se obteria um valor médio.

Ainda neste trabalho, foi desenvolvida uma interface gráfica em *Matlab*® capaz de gerar sinais de acordo com as distribuições estatísticas $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$, através dos diferentes técnicas apresentadas. A interface também permite controlar e visualizar o processo de estimativa dos valores dos parâmetros.

6.1 Propostas para Trabalhos Futuros

Pode-se citar entre sugestões para trabalhos futuros verificar o desempenho dos estimadores para sinais medidos em campo. Em seguida, como aplicar o conhecimento acerca dos valores dos parâmetros estimados na escolha da técnica de modulação, codificação, diversidade, compactação e etc. Desenvolver o estimador MME usando momentos com ordem diferentes das empregadas e também implementar um método de estimação mais robusto, como por exemplo, o método de Newton. Uma outra sugestão é a implementação de um passo de atualização (Δp) adaptativo, usando métodos de busca linear. Isto permitiria obter um valor do passo de atualização ótimo resultando em uma maior rapidez na convergência do algoritmo.

Anexo A

Simulador de Canal

O simulador de canal é um equipamento utilizado em laboratório para testes e análise do desempenho de sistemas de comunicações. Nesse trabalho foi utilizado o PROPSim C2 da Elektrobit, que é um simulador de canal rádio digital em tempo real. Os fenômenos reais de propagação, como o desvanecimento por múltiplos percursos, atraso, sombreamento e ruído podem ser reproduzidos por esse equipamento.

O Propsim C2 inclui algumas simulações típicas de canais aplicadas a diversos sistemas de comunicações móveis. Alguns exemplos são: GSM, GPRS, TETRA, CDMA2000, WLAN, WiMAX, WCDMA, DVB e HDTV, entre outras.

Também é possível criar canais de acordo com as características definidas pelo usuário.

Esse simulador de canal é independente do padrão ou da modulação utilizada. O equipamento ainda possui três interfaces de simulação: RF, banda básica e digital.

Anexo B

Equipamentos

Este anexo especifica a marca e o modelo dos equipamentos utilizados para a realização das medidas dos sinais amostrados do simulador de canal.

Gerador de Sinais: Agilent, modelo 33220A.

Simulador de Canal: Elektrobit, modelo PROPSim C2.

Analisador de Espectro: ADVANTEST, modelo R3267. Frequência de operação de 100 Hz a 8 GHz.

Amostrador/Equipamento de Aquisição de Dados: pico Technology Limited, modelo PicoScope3423. Conectado ao PC através de uma porta USB, 4 canais (conector tipo BNC). Esse equipamento vem acompanhado do *software* PicoScope Automotive, capaz de representar o sinal amostrado em sua interface, além de armazená-lo.

Computador: HP, modelo d325. Processador Athlon XP 2 GHz, 1 Gb de memória RAM, disco rígido de 40 Gb.

Anexo C

Publicações

FASOLO, S. A.; SILVA JÚNIOR, Jaime . *Practical Application of Wireless Channel Estimator using LMS Criterion to Yacoub's Distributions*. WSEAS Transactions On Signal Processing, Miami, Florida, USA, v. 1, p. 291-297, 2005.

FASOLO, S. A.; SILVA JÚNIOR, J. *Wireless HDTV Channel Estimator using LMS Criterion to Yacoub's Distributions*. In: WSEAS International Conference on Electronics, Control and Signal Processing, 2005, Miami, Florida, USA. 4th WSEAS International Conference on Electronics, Control and Signal Processing, 2005.

Referências Bibliográficas

- [1] RAPPAPORT, T. S., *Wireless Communications: Principles and Practice*, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, 1996.
- [2] PROAKIS, J. D., *Digital Communications*, Third Edition, McGraw Hill, 1995.
- [3] SKLAR, B., *Digital Communications - Fundamentals and Applications*, Second Edition, Prentice Hall, 2001.
- [4] SIMON, M. K. and ALOUINI, M. S., *Digital Communication over Fading Channels*, Second Edition, John Wiley and Sons, 2005.
- [5] NAKAGAMI, M., *The m -distribution – A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading in Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, W. C. Hoffman, Ed. Elmsford, 1960.
- [6] YACOUB, M. D., *The κ - μ Distribution*, XIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Brasil, 2001.
- [7] YACOUB, M. D., *The η - μ Distribution*, XIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Brasil, 2001.
- [8] FASOLO, S. A., *Sistemas de Comunicações Móveis*, Apostila de Mestrado, Inatel, 2005.
- [9] BRAUN, W. R. and DERSCH, U., *A Physical Mobile Radio Channel Model*, IEEE Trans. Veh. Technol. 40(2)1991.
- [10] YNOGUTI, C. A., *Probabilidade, Estatística e Processos Estocásticos*, Apostila de Mestrado, Inatel, 2002.
- [11] ABRAMOWITZ and M., STEGUN, A., *Handbook of Mathematical Functions*, US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series, 1972.
- [12] LEMOS, C. P., *Avaliação de Técnicas para Transmissão Digital em Canal com Desvanecimento Lento e Não Seletivo em Freqüência Modelado com a Distribuição $\eta - \mu$* , Tese de Mestrado, Inatel, 2003.

- [13] OSSANA, J. Jr., *A Model for Mobile Radio Fading due to Building Reflexions: Theoretical and Experimental Fading Waveform Power Spectra*, Bell Systems Technical Journal, Vol. 43, No. 6, pp. 2935-2971, 1964.
- [14] CLARKE, R. H., *A Statistical Theory of Mobile-Radio Reception*, Bell Systems Technical Journal, Vol. 47, No. 6, pp. 957-1000, 1968.
- [15] GANS, M. J., *A Power Spectral Theory of Propagation in the Mobile Radio Environment*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-21, pp. 27-38, 1972.
- [16] SMITH, J. I., *A Computer Generated Multipath Fading Simulation For Mobile Radio*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-24, No. 3, pp. 39-40, 1975.
- [17] FASOLO, S. A. and DUQUE, R. S., *Fading Channel Simulator for Hoyt Distribution*, 15th MPRG-Virginia Tech Symposium on Wireless Personal Communications, Blacksburg, 2005.
- [18] DUQUE, R. S., *Estatísticas de Ordem superior para a Distribuição $\kappa - \mu$* , Tese de Mestrado, Inatel, 2003.
- [19] LAW, A. M., *Simulation Modeling and Analysis*, Third Edition, McGraw Hill, 2000.
- [20] SOUZA, R. A., *Análise de Desempenho de Técnicas de Comunicação Digital em Canais com Distribuição $\kappa - \mu$, Desvanecimento Lento e Não Seletivo em Freqüência*, Tese de Mestrado, Inatel, 2002.
- [21] SPIEGEL, M. R., *Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas*, Tradução de Roberto Chioccarello. São Paulo: McGraw-Hill, 1973.
- [22] MURTEIRA, B. J. F., *Probabilidade e Estatística*, 2ª Edição, Vol. 2, McGraw-Hill, 1990.
- [23] NIST/SEMATECH *e-Handbook of Statistical Methods*, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3651.htm>, Junho 2006.
- [24] NETO, P. L. O. C., *Estatística*, 1ª Edição, São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- [25] BATTAGLIA, G. J., *Mean Square Error*, AMP Journal of Technology, Vol. 5, June, 1996.