



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

André Antônio dos Anjos

Estatísticas de Ordem Superior para o Modelo Complexo α - η - κ - μ

Campinas

2021



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

André Antônio dos Anjos

Estatísticas de Ordem Superior para o Modelo Complexo

α - η - κ - μ

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na Área de Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

Coorientador: Prof. Dr. Rausley Adriano Amaral de Souza

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pelo aluno André Antônio dos Anjos, e orientada pelo Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub e coorientada pelo Prof. Dr. Rausley Adriano Amaral de Souza

Campinas

2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

An58e Anjos, André Antônio dos, 1986-
Estatísticas de ordem superior para o modelo complexo "alpha-eta-kappa-mu" / André Antônio dos Anjos. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Michel Daoud Yacoub.

Coorientador: Rausley Adriano Amaral de Souza.

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

1. Rádio - Transmissores e transmissão - Desvanecimento. 2. Sistema de comunicação sem fio. 3. Sistemas de comunicação móvel 5G. 4. Ondas milimétricas. 5. Sistemas de comunicação móvel. I. Yacoub, Michel Daoud, 1955-. II. Souza, Rausley Adriano Amaral de, 1972-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Higher-order statistics for the "alpha-eta-kappa-mu" complex model

Palavras-chave em inglês:

Radio - Transmitters and transmission - Fading

Wireless communication systems

5G mobile communication systems

Millimeter waves

Mobile communication

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Michel Daoud Yacoub [Orientador]

Gustavo Rodrigues de Lima Tejerina

Edson Luiz Ursini

Felipe Augusto Pereira de Figueiredo

Waslon Terllizzie Araújo Lopes

Data de defesa: 22-02-2021

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-4479-313X>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6367465858959780>

COMISSÃO JULGADORA – TESE DE DOUTORADO

Candidato: André Antônio dos Anjos RA: 160081

Data da defesa: 22 de fevereiro de 2021

Título da Tese: “Estatísticas de Ordem Superior para o Modelo Complexo α - η - κ - μ ”

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub (Presidente, FEEC / UNICAMP)

Dr. Gustavo Rodrigues de Lima Tejerina (UNICAMP)

Prof. Dr. Edson Luiz Ursini (FT / UNICAMP)

Prof. Dr. Felipe Augusto Pereira de Figueiredo (INATEL)

Prof. Dr. Waslon Terlizzie Araújo Lopes (Universidade Federal da Paraíba)

A Ata de Defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

A Deus, que me deu forças para concluir este tão sonhado objetivo.

Agradecimentos

A Deus, por ter me concedido sabedoria e por me sustentar durante os momentos difíceis da caminhada para a conclusão deste sonho.

Aos meus pais, Maurício e Janice, por todo amor dedicado a mim e às minhas irmãs Cíntia e Bruna, a quem também agradeço pelo apoio e incentivo.

À minha amada esposa, Fernanda, pelo carinho, amor e compreensão.

Às minhas filhas, Ana Clara e Manuela, pelo amor incondicional, que me motivou ainda mais na busca deste objetivo.

Ao Professor Dr. Michel Daoud Yacoub, pela excelente orientação, por sua disponibilidade e pelo grande profissionalismo.

Ao Professor Dr. Rausley A. A. Souza, pela coorientação dada durante todo o trabalho e por ter se tornado um grande amigo, referência de pessoa profissional e íntegra.

Aos Professores Dr. Lorenzo Rubio, Dr. Vicent Miguel Rodrigo Peñarrocha e Dr. Juan Reig do Instituto de Pesquisa iTEAM da Universitat Politècnica de València, Espanha, que, gentilmente, interagiram conosco fornecendo medições confiáveis e de última geração para que as formulações teóricas aqui desenvolvidas pudessem ser testadas na prática. Não há palavras para expressar nossa gratidão.

Aos Professores do INATEL que contribuíram de alguma forma para a construção da minha base de conhecimentos, sem a qual não conseguiria alcançar este objetivo.

A todos os amigos do laboratório de desenvolvimento de hardware do INATEL e do departamento de engenharia da Hitachi. Em especial aos amigos Alexandre e Dênio, pelas palavras de incentivo.

Ao meu amigo e companheiro dessa jornada de doutorado, Thiago Reis, pela amizade, pelas trocas de informação e por ter compartilhado da árdua rotina de viagens e estudos necessária para a conclusão deste trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que este sonho pudesse ser realizado.

Acknowledgments

To God, for having given me wisdom and for supporting me during the difficult moments of the journey towards the conclusion of this dream.

To my parents, Maurício and Janice, for all the love dedicated to me and to my sisters Cíntia and Bruna, whom I also thank for their support and encouragement.

To my beloved wife, Fernanda, for the affection, love and understanding. To my daughters, Ana Clara and Manuela, for their unconditional love, which motivated me even more in the pursuit of this goal.

To Professor Michel Daoud Yacoub, for his excellent guidance, availability and great professionalism.

To Professor Rausley A. A. Souza, for the co-guidance given throughout the work and for having become a great friend, a reference of a professional and honest person.

To Professors Lorenzo Rubio, Vicent Miguel Rodrigo Peñarrocha, and Juan Reig from the iTEAM Research Institute at the Universitat Politècnica de València, Spain, who, most kindly, interacted with us providing with state-of-the-art and reliable measurements so that the theoretical formulations developed here could be tested in practice. No words can express our gratitude.

To INATEL Professors who contributed in some way to the construction of my knowledge base, without which I would not be able to achieve this goal.

To all friends at INATEL's hardware development lab and Hitachi's engineering department. Specially to friends Alexandre and Dênio, for the words of encouragement.

To my friend and companion on this doctoral journey, Tiago Reis, for the friendship, for the exchange of information and for sharing the arduous travel and study routine necessary for the completion of this work.

Finally, I would like to thank all the people who contributed in some way to making this dream come true.

“N3o existe um caminho para a felicidade. A felicidade 3 o caminho.”
(Mahatma Gandhi)

Resumo

Os objetivos principais desta tese de doutorado são os seguintes: (i) revisitar o recém criado modelo de desvanecimento complexo α - η - κ - μ e suas principais características; (ii) mostrar que o modelo em questão proporciona uma melhora na qualidade de ajuste da envoltória do sinal de propagação na faixa de ondas milimétricas (mm-wave) se comparado com outros modelos de desvanecimento já consolidados; (iii) aprofundar o conhecimento do novo modelo de desvanecimento por meio da dedução de suas estatísticas de ordem superior e (iv) validar as novas estatísticas mediante o ajuste de curvas empíricas obtidas a partir de dados de uma campanha de medição em mm-wave realizada apenas para este fim, comparando o resultado obtido com o alcançado por outros modelos de desvanecimento. Inicialmente, o processo de ajuste para a função densidade de probabilidade e a função distribuição cumulativa da envoltória é realizado baseando-se em campanhas de medições conduzidas independentemente por grupos de pesquisa nas bandas de 28 GHz e 60 GHz, disponibilizadas na literatura em artigos sobre o tema. As estatísticas de ordem superior abordadas na parte de formulações matemáticas são aquelas relacionadas com a derivada temporal do processo α - η - κ - μ , tendo em vista a obtenção de importantes métricas, tais como: taxa de cruzamento de nível, tempo médio de desvanecimento e taxa de cruzamento de fase. Um extenso número de formulações exatas para as correspondentes estatísticas é deduzida. Por meio de uma pequena amostra de gráficos, a flexibilidade provida pelo novo modelo, totalmente baseado em fenômenos físicos, torna-se evidente, reforçando seu potencial de utilização em uma enorme variedade de cenários. Uma campanha de medição completa em um ambiente interno na banda de mm-wave também foi realizada, com o objetivo principal de caracterizar o desvanecimento de curto prazo do canal nessa faixa em termos das suas estatísticas de primeira e segunda ordem. As medidas foram conduzidas em uma grande variedade de cenários, com frequências variando de 55 GHz a 65 GHz, em condições de LoS e nLoS, com combinação de polarização horizontal e vertical em ambas as antenas de transmissão e recepção. Vários modelos de desvanecimento são testados, denominados Rayleigh, Rice, Nakagami- m , α - μ , κ - μ , η - μ , e α - η - κ - μ . As principais estatísticas em análise na parte de validação experimental são a função densidade de probabilidade da envoltória do sinal e a taxa de cruzamento de nível, dada por unidade de distância. A partir dos dados experimentais, os parâmetros das estatísticas de cada modelo avaliado são estimados e as correspondentes curvas dos modelos teóricos são comparadas com a empírica para que o melhor modelo seja selecionado baseando-se em algumas métricas de qualidade de ajuste, denominadas NMSE, KS e AIC.

Palavras-chave: Modelo de desvanecimento; canal sem fio; 5G; 6G; ondas milimétricas.

Abstract

The aims of this thesis are the following: (i) to revisit the recently proposed α - η - κ - μ complex fading model and its main features; (ii) to show that this model provides the best fit for the envelope of a signal propagated in a millimeter wave (mm-wave) compared to other fading models already consolidated; (iii) to further the knowledge of this fading model through the derivation of some of its higher-order statistics; and (iv) to validate the new derived statistics by adjusting empirical curves obtained from data collected in mm-wave for this purpose only. Initially, the fitting process for envelope probability density function and cumulative distribution function is carried out having as basis some field measurement campaigns conducted by independent research groups at the 28 GHz as well as at the 60 GHz band available in the literature. The higher-order statistics concern the time derivative of the whole α - η - κ - μ process with a view at obtaining important metrics, such as level crossing rate, average fade duration, and phase crossing rate. An extensive number of exact formulations for the corresponding statistics is derived. Through a small sample of plots, the flexibility provided by the physically-based model becomes evident, showing its potential to be used in a variety of propagation scenarios. A thorough measurement campaign in an indoor environment at the mm-wave band is also carried out with an aim at characterizing the short-term fading channel in terms of its first and second-order statistics. The measurements are conducted in a variety of scenarios, with frequencies ranging from 55 GHz to 65 GHz, in LoS and nLoS conditions, and combinations of horizontal and vertical polarizations at both transmitter and receiver. Several fading models are tested, namely Rayleigh, Rice, Nakagami- m , α - μ , κ - μ , η - μ , and α - η - κ - μ . The main statistics under analysis are the envelope probability density function and the level crossing rate given per distance unit. From the experimental data, the parameters of these statistics are estimated and the corresponding curves of the theoretical models are compared with the empirical ones and the best model is selected based on some goodness of fit metrics, namely NMSE, KS, and AIC.

Keywords: Fading model; wireless channel; 5G; 6G; mmWave.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Canal rádio móvel.	22
Figura 1.2 – Sinal de recepção em função da distância entre transmissor e receptor.	23
Figura 2.1 – PDFs da envoltória variando α para (a) ($\eta = 100, \kappa = 1, \mu = 1/\alpha, p = 5, q = 1/10$ e $\hat{r} = 1$) e (b) ($\eta = 20, \kappa = 10, \mu = 1/\alpha, p = 1/5, q = 1$ e $\hat{r} = 1$).	38
Figura 2.2 – PDFs da envoltória variando os valores de (a) μ ($\alpha = 1, \eta = 20, \kappa = 10, p = 1/5$ e $q = 1/10$), (b) q ($\alpha = 1, \eta = 20, \kappa = 10, \mu$ e $p = 1/5$), (c) p ($\alpha = 1, \eta = 20, \kappa = 10, \mu = 1.75$ e $q = 1/5$) (d) η ($\alpha = 1, \kappa = 10, \mu = 2.25, q = 1/5$ e $p = 1/6$) e (e) κ ($\alpha = 2.5, \eta = 20, \mu = 2.25, q = 1/5$ e $p = 1/6$) com $\hat{r} = 1$ para todos os casos.	39
Figura 2.3 – PDFs da fase variando os valores de (a) q ($\eta = 3, \kappa = 0.1, \mu = 2.25$ e $p = 3$), (b) κ ($\eta = 1/6, \mu = 2.25, q = 1$ e $p = 3$), (c) p ($\kappa = 0, \mu = 2.25$ e $q = 1$) em coordenadas polares e (d) κ ($\eta = 3, \mu = 2.25, q = 1$ e $p = 3$) com α e \hat{r} irrelevantes para todos os casos.	41
Figura 3.1 – PDFs extraídas da referência [55, Fig. 3] com o software digitalizador Origin Pro.	45
Figura 3.2 – (a) Ajuste de curva da distribuição α - η - κ - μ e (b) comparação de todas as distribuições avaliadas.	46
Figura 3.3 – Ajuste de curva da distribuição α - η - κ - μ explorando efeitos não-unimodais.	47
Figura 3.4 – Ajuste de curvas da distribuição α - η - κ - μ explorando o menor valor de KS modificado em (a) Cenário LoS e (b) Cenário nLoS.	49
Figura 4.1 – LCR_t variando valores de (a) α ($\eta = 100, \kappa = 1, \mu = 1/2, q = 1/10$ e $p = 5$), (b) μ ($\alpha = 1, \eta = 20, \kappa = 10, q = 1$ e $p = 1/5$), (c) q ($\alpha = 1, \eta = 20, \kappa = 10, \mu = 1.75$ e $p = 1/5$) e (d) p ($\alpha = 1, \eta = 20, \kappa = 10, \mu = 1.75$ e $q = 1/5$) com $\hat{r} = 1, f = 1$ e $d = 1$	60
Figura 4.2 – AFD_t variando os valores de (a) α ($\eta = 100, \kappa = 1, \mu = 1/2, q = 1/10$ e $p = 5$), (b) μ ($\alpha = 1, \eta = 20, \kappa = 10, q = 1$ e $p = 1/5$), (c) q ($\alpha = 1, \eta = 20, \kappa = 10, \mu = 1.75$ e $p = 1/5$) e (d) p ($\alpha = 1, \eta = 20, \kappa = 10, \mu = 1.75$ e $q = 1/5$) com $\hat{r} = 1, f = 1$ e $d = 1$	61
Figura 4.3 – PCR_t variando os valores de (a) p ($\kappa = 0, \mu = 2.25, q = 1$ e $\eta = 1/6$ ou $\eta = 6$) em coordenadas polares e (b) κ ($\eta = 3, \mu = 2.25, q = 1$ e $p = 3$) com α e \hat{r} irrelevantes, $f = 1$ e $d = 1$ para ambos os casos.	61
Figura 5.1 – Visão do ambiente de propagação com as antenas de transmissão e recepção.	63

Figura 5.2 – Diagrama do estimador de canal utilizado para as medições.	64
Figura 5.3 – Ajuste de PDF para o Cenário 7 frequência 65 GHz.	73
Figura 5.4 – Ajuste de PDF para o Cenário 8 frequência 55 GHz.	74
Figura 5.5 – Ajuste de PDF de ρ em escala linear para o Cenário 8 frequência 55 GHz.	75
Figura 5.6 – Ajustes de LCR_s na frequência de 60 GHz para os Cenários 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e), 6 (f), 7 (g) e 8 (h).	80

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Resultados de NMSE e estatística KS.	46
Tabela 3.2 – Parâmetros de ajuste α - η - κ - μ para obtenção dos efeitos não-unimodais.	47
Tabela 3.3 – Resultado do KS modificado em Cenários LoS e nLoS.	48
Tabela 3.4 – Parâmetros α - η - κ - μ para obtenção do menor valor de KS modificado em Cenários de LoS e nLoS.	48
Tabela 5.1 – Características dos cenários de propagação	65
Tabela 5.2 – Parâmetros do sistema de medição	65
Tabela 5.3 – Resultados de ajustes de PDF para o Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4.	71
Tabela 5.4 – Resultados de ajustes de PDF para o Cenário 5, Cenário 6, Cenário 7 e Cenário 8.	72
Tabela 5.5 – Resultado de ajustes de LCR_s para o Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4.	76
Tabela 5.6 – Resultado de ajustes de LCR_s para o Cenário 5, Cenário 6, Cenário 7 e Cenário 8.	77

Lista de Acrônimos e Abreviações

AFD_t	Average Fade Duration in time-domain
LCR_f	Level Crossing Rate in frequency-domain
LCR_s	Level Crossing Rate in space-domain
LCR_t	Level Crossing Rate in time-domain
PCR_t	Phase Crossing Rate in time-domain
3GPP	3rd Generation Partnership Project
AIC	Akaike Information Criterion
BAN	Body Area Network
CCTF	Complex Channel Transfer Function
CDF	Cumulative Distribution Function
D2D	Device-to-Device
DPSD	Doppler Power Spectral Density
GoF	Goodness-of-Fit
IoT	Internet of Things
KS	Kolmogorov-Smirnov
LNA	Low Noise Amplifier
LoS	Line-of-Sight
M2M	Machine-to-Machine
mm-wave	millimeter-wave
MRC	Maximal Ratio Combining
nLoS	non-Line-of-Sight
NMSE	Normalized Mean Square Error
PDF	Probability Density Function
PSC	Pure Selection Combining
URA	Uniform Rectangular Array
V2V	Vehicle-to-Vehicle
VNA	Vector Network Analyzer

Lista de Símbolos

R	Envoltória do sinal complexo
S	Sinal complexo
U	Componente em fase ao quadrado do sinal
V	Componente em quadratura ao quadrado do sinal
X	Componente em fase do sinal
Y	Componente em quadratura do sinal
Z_i	Processo Gaussiano
Z	Variável aleatória generalizada que pode denotar tanto X quanto X
α	Fator de não linearidade do meio
d	Parâmetro de desbalanceamento Doppler
η	Razão entre a potência total das ondas espalhadas da componente em fase e da componente em quadratura
f_x	Frequência Doppler da componente em fase
f_y	Frequência Doppler da componente em quadratura
f	Frequência Doppler média
κ	Razão entre a potência total das componentes dominantes pela potência total das ondas espalhadas
$\lambda_{x_i}^2$	Potência da componente dominante de cada cluster de multipercurso da componente X
λ_x^2	Potência total das componentes dominantes de todos os clusters de multipercurso de X
$\lambda_{y_i}^2$	Potência da componente dominante de cada cluster de multipercurso da componente Y
λ_y^2	Potência total das componentes dominantes de todos os clusters de multipercurso de Y
$\lambda_{z_i}^2$	Potência da componente dominante de cada cluster de multipercurso de Z
λ_z^2	Potência total das componentes dominantes de todos os clusters de multipercurso de Z
μ_x	Número de clusters de multipercurso da componente X
μ_y	Número de clusters de multipercurso da componente Y
μ_z	Número de clusters de multipercurso da componente Z
μ	Número de cluster de multipercurso

p	Razão entre o número de clusters da componente em fase e o número de cluster da componente em quadratura
q	Razão entre a potência das componentes dominantes pela razão da potência das ondas espalhadas
\hat{r}	Valor eficaz da envoltória
θ	Fase do sinal complexo
σ_x^2	Variância do processo X_i
σ_y^2	Variância do processo Y_i
σ_z^2	Variância do processo Z_i
$F_R(r)$	CDF da envoltória
$f_{R,\Theta}(r, \theta)$	PDF conjunta da envotória e fase
$f_R(r)$	PDF da envoltória R
$f_\Theta(\theta)$	PDF da fase Θ
$f_{U,V}(u, v)$	PDF conjunta de U e V
$f_X(x)$	PDF da componente em fase
$f_Y(y)$	PDF da componente em quadratura
$f_Z(z)$	PDF da variável aleatória generalizada Z
$\ddot{\psi}(0)$	Derivada temporal da função de correlação no instante/espaço zero
$\psi(\tau)$	Função de correlação temporal/espacial
$L_k^\lambda(x)$	Polinômio generalizado de Laguerre
$\mathbb{E}[\cdot]$	Operador esperança
$I_\nu(\cdot)$	Função de Bessel modificada de ordem ν
$\cosh(\cdot)$	Cosseno Hiperbólico
$\Gamma(\cdot)$	Função Gamma
$\hat{P}(\cdot)$	Curva estimada no algoritmo lsqcurvefi
$P_{\text{exp}}(x_i)$	Curva experimental no algoritmo lsqcurvefi
$\text{sech}(\cdot)$	Secante Hiperbólica

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Contextualização	19
1.2	O canal de comunicação rádio móvel	21
1.3	Revisão bibliográfica	25
1.4	Objetivos e contribuições do trabalho	28
1.5	Estrutura da tese	30
2	O Modelo de Desvanecimento α-η-κ-μ	32
2.1	O modelo de desvanecimento α - η - κ - μ complexo	32
2.2	O modelo de desvanecimento α - η - κ - μ baseado na envoltória	35
2.3	Gráficos de PDFs gerados com o modelo de desvanecimento α - η - κ - μ	37
3	Aplicações Iniciais do Modelo de Desvanecimento α-η-κ-μ em Ondas Milmétricas	42
3.1	Testes de qualidade de ajuste (GoF)	42
3.2	Aplicação do modelo α - η - κ - μ em 60 GHz	44
3.3	Aplicação do modelo α - η - κ - μ em 28 GHz	47
3.4	Comentários	49
4	Estatísticas de Ordem Superior do Modelo Complexo α-η-κ-μ	50
4.1	A PDF de \dot{Z}	50
4.2	A PDF conjunta de X, \dot{X}, Y, \dot{Y}	51
4.3	A PDF conjunta de $R, \dot{R}, \Theta, \dot{\Theta}$	51
4.4	A PDF conjunta de R, \dot{R}, Θ	52
4.5	A PDF conjunta de $R, \Theta, \dot{\Theta}$	53
4.6	A PDF conjunta de R, Θ	54
4.7	Outras PDFs conjuntas e marginais	55
4.8	Taxa de cruzamento de nível no domínio temporal (LCR_t)	55
4.9	Tempo médio de desvanecimento (AFD_t)	56
4.10	Taxa de cruzamento de fase no domínio temporal (PCR_t)	57
4.11	Gráficos de estatísticas de ordem superior do modelo de desvanecimento α - η - κ - μ	59
5	Campanha de Medições e Validações Experimentais	62
5.1	Ambiente de propagação	62
5.2	Procedimento de medição e configurações do estimador de canal	62
5.3	Modelos teóricos de desvanecimento considerados nas validações experimentais	65

5.3.1	Estatística de primeira ordem - função densidade de probabilidade .	65
5.3.2	Estatística de segunda ordem - taxa de cruzamento de nível no domínio espacial	67
5.4	Resultados	69
5.4.1	Resultados para as estatísticas de primeira ordem	69
5.4.2	Resultados para as estatísticas de segunda ordem	75
5.4.3	Comentários sobre os resultados	81
6	Conclusão e Trabalhos futuros	83
6.1	Conclusão	83
6.2	Perspectivas para trabalhos futuros	86
6.3	Artigos publicados em periódicos	87
	Referências	88

1 Introdução

1.1 Contextualização

A crescente demanda por: (i) altas taxas de dados; (ii) infinidade de novos serviços; (iii) cobertura onipresente; (iv) e o crescente aumento do número de dispositivos conectados têm sido as principais forças motrizes para o desenvolvimento de uma nova geração de tecnologia sem fio. Estudos recentes estimam que, por volta de 2027, haverá mais 40 de bilhões de dispositivos conectados à Internet [1, 2]. Os sistemas de comunicações atuais, tais como 3G ou mesmo 4G, não serão capazes de atender a esses novos requisitos de tráfego e conectividade. O que é óbvio, uma vez que não foram concebidos com tais propósitos. Daí a necessidade de novos conceitos que levam ao desenvolvimento de novas plataformas de comunicação. Para atender toda essa demanda, estima-se que a nova geração de sistemas de telecomunicações, atualmente conhecida como 5G, deverá oferecer taxas de dados de 100 a 1000 vezes maiores que as dos sistemas atuais. Como consequência, o aumento da largura de banda é urgente. Entretanto, vale ressaltar que as demandas dos novos cenários, previstos para a próxima geração de comunicação sem fio, não poderão ser realizadas apenas com o aumento da taxa de transmissão do sistema. Indústrias, centros de P&D, universidades e pesquisadores em todo o mundo têm procurado soluções para atender aos mais diversos cenários de comunicação previstos para os próximos anos. A indústria automotiva, por exemplo, está comprometida com o desenvolvimento de tecnologias para a comunicação eficiente entre automóveis, também conhecida como comunicação entre veículos (V2V - do inglês, *Vehicle-to-Vehicle*) [3]. A partir da adoção desse tipo de tecnologia, será possível evitar a colisão entre dois veículos por falhas humanas, ou mesmo traçar uma rota de percurso mais rápida, baseada no compartilhamento de informações sobre tráfego. Outra possibilidade seria a utilização de veículos autônomos, dentre diversas outras. Nas áreas rurais, o uso de novas tecnologias, tais como a comunicação entre dispositivos (D2D - do inglês, *Device-to-Device*), já tem sido adotado, em que equipamentos podem compartilhar informações com um banco de dados para auxiliar na melhoria dos processos do plantio, semeadura e colheita [4]. Tecnologias como a de comunicação entre máquinas (M2M - do inglês, *Machine-to-Machine*) [5] e internet das coisas (IoT - do inglês, *Internet of Things*) [4] permitirão, por exemplo, que uma máquina de vendas automática envie uma mensagem ao seu técnico de manutenção quando ela estiver danificada ou sem estoque de produtos. Medidores de energia poderão enviar valores de consumo para plataformas baseadas em nuvem, permitindo o acesso remoto dos dados a partir de um computador pessoal, laptop ou *smartphone*. Os

proprietários de casas serão capazes de controlar remotamente várias tarefas domésticas via *smartphone*, dentre outras infinitas possibilidades. Todas as aplicações mencionadas e diversas outras devem ser contempladas pelas futuras redes de comunicação sem fio.

Os cenários previstos são diversos, e com esse aumento exponencial de conexões entre dispositivos [1, 2], uma série de desafios devem ser superados, tais como: aumento da vazão do sistema, expansão da área de cobertura, redução da latência e melhor conhecimento do canal de comunicação. Uma discussão importante está relacionada com a faixa de frequências a ser utilizada pelas futuras redes móveis. A porção espectral abaixo de 6 GHz encontra-se praticamente toda ocupada, e acredita-se que as pequenas lacunas restantes não sejam suficientes para acomodar a banda requerida pelos sistemas de próxima geração. A banda de ondas milimétricas (mm-wave - do inglês, *millimeter-wave*) (30 GHz a 300 GHz) tem se mostrado a mais promissora para esse propósito e tem estado sob intensa investigação [6–8]. Organizações de padronização, tais como o 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), já sinalizaram que as faixas de frequência acima de 10 GHz devem ser utilizadas para lidar com demandas que exigem altas taxas de transmissão [9], sendo desta forma a faixa mais cotada para abrigar os futuros sistemas 5G e 6G.

A grande vantagem de utilização da banda de ondas milimétricas está na alta disponibilidade espectral, entretanto as condições de propagação nessa banda ainda devem ser melhor compreendidas. É óbvio que os mecanismos de propagação em mm-wave são os mesmos encontrados em quaisquer outras bandas espectrais, mas alguns fenômenos são mais ou menos evidenciados nessa faixa. Esses fenômenos incluem propagação por caminhos diretos e indiretos, o primeiro em uma linha de visada (LoS - do inglês, *Line-of-Sight*) e o segundo em uma situação sem visada (nLoS - do inglês, *non-Line-of-Sight*). Os caminhos indiretos incluem reflexões e difrações por meio das várias superfícies. Em particular, a atenuação do sinal nessa faixa de frequência é significativa e a penetração em objetos sólidos é problemática [10]. Da mesma forma, as condições atmosféricas, que praticamente não geravam qualquer efeito em frequências mais baixas, são críticas em algumas porções do espectro. Por exemplo, há picos de absorção devido às moléculas de oxigênio, vapor de água e outros componentes gasosos, que ocorrem em 24 GHz, próximos a 60 GHz, 120 GHz e 200 GHz. Além disso, a chuva pode ser uma fonte de interrupção do sinal, porque as gotas de chuva, sendo da ordem de grandeza do comprimento de onda do sinal transmitido, funcionam como dispersores. Em frequências muito elevadas, a propagação por meio de ondas difratadas é insignificante e, por isso, o sombreamento se torna um fenômeno bastante comum. Por outro lado, reflexões, na forma especular e difusa [11], são frequentes. Nesse caso, as irregularidades das superfícies são da ordem da magnitude do comprimento de onda, assim, essas superfícies são percebidas como mais

ásperas, resultando em uma maior difusão. Caso contrário, componentes especulares são geradas. O processo de espalhamento é o responsável por gerar ondas parciais, que podem apresentar alguma correlação de fase devido às superfícies espacialmente correlacionadas. Nesse tipo de cenário, os diferentes ambientes de propagação são mais fortemente percebidos, tornando o *cluster* de multipercurso um fenômeno mais comum. Além disso, a não-linearidade do meio também é mais perceptível nessa faixa de frequências e pode ter um forte impacto na propagação do sinal.

A multiplicidade de cenários previstos para as aplicações das redes sem fio de próxima geração, na banda mm-wave, certamente levará a uma imensa variedade de condições de propagação. Neste contexto, o conhecimento apurado do canal de comunicação rádio móvel torna-se imprescindível para a evolução e desenvolvimento dos futuros sistemas de comunicação, tais como o 5G ou mesmo o 6G. Todavia, a sua modelagem completa não é uma tarefa trivial, muito menos óbvia, envolvendo muitos fenômenos físicos e diversos fatores externos, cujos conceitos básicos serão abordados na Seção 1.2.

1.2 O canal de comunicação rádio móvel

Em um canal de comunicação sem fio, o sinal de recepção no terminal móvel é composto pela soma de várias réplicas do sinal transmitido, que percorreram diferentes percursos e, conseqüentemente, chegam ao receptor em diferentes instantes de tempo. A Figura 1.1 ilustra um típico cenário de um canal rádio móvel, em que o sinal transmitido por uma estação rádio base chega ao terminal móvel através de um caminho principal, denominado visada direta, no qual não há qualquer obstáculo entre o transmissor e o receptor e, também, por vários caminhos secundários, oriundos dos seguintes fenômenos de propagação [12]: reflexão, difração e espalhamento. A reflexão ocorre quando o sinal transmitido, no caso a onda eletromagnética, incide sobre uma superfície de dimensões muito maiores que o seu comprimento de onda, como por exemplo prédios, montanhas ou até mesmo a superfície da Terra. A difração ocorre quando o sinal passa através de um orifício ou contorno de um objeto da mesma ordem de grandeza do seu comprimento de onda, tais como carros ou casas. E o último fenômeno, o espalhamento, ocorre quando uma onda é obstruída por um corpo de dimensões muito menores que o seu respectivo comprimento de onda, como folhas de árvores, placas de sinalização ou até mesmo pessoas e animais caminhando pela rua. Logicamente, vale lembrar que o comprimento de onda irá depender da frequência do sinal de transmissão, em que quanto maior a frequência deste sinal, menor será esse comprimento.¹

¹ Os exemplos de objetos causadores dos fenômenos de propagação reflexão, difração e espalhamento, citados anteriormente, levam em consideração um sinal de transmissão com uma frequência central de 1 GHz.

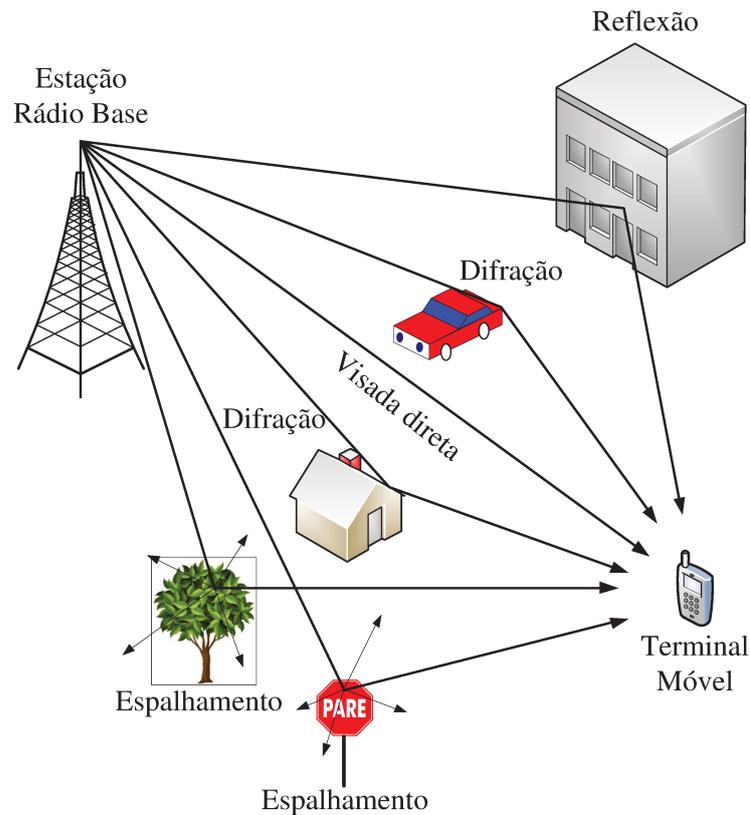


Figura 1.1 – Canal rádio móvel.

Todas as réplicas do sinal de transmissão, captadas pelo receptor, são combinadas vetorialmente. Essa combinação poderá ocorrer de forma construtiva ou destrutiva, dependendo da distribuição de fase das componentes do sinal recebido. Caso o receptor altere a sua posição, ainda que em um curto espaço, poderá haver uma variação intensa na potência do sinal de recepção, que pode chegar a dezenas de decibéis. Isto ocorre uma vez que pequenas alterações espaciais na posição do receptor provocam uma alteração significativa na fase dos diversos percursos que compõem o sinal recebido e, consequentemente, levando a uma variação no sinal de recepção captado pelo terminal móvel. A essas variações dá-se o nome de desvanecimento [13]. De forma geral, as variações no nível da potência de sinal podem ser classificadas em três tipos: (i) perda de percurso, (ii) desvanecimento de longo prazo e (iii) desvanecimento de curto prazo. A Figura 1.2 (a) ilustra o sinal de recepção em função da distância entre transmissor e receptor, sendo destacados os 3 fenômenos descritos anteriormente. Já a Figura 1.2 (b) apresenta uma parte da porção central do sinal recebido ampliada em um espaçamento de 15 metros, onde fica bem explícito as grandes variações que podem ocorrer no sinal de recepção com pequenos deslocamentos entre transmissor e receptor.

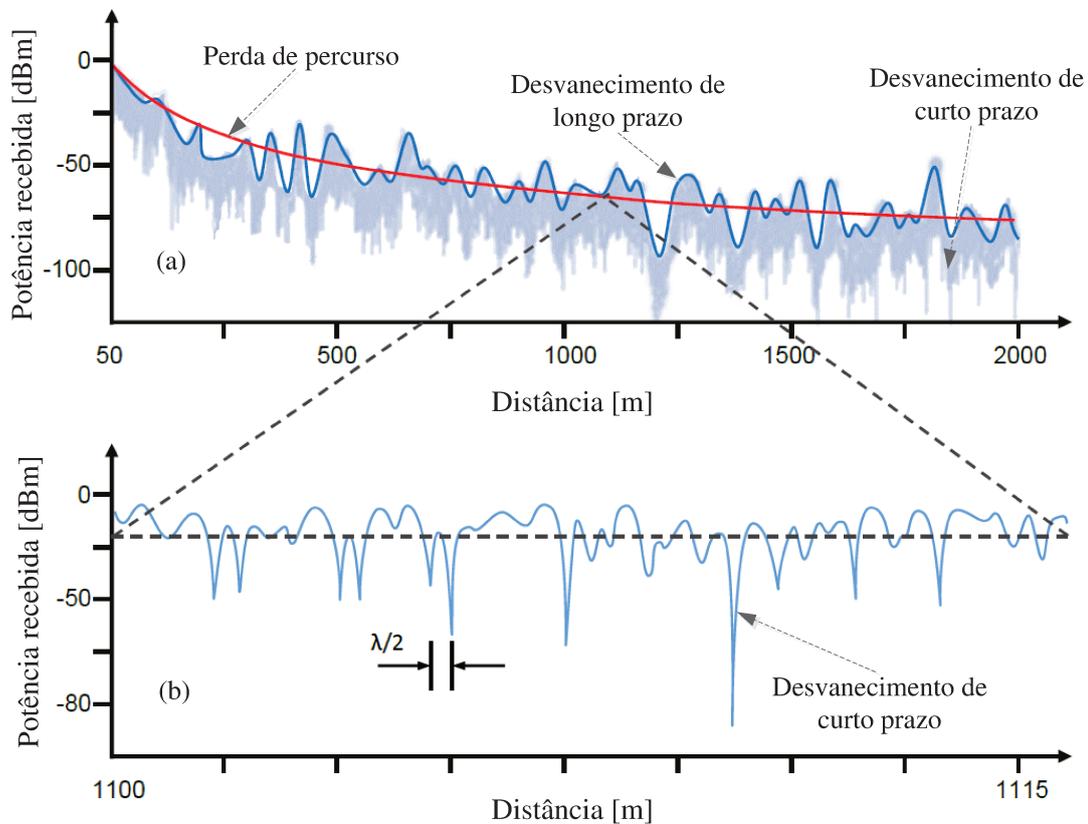


Figura 1.2 – Sinal de recepção em função da distância entre transmissor e receptor.

A perda de percurso está relacionada com a tendência de queda do nível de sinal segundo algum expoente de atenuação com a distância, valor que pode variar com os diferentes ambientes de propagação. Nota-se, na Figura 1.2 (a), que a perda de percurso pode ser caracterizada como sendo a média da intensidade de sinal computada considerando-se longas distâncias.

O desvanecimento de longo prazo tem seus efeitos manifestados na média do sinal recebido ao longo de distâncias intermediárias, da ordem de algumas dezenas do comprimento de onda do sinal, conforme pode ser verificado na Figura 1.2 (a). Mesmo sem movimentação do receptor esse tipo de desvanecimento pode ocorrer, devido às alterações significativas no ambiente como, por exemplo, variações no índice de refração da atmosfera. O desvanecimento em questão também é conhecido por sombreamento, pois ele está relacionado com obstruções como relevo, vegetação, prédios e casas, que fazem com que o terminal móvel possa vir a ficar em uma região de sombra e, desta forma, com o nível de recepção muito baixo, muitas vezes até menor que o próprio limiar de sensibilidade do receptor. Nesse tipo de cenário, o sinal chega ao receptor basicamente por meio de difração e espalhamento. É bem estabelecido na literatura que o comporta-

mento estatístico do desvanecimento de longo prazo pode ser caracterizado por meio da utilização de uma função densidade de probabilidade do tipo Log-Normal [14, 15].

O desvanecimento de curto prazo considera as variações instantâneas do sinal recebido, causadas pelo comportamento aleatório das componentes de sinal que chegam ao receptor. Ele é verificado em curtas distâncias, da ordem de fração do comprimento de onda, ou em pequenos intervalos de tempo. Seus efeitos são resultado da composição do sinal recebido, realizada por meio da soma dos diversos percursos do canal rádio móvel considerado, que chegam ao receptor com diferentes amplitudes, ângulos e defasagens. O principal fator físico que influencia no desvanecimento de curto prazo é a propagação por multipercursos devido à presença de objetos espalhadores e refletores, que criam variações constantes no canal de comunicação. Estes efeitos resultam em múltiplas versões do sinal transmitido que chegam à antena receptora deslocados em relação ao tempo e espaço. A aleatoriedade de fases e amplitudes dos diferentes componentes de multipercurso causam flutuações significativas na potência do sinal.

Além das fortes variações instantâneas de magnitude e de fase no sinal recebido, a dispersão temporal do canal é outro fator de grande degradação da comunicação em ambientes de propagação por multipercurso, pois pode fazer com que símbolos adjacentes se sobreponham, configurando a interferência intersimbólica [13, 15], que é um dos grandes limitadores da taxa de transmissão nesse tipo de ambiente. Outro elemento degradante que merece destaque é o desvio Doppler, relacionado com a velocidade do terminal móvel ou de quaisquer objetos ao seu redor, que provoca uma modulação aleatória em frequência de cada componente de multipercurso [12].

A correta caracterização do sinal de recepção por meio de uma modelagem do canal rádio móvel é essencial para o entendimento das características do ambiente onde se deseja realizar uma transmissão e de seus efeitos sobre o sinal. O modelo de canal é uma parte integrante da etapa de simulação da camada física de um sistema de comunicação que se pretende construir. É uma representação matemática dos efeitos físicos do ambiente através do qual os sinais serão transmitidos. Ao selecionar um modelo de canal adequado para um determinado projeto, pode-se otimizar o desempenho do enlace, realizar modificações na arquitetura do sistema até que se atinja o resultado desejado e, além disso, pode-se fornecer uma avaliação realista do desempenho prático do sistema em desenvolvimento. Isso dá uma grande segurança ao engenheiro projetista, que tem um alto grau de previsibilidade do que irá acontecer após a implementação em hardware do sistema, evitando gastos desnecessários com retrabalhos e alterações no projeto até que se atinja os requisitos preestabelecidos. Desta forma, a caracterização apurada do canal de comunicação torna-se indispensável para o desenvolvimento das próximas gerações de sistemas de comunicação sem fio. Neste contexto, a caracterização estatística

do desvanecimento de curto prazo, foco do trabalho, tem recebido considerável atenção da comunidade científica. Na Seção 1.3 alguns trabalhos relacionados com o tema serão revisitados.

1.3 Revisão bibliográfica

O desvanecimento de curto prazo, conforme descrito na Seção 1.2, está relacionado com as variações instantâneas do sinal de recepção, sendo um fenômeno que suscita grande interesse. Vários modelos são usados para descrever esse tipo de desvanecimento. Dentre eles, Rayleigh [16], Hoyt [17] e Rice [18] são os mais tradicionais e bem estabelecidos. Suas estatísticas foram descritas conjuntamente em termos da envoltória e fase, decorrentes diretamente da definição de seus modelos físicos. Mais especificamente, o modelo complexo de Rayleigh é encontrado considerando que as componentes em fase e em quadratura do sinal de recepção sejam modeladas como variáveis aleatórias Gaussianas independentes, com média zero e de mesmo desvio padrão, resultando no simples modelo de distribuição conjunta de envoltória e fase Rayleigh-Uniforme. Hoyt difere de Rayleigh pelo fato de considerar que as variâncias das componentes possam admitir valores distintos, resultando no modelo conjunto de envoltória e fase Hoyt-não-Uniforme. Já Rice, difere por considerar que a média das componentes do sinal possa admitir valores diferentes de zero, resultando na distribuição conjunta de envoltória e fase Rice-não-Uniforme. As funções densidades de probabilidade (PDFs - do inglês, *Probability Density Functions*) marginais da envoltória e da fase desses modelos podem ser encontradas, em sua forma fechada, diretamente pela integração da distribuição conjunta. Inicialmente, o foco desses modelos complexos era, principalmente, a obtenção da estatística da envoltória do sinal. No entanto, a fase, embora aparecendo como um subproduto, encontrou aplicação em vários problemas de análise de desempenho [19].

Tendo em mente a distinta importância das estatísticas da envoltória do sinal de recepção, foram propostos vários modelos baseados apenas na envoltória, que encontram ampla aceitação em comunicações sem fio. Nakagami- m [20] e Weibull [21] destacam-se como seus representantes, seguidos por α - μ [22], κ - μ [23] e η - μ [23]. Os três últimos são modelos de desvanecimento mais gerais: o modelo α - μ abrange Weibull e Nakagami- m ; κ - μ engloba Rice e Nakagami- m e, por fim, o modelo η - μ inclui Hoyt e Nakagami- m . O estudo desses modelos generalizados foi então aprofundado com a obtenção das suas estatísticas de ordem superior [24, 25]. Outros desenvolvimentos levaram a modelos de desvanecimento baseados na envoltória ainda mais gerais, denominados, α - κ - μ [26] e α - η - μ [26], o primeiro contemplando α - μ e κ - μ , e o segundo α - μ e η - μ . Em todos esses modelos baseados na envoltória não há qualquer informação a respeito da distribuição

de fase. Assim, a caracterização da fase nesses cenários constitui uma questão em aberto e sujeita a investigações. Na tentativa de suprir essa demanda, modelos complexos em cenários κ - μ [27] e η - μ [28] foram propostos, e as correspondentes PDFs da envoltória e da fase, tanto a conjunta quanto as marginais, foram deduzidas.

Na engenharia, o objetivo final de qualquer investigação teórica é encontrar uma aplicação na prática. Apesar do fato dos modelos α - μ , η - μ e κ - μ , bem como suas extensões, terem sido criados apenas recentemente, eles vêm encontrando uso em diversos cenários práticos. Na sequência, citamos alguns exemplos. Em [29], modelos de perfil de atraso para comunicação V2V utilizando larguras de banda de 1, 20, 33.33 e 50 MHz foram apresentados. Com base nas medições, uma das conclusões tiradas foi que "... o desvanecimento severo poderia ser modelado pela distribuição α - μ ... correspondendo a casos em que o parâmetro de Nakagami- m é menor que 0.5". Em [30], medições do desvanecimento de curto prazo na faixa de 400 MHz, em um cenário com vegetação e/ou movimento humano, experimentado por um dispositivo sem fio localizado a apenas 1.5 cm acima da superfície do solo foram realizadas. A distribuição α - μ foi a que produziu o melhor ajuste dentre as distribuições comparadas na ocasião. Em [31], a distribuição α - μ foi empregada para modelar o desvanecimento composto de curto e longo prazo (sombreamento) em uma campanha de medição realizada na área urbana de Valência, Espanha, para um cenário de V2V. Vários modelos foram testados e comparados. Os autores concluíram que a distribuição α - μ proporcionou o melhor ajuste para os dados experimentais "com a vantagem de sua simplicidade". Em [32], o modelo κ - μ foi usado com sucesso em uma análise experimental para modelar o impacto de interferência co-canal e ruído de fundo em uma rede corporal (BAN - do inglês, *Body Area Network*) operando em 2.48 GHz. Uma versão estendida da distribuição κ - μ , o modelo κ - μ sombreado [33], foi utilizada com sucesso para ajustar medidas em uma transmissões D2D e comunicações centradas no corpo (*body-centric communications*) [34], bem como em canais acústicos subaquáticos ultrassônicos [35]. Em [36], a estatística de segunda ordem denominada de taxa de cruzamento de nível foi deduzida para o modelo de desvanecimento α - κ - μ e utilizada para se ajustar a medições de dados para canais de satélite em 1.8 GHz. Em [37], foi suposto que a potência média da envoltória do sinal da distribuição η - μ segue uma distribuição gama inversa, uma validação empírica desse modelo para uso em canais de comunicação centrados no corpo foi realizada com medições em tempo real obtidas em um ambiente interno.

Um grande número de campanhas de medições tem sido realizadas com o objetivo de modelar o canal de propagação na banda de ondas milimétricas [38–43]. O desvanecimento de longo prazo e a perda de percurso foram extensivamente explorados [6, 44, 45]. Entretanto, embora extremamente importante e afetando drasticamente

a propagação em cenários de comunicação sem fio, as estatísticas de desvanecimento de curto prazo, na banda mm-wave, não receberam tanta atenção até o presente momento. Na grande maioria dos poucos trabalhos disponíveis na literatura sobre o tema, curiosamente, tem-se considerado os modelos de desvanecimento Rayleigh ou Rice para o desvanecimento de curto prazo da envoltória do sinal em condição de nLoS e LoS, respectivamente [41, 42, 46–48]. Em [46], o desvanecimento de curto prazo da envoltória foi modelado como Rice para um conjunto de medidas coletadas em condições de LoS em três corredores de um prédio de escritórios na frequência de 60 GHz com uma largura de banda de 1 GHz. Nesse caso, os valores da média e desvio padrão do fator Riciano foram relatados no trabalho para cada cenário medido. Outro resultado interessante foi apresentado em [47], em que as estatísticas do desvanecimento de curto prazo, obtidas para uma campanha de medições realizada em ambiente aberto, revelaram que a distribuição Rice se adequou melhor que a distribuição Rayleigh mesmo em condições nLoS. Outros trabalhos disponíveis na literatura sobre o assunto, para diferentes cenários em mm-wave [47, 48], mostraram que modelos de desvanecimento mais elaborados devem ser exercitados para que o comportamento real do desvanecimento nessa faixa de frequência possa ser capturado.

A multiplicidade de cenários previstos para as aplicações das redes sem fio de nova geração (por exemplo, 5G) na banda de mm-wave certamente levará à uma variedade de condições de propagação, que são menos propensas a serem acomodadas pelos modelos de desvanecimento convencionais mais simples, tais como Rayleigh, Hoyt, Rice, Nakagami- m e Weibull, que ainda se aplicam, mas são menos flexíveis para englobar situações mais complexas. Modelos um pouco mais flexíveis como α - μ , κ - μ , η - μ , α - κ - μ e α - η - μ , bem como suas versões compostas [33, 49–54], podem servir a este propósito, mas, novamente, podem não ser generalizados o suficiente para atender a todas as situações. Alguns autores já avaliaram o uso de algumas das distribuições mencionadas para modelar dados reais de campo em cenários de mm-wave [55, 56]. Entretanto, em alguns casos, os resultados obtidos não reproduziram efeitos peculiares do comportamento do sinal [55], tal como a bimodalidade. Dessa forma, o uso de modelos de desvanecimento ainda mais generalizados pode ser necessário.

Em 2016 foi proposto um modelo de desvanecimento complexo muito geral e unificador, denominado α - η - κ - μ [19]. Ele abrange praticamente todos os fenômenos relevantes da propagação de curto prazo. O referido modelo é bastante flexível e compreende todos modelos de desvanecimento mais relevantes encontrados na literatura [19, Seção VI], bastando para isso uma parametrização adequada. Embora a criação desse novo modelo de propagação seja muito recente, ele já tem atraído a atenção da comunidade científica. Em particular, os autores em [57] investigaram a capacidade de canal sob diferentes mé-

todos de transmissão adaptativa operando em um canal com desvanecimento α - η - κ - μ . Já em [58] foram deduzidas expressões para a probabilidade de interrupção e taxa de erro de símbolo média para vários tipos de modulações em um canal α - η - κ - μ . Outros trabalhos também foram publicados utilizando em suas análises a distribuição α - η - κ - μ [59–61]. O modelo em questão foi originalmente descrito por meio de sua PDF conjunta da envoltória e fase, que é descrita em função de parâmetros baseados em fenômenos físicos. A expressão da PDF conjunta foi apresentada em sua forma fechada, enquanto que as marginais da envoltória e da fase foram apresentadas em sua forma integral ou, no caso específico da envoltória, também por expansão em série [19].

A flexibilidade e, mais importante, a generalidade do modelo de desvanecimento complexo α - η - κ - μ torna-o adequado para ser utilizado na maioria dos diversos ambientes de propagação. Em particular, tendo em mente as redes sem fio avançadas, como 5G ou 6G, é instrutivo investigar se o modelo proposto se ajusta adequadamente a dados de campo em um cenário de propagação em ondas milimétricas. Relembrando que esta faixa espectral é a mais cotada para receber as próximas gerações de comunicação sem fio [6].

É sabido que um modelo estatístico ou, no caso específico, um modelo de desvanecimento, não pode ser totalmente caracterizado apenas por suas estatísticas de primeira ordem, uma vez que elas descrevem apenas o seu comportamento estático. A dinâmica de um processo é descrita pelas suas estatísticas de ordem superior. A obtenção de tais estatísticas não é uma tarefa simples e muito menos óbvia. Um exemplo disso é o caso do modelo Nakagami- m , em que sua estatística de primeira ordem apareceu pela primeira vez no início da década de 1960, entretanto suas estatísticas de ordem superior apareceram apenas no final da década de 1990, quase 40 anos depois. A correta caracterização da dinâmica de um processo tão importante e útil permitiu uma melhor compreensão dos correspondentes fenômenos de desvanecimento, que se seguiu com um número enorme de novos estudos, avançando, dessa forma, no conhecimento do processo Nakagami- m . Nesse sentido, manter o modelo de desvanecimento α - η - κ - μ apenas com suas estatísticas de primeira ordem deve limitar seu escopo a aplicações em cenários muito restritos. Sendo assim, a obtenção das estatísticas de ordem superior do modelo α - η - κ - μ pode ser considerada uma sólida e importante contribuição para o melhor entendimento do processo estatístico em questão e será o tema central do presente trabalho.

1.4 Objetivos e contribuições do trabalho

O objetivo deste trabalho é aprofundar o estudo da distribuição de desvanecimento α - η - κ - μ . Em particular, focando no desenvolvimento das suas estatísticas de ordem

superior, objetivando à obtenção das seguintes métricas: Taxa de cruzamento de nível no domínio do tempo (LCR_t - do inglês, *Level Crossing Rate in time-domain*), tempo médio de desvanecimento no domínio do tempo (AFD_t - do inglês, *Average Fade Duration in time-domain*) e taxa de cruzamento de fase no domínio do tempo (PCR_t - do inglês, *Phase Crossing Rate in time-domain*). Devido à sua abrangência, qualquer avanço no desenvolvimento relacionado a esse novo modelo irá compreender, como consequência, os demais modelos já disponíveis na literatura.

Neste trabalho é apresentado como parte de motivação que o modelo de desvanecimento α - η - κ - μ proporciona um melhor ajuste para a envoltória, considerando a PDF e a CDF experimental de dados, extraídos da literatura, coletados em 60 GHz e 28 GHz. Indo mais adiante, uma campanha de medição completa em um ambiente interno na faixa de ondas milimétricas foi realizada com o objetivo de caracterizar o canal de desvanecimento de curto prazo em termos de suas estatísticas de primeira e segunda ordem. As medições foram realizadas em uma ampla variedade de cenários, com frequências variando de 55 a 65 GHz, em condições de LoS e nLoS, utilizando combinações de polarizações de antenas horizontal e vertical no transmissor e no receptor. Tais medições foram realizadas em parceria com o instituto de pesquisa iTEAM, da Universidade Politécnica de Valência, Espanha, pelos Professores Lorenzo Rubio, Vicent Miguel Rodrigo Peñarrocha e Juan Reig, a quem somos eternamente gratos. Além das medições práticas, pode-se destacar as seguintes contribuições do trabalho:

- Expressão fechada da PDF conjunta das componentes em fase, em quadratura e de suas derivadas temporais;
- Expressão fechada da PDF conjunta da envoltória, da fase e de suas derivadas temporais;
- Expressão fechada da PDF conjunta da envoltória, da sua derivada temporal e da fase;
- Expressão fechada da PDF conjunta da envoltória, da fase, e da sua derivada temporal;
- Expressão fechada para a LCR_t em função da fase;
- Expressão fechada para a PCR_t em função da envoltória;
- Expressão para a LCR_t em função de uma única integral própria;
- Expressão para a AFD_t em função da razão de duas expressões, uma dada em função de expansão em série e a outra por uma integral própria;

- Expressão para a PCR_t em função de uma integral imprópria facilmente calculável;
- Seleção da PDF do modelo de desvanecimento, escolhida dentre os modelos Rayleigh, Rice, Nakagami- m , α - μ , κ - μ , η - μ e α - η - κ - μ , que melhor se ajusta aos dados experimentais da campanha de medições realizada em diversos cenários utilizando as seguintes métricas de qualidade de ajuste (GoF - do inglês, *Goodness-of-Fit*): mínimo erro médio quadrático normalizado (NMSE - do inglês, *Normalized Mean Square Error*), Kolmogorov-Smirnov (KS) e critério de informação Akaike (AIC - do inglês, *Akaike Information Criterion*);
- Seleção da taxa de cruzamento de nível espacial (LCR_s - do inglês, *Level Crossing Rate in space-domain*) do modelo de desvanecimento, também escolhida dentre os modelos Rayleigh, Rice, Nakagami- m , α - μ , κ - μ , η - μ e α - η - κ - μ , que melhor se ajusta aos dados experimentais da campanha de medições utilizando as métricas de qualidade de ajuste NMSE e AIC.

1.5 Estrutura da tese

Os demais capítulos desta tese de doutorado estão estruturados conforme mostrado a seguir:

- O Capítulo 2 revisita as estatísticas de primeira ordem do novo modelo de desvanecimento α - η - κ - μ .
- O Capítulo 3 mostra a utilização da distribuição α - η - κ - μ em testes de aderência para a PDF e CDF da envoltória de dados experimentais, disponibilizados na literatura, coletados em 60 GHz e 28 GHz. Neste capítulo também são detalhadas todas as métricas de GoF utilizadas neste trabalho de doutorado.
- O Capítulo 4 deduz as estatísticas de ordem superior do modelo α - η - κ - μ , apresentando algumas estatísticas conjuntas e culminando com o desenvolvimento das métricas LCR_t , AFD_t e PCR_t . Este capítulo também retrata, com propósito ilustrativo, três conjuntos de gráficos das métricas citadas anteriormente, a partir dos quais é possível retirar algumas conclusões.
- O Capítulo 5 apresenta a campanha de medições em ondas milimétricas realizada para validação experimental de estatísticas de primeira e segunda ordem, mais especificamente a PDF e a LCR_s , de vários modelos de desvanecimento já consolidados e também do novo modelo α - η - κ - μ . O objetivo é verificar qual modelo de desvanecimento melhor se ajusta aos dados experimentais em diferentes cenários

de propagação em ondas milimétricas, utilizando para isso os critérios de comparação NMSE, KS e AIC. O processo de estimação dos parâmetros das distribuições avaliadas também é apresentado neste capítulo.

- Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do presente trabalho de doutorado e as perspectivas para trabalhos futuros.

2 O Modelo de Desvanecimento α - η - κ - μ

2.1 O modelo de desvanecimento α - η - κ - μ complexo

O modelo de desvanecimento α - η - κ - μ complexo, proposto em [19], abrange praticamente todos os fenômenos relevantes da propagação descritos na literatura, destacados a seguir: não linearidade do meio, potências das ondas espalhadas, potência das componentes dominantes e os *clusters* de multipercurso. Este modelo considera as componentes em fase, X , e em quadratura, Y , do sinal independentes entre si e com diferentes atributos, resultando em um sinal complexo determinado por $S = X + jY$. As PDFs das componentes X e Y foram derivadas a partir da variável aleatória generalizada Z , definida inicialmente em [23] como

$$Z^2 = \sum_{i=1}^{\mu_z} (Z_i + \lambda_{z_i})^2, \quad (2.1)$$

na qual, (i) Z pode denotar tanto X quanto Y ; (ii) Z_i são processos Gaussianos independentes de média zero e variância σ_z^2 ; (iii) $\lambda_{z_i}^2$ é a potência da componente dominante do i -ésimo *cluster* de multipercurso e μ_z é o número de *clusters* de multipercurso. A PDF correspondente de Z , $f_Z(z)$, pode ser encontrada em [27, Eq. (15)] e é dada por

$$f_Z(z) = \frac{|z|^{\frac{\mu_z}{2}} \exp\left(-\frac{(z-\lambda_z)^2}{2\sigma_z^2}\right) I_{\frac{\mu_z}{2}-1}\left(\frac{|z\lambda_z|}{\sigma_z^2}\right)}{2\sigma_z^2 |\lambda_z|^{\frac{\mu_z}{2}-1} \cosh\left(\frac{z\lambda_z}{\sigma_z^2}\right)}. \quad (2.2)$$

Na equação (2.2), (i) $\mu_z > 0$ é o parâmetro de forma (número de *clusters* multipercurso); (ii) σ_z^2 é o parâmetro de escala (potência de um único *cluster* de multipercurso) e (iii) $-\infty < \lambda_z < \infty$ é o parâmetro de localização (λ_z^2 é a potência total das componentes dominantes de todos os *clusters*). Na expressão, $I_v(\cdot)$ representa a função de Bessel modificada de ordem v [62, Eq. (8.406.5)]. A PDF apresentada na equação (2.2) é bastante geral e contém como caso especial a PDF Gaussiana, que pode ser obtida a partir dela utilizando o parâmetro $\mu_z = 1$.

Partindo do modelo descrito em [23], o sinal complexo S , em sua forma polar, pode ser representado como $S = R^{\frac{\alpha}{2}} \exp(j\Theta)$, em que R é a envoltória do sinal em desvanecimento, Θ é a sua fase e $\alpha > 0$ é o parâmetro de não-linearidade do meio [22], que para $\alpha = 2$ implica em linearidade e $\alpha \neq 2$ em não-linearidade. Assim, as correspondentes componentes em fase e em quadratura ficam dadas, respectivamente, por $X = R^{\frac{\alpha}{2}} \cos(\theta)$ e $Y = R^{\frac{\alpha}{2}} \sin(\theta)$. A PDF conjunta $f_{R,\Theta}(r, \theta)$ pode ser encontrada realizando a devida

transformação de variáveis, resultando na seguinte expressão:

$$f_{R,\Theta}(r, \theta) = \frac{\alpha}{2} r^{\alpha-1} f_X(r^{\frac{\alpha}{2}} \cos(\theta)) f_Y(r^{\frac{\alpha}{2}} \sin(\theta)). \quad (2.3)$$

Em [19], a PDF conjunta da envoltória e da fase foi apresentada de acordo com três parametrizações distintas, denominadas: (i) Parametrização-0 (*Raw Parametrization*); (ii) Parametrização-1 (*Local Parametrization*) e (iii) Parametrização-2 (*Global Parametrization*). Por fins de simplicidade, neste trabalho serão exploradas apenas a Parametrização-0 e a Parametrização-2. A partir de (2.3) e utilizando a PDF dada em (2.2), convenientemente escrita em termos dos parâmetros da componente em fase (μ_x , σ_x , λ_x) e dos parâmetros da componente em quadratura (μ_y , σ_y , λ_y) chega-se na PDF conjunta de envoltória e fase, $f_{R,\Theta}(r, \theta)$, utilizando a Parametrização-0, dada por

$$\begin{aligned} f_{R,\Theta}(r, \theta) &= \frac{\alpha r^{\alpha(1+\frac{\mu_x}{4}+\frac{\mu_y}{4})-1} |\cos(\theta)|^{\frac{\mu_x}{2}} |\sin(\theta)|^{\frac{\mu_y}{2}}}{8 \sigma_x^2 \sigma_y^2 |\lambda_x|^{\frac{\mu_x}{2}-1} |\lambda_y|^{\frac{\mu_y}{2}-1} \exp\left(\frac{\lambda_x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{\lambda_y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \exp\left(-\left(\frac{\cos^2(\theta)}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{\sigma_y^2}\right) \frac{r^\alpha}{2}\right) \\ &\times \exp\left(\left(\frac{\lambda_x \cos(\theta)}{\sigma_x^2} + \frac{\lambda_y \sin(\theta)}{\sigma_y^2}\right) r^{\frac{\alpha}{2}}\right) I_{\frac{\mu_x}{2}-1}\left(\frac{|\lambda_x \cos(\theta)| r^{\frac{\alpha}{2}}}{\sigma_x^2}\right) I_{\frac{\mu_y}{2}-1}\left(\frac{|\lambda_y \sin(\theta)| r^{\frac{\alpha}{2}}}{\sigma_y^2}\right) \\ &\times \operatorname{sech}\left(\frac{\lambda_y \sin(\theta) r^{\frac{\alpha}{2}}}{\sigma_y^2}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{\lambda_x \cos(\theta) r^{\frac{\alpha}{2}}}{\sigma_x^2}\right). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Os parâmetros da Parametrização-0 são descritos individualmente para as componentes em fase X e quadratura Y (*clusters* em fase e *clusters* em quadratura), como mostrado a seguir: (i) potência das ondas espalhadas de cada *cluster* de multipercurso (σ_x^2 e σ_y^2); (ii) potência das componentes dominantes de todos os *clusters* em fase ou em quadratura (λ_x^2 e λ_y^2); (iii) número de *clusters* de multipercurso (μ_x e μ_y).

Os parâmetros da Parametrização-2 levam em consideração o sinal complexo de uma forma geral: (i) $\hat{r}^\alpha = \mathbb{E}(R^\alpha) > 0$, ou seja, $\hat{r}^\alpha = \mu_x \sigma_x^2 + \lambda_x^2 + \mu_y \sigma_y^2 + \lambda_y^2$, com $\mathbb{E}(\cdot)$ sendo o operador esperança; (ii) $\kappa > 0$, definido como sendo a razão entre potência total das componentes dominantes e a potência total das ondas espalhadas, isto é, $\kappa = (\lambda_x^2 + \lambda_y^2)/(\mu_x \sigma_x^2 + \mu_y \sigma_y^2)$; (iii) $\eta > 0$, definido como a razão entre a potência total das ondas espalhadas da componente em fase e da componente em quadratura, ou seja, $\eta = \mu_x \sigma_x^2/(\mu_y \sigma_y^2)$; (iv) $q > 0$, definido como sendo a razão entre duas razões: a razão entre a potência das componentes dominantes de X e Y (λ_x^2/λ_y^2) e a razão da potência das ondas espalhadas de X e Y ($\mu_x \sigma_x^2/(\mu_y \sigma_y^2)$), ou seja, $q = \lambda_x^2 \mu_y \sigma_y^2/(\lambda_y^2 \mu_x \sigma_x^2)$; (v) $p > 0$, definido como sendo a razão entre o número de *clusters* de multipercurso das componentes em fase e quadratura, isto é, $p = \mu_x/\mu_y$; (vi) $\mu > 0$, definido como sendo o número total de *clusters* multipercurso, $\mu = (\mu_x + \mu_y)/2$.

A conversão de expressões da Parametrização-0 para a Parametrização-2 pode ser alcançada realizando as seguintes substituições dos parâmetros:

- (i) $\mu_x = 2p\mu/(1+p)$;
- (ii) $\mu_y = 2\mu/(1+p)$;
- (iii) $\lambda_x = \sqrt{\eta\kappa q \hat{r}^\alpha / ((\kappa+1)(\eta q+1))}$;
- (iv) $\lambda_y = \sqrt{\kappa \hat{r}^\alpha / ((\kappa+1)(\eta q+1))}$;
- (v) $\sigma_x = \sqrt{\eta(p+1)\hat{r}^\alpha / (2(\eta+1)(\kappa+1)\mu p)}$;
- (vi) $\sigma_y = \sqrt{(p+1)\hat{r}^\alpha / (2(\eta+1)(\kappa+1)\mu)}$.

Convertendo a equação da PDF conjunta da envoltória e fase da distribuição α - η - κ - μ , apresentada em (2.4) na Parametrização-0, para a Parametrização-2, resulta

$$\begin{aligned}
 f_{R,\Theta}(r, \theta) &= \frac{\alpha \mu^2 p (\eta+1)^2 (\kappa+1)^{\frac{\mu}{2}+1} r^{\frac{\alpha}{2}(\mu+2)-1} |\text{sen}(\theta)|^{\frac{\mu}{p+1}} |\cos(\theta)|^{\frac{\mu p}{p+1}}}{2\eta(p+1)^2 \left(\frac{\kappa}{\eta q+1}\right)^{\frac{\mu}{2}-1} (\eta q)^{\frac{\mu p}{2(p+1)}-\frac{1}{2}} \hat{r}^{\frac{\alpha}{2}(\mu+2)} \exp\left(\frac{\kappa\mu(\eta+1)(qp+1)}{(p+1)(\eta q+1)}\right)} \\
 &\times \exp\left(-\frac{\mu(\eta+1)(\kappa+1)(\eta \text{sen}^2(\theta) + p \cos^2(\theta))}{\eta(p+1)} \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^\alpha\right) \\
 &\times \exp\left(\frac{2\mu(\eta+1) \cos\left(\theta - \arctan\left(\frac{1}{p}\right) (\eta/q)^{1/2}\right)}{\eta(p+1)} \sqrt{\frac{\eta\kappa(\kappa+1)(\eta+qp^2)}{\eta q+1}} \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^{\frac{\alpha}{2}}\right) \\
 &\times I_{\frac{\mu}{p+1}-1} \left(\frac{2\mu(\eta+1)|\text{sen}(\theta)|}{p+1} \sqrt{\frac{\kappa(\kappa+1)}{\eta q+1}} \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^{\alpha/2}\right) I_{\frac{\mu p}{p+1}-1} \left(\frac{|\cos(\theta)|}{\frac{\eta(p+1)}{2\mu p(\eta+1)}} \sqrt{\frac{\eta\kappa q(\kappa+1)}{\eta q+1}} \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^{\frac{\alpha}{2}}\right) \\
 &\times \text{sech}\left(\frac{2\mu p(\eta+1) \cos(\theta)}{\eta(p+1)} \sqrt{\frac{\eta\kappa q(\kappa+1)}{\eta q+1}} \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^{\frac{\alpha}{2}}\right) \text{sech}\left(\frac{\text{sen}(\theta)}{\frac{p+1}{2\mu(\eta+1)}} \sqrt{\frac{\kappa(\kappa+1)}{\eta q+1}} \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^{\frac{\alpha}{2}}\right). \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

No decorrer do trabalho, grande parte das deduções matemáticas serão apresentadas utilizando a Parametrização-0, devido à sua maior simplicidade de manipulação. Entretanto, as expressões finais, resultantes destes desenvolvimentos, também serão apresentadas na Parametrização-2, cujos principais parâmetros nomeiam a distribuição estudada.

As PDFs da envoltória ¹ e da fase da distribuição α - η - κ - μ podem ser encontradas de forma exata por meio de uma integração simples, conforme destacado nas seguintes

¹ É importante destacar que, em [19] foi encontrada uma simples expansão em série para a PDF e CDF da envoltória do modelo α - η - κ - μ .

expressões:

$$f_R(r) = \int_0^{2\pi} f_{R,\Theta}(r, \theta) d\theta, \quad (2.6)$$

$$f_\Theta(\theta) = \int_0^\infty f_{R,\Theta}(r, \theta) dr, \quad (2.7)$$

nas quais, $f_{R,\Theta}(r, \theta)$ pode ser tanto a equação (2.4) quanto (2.5), dependendo da parametrização utilizada.

A CDF da envoltória da distribuição $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$ pode ser obtida por meio da seguinte integração dupla da PDF conjunta:

$$F_R(R) = \int_0^R \int_0^{2\pi} f_{R,\Theta}(r, \theta) d\theta dr. \quad (2.8)$$

O modelo de desvanecimento apresentado nesta seção abrange todos os outros modelos complexos de desvanecimento disponíveis na literatura [19]. Um grande número de distribuições bem conhecidas, e outras que eventualmente ainda nem mesmo estão disponíveis na literatura, podem ser obtidas como casos particulares do modelo $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$. Dentre elas, podemos citar: distribuições com três parâmetros de desvanecimento ($\alpha\text{-}\kappa\text{-}\mu$ e $\alpha\text{-}\eta\text{-}\mu$), distribuições com dois parâmetros de desvanecimento ($\alpha\text{-}\mu$, $\eta\text{-}\mu$, $\kappa\text{-}\mu$ e Beckmann ($\eta\text{-}\kappa$)), distribuições com um parâmetro de desvanecimento (Nakagami- m , Weibull, Hoyt, e Rice), e as distribuições sem parâmetro de desvanecimento (Rayleigh, Semi-Gaussiana e Exponencial negativa). Um explicação detalhada da obtenção dos casos particulares pode ser encontrada em [19, Seção VI].

Além dos parâmetros já definidos nesta seção, utilizados para as estatísticas de primeira ordem do modelo de desvanecimento complexo $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$, serão definidos mais alguns parâmetros a serem utilizados em suas estatísticas de ordem superior. Para a Parametrização-0, definimos os seguintes parâmetros: (i) f_x , como sendo a frequência Doppler da componente em fase; e (ii) f_y , como sendo a frequência Doppler da componente em quadratura. Para a Parametrização-2, são definidos: (i) f , como sendo a frequência Doppler média e (ii) d , o parâmetro de desbalanceamento entre frequências Doppler das componentes em fase e em quadratura. Assim, (i) $2f = f_x + f_y$; (ii) $d = f_x/f_y$; (iii) $f_x = 2df/(1+d)$; (iv) $f_y = 2f/(1+d)$.

2.2 O modelo de desvanecimento $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$ baseado na envoltória

Em [19], as estatísticas do modelo $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$ também foram derivadas por uma perspectiva baseada puramente no modelo físico da envoltória. Esse tipo de abordagem, normalmente, conduz a formulações mais simples. Em contrapartida, nesse tipo de modelamento, perde-se as informações da fase e, desta forma, a estatística deduzida passa a ser apenas a da envoltória do sinal.

Conforme já mencionado, o modelo de desvanecimento α - η - κ - μ descreve um sinal composto de *clusters* de multipercurso, componentes dominantes arbitrárias, potências dos multipercursos arbitrárias e um número arbitrário de *clusters* de multipercurso para as componentes X e Y propagando-se em um ambiente não-linear. O modelo físico da envoltória do sinal descrito anteriormente pode ser representado por

$$R^\alpha = \sum_{i=1}^{\mu_x} (X_i + \lambda_{x_i})^2 + \sum_{i=1}^{\mu_y} (Y_i + \lambda_{y_i})^2, \quad (2.9)$$

na qual: (i) X_i e Y_i são processos Gaussianos mutuamente independentes; (ii) $\mathbb{E}(X_i) = \mathbb{E}(Y_i) = 0$; (iii) $\mathbb{E}(X_i^2) = \sigma_x^2$; $\mathbb{E}(Y_i^2) = \sigma_y^2$; (iv) λ_{x_i} e λ_{y_i} são, respectivamente, o valor médio das componentes em fase e em quadratura do *cluster* de multipercurso i ; (v) μ_x e μ_y representam o número de *clusters* de multipercurso para as componentes X e Y , respectivamente. Seguindo trabalhos anteriores, [23], $\lambda_x^2 = \sum_{i=1}^{\mu_x} \lambda_{x_i}^2$ e $\lambda_y^2 = \sum_{i=1}^{\mu_y} \lambda_{y_i}^2$. Definindo $U = \sum_{i=1}^{\mu_x} (X_i + \lambda_{x_i})^2$ e $V = \sum_{i=1}^{\mu_y} (Y_i + \lambda_{y_i})^2$, pode-se reescrever a expressão em (2.9) como $R^\alpha = U + V$. Utilizando a devida transformação de variáveis, a estatística da envoltória, $f_R(r)$, pode ser encontrada como

$$\begin{aligned} f_R(r) &= \int_0^{r^\alpha} f_{R,U}(r, u) du \\ &= \alpha r^{\alpha-1} \int_0^{r^\alpha} f_U(u) f_V(r^\alpha - u) du, \end{aligned} \quad (2.10)$$

na qual $f_U(u)$ e $f_V(v)$ são claramente as PDFs de $Z^2 = W$, $f_W(w)$, [19, Eq. 2], com modelo físico apresentado na equação (2.1), devidamente escritas com os parâmetros das componentes em fase (μ_x , σ_x , λ_x) e em quadratura (μ_y , σ_y , λ_y), respectivamente. A PDF conjunta $f_{R,U}(r, u)$ em sua Parametrização-0 e em sua Parametrização-2 é dada, respectivamente, por

$$\begin{aligned} f_{R,U}(r, u) &= \frac{\alpha r^{\alpha-1} \sqrt{u}^{\frac{\mu_x}{2}-1} \sqrt{r^\alpha - u}^{\frac{\mu_y}{2}-1} \exp\left(\left(\frac{1}{\sigma_y^2} - \frac{1}{\sigma_x^2}\right) \frac{u}{2}\right)}{4\sigma_x^2 \sigma_y^2 |\lambda_x|^{\frac{\mu_x}{2}-1} |\lambda_y|^{\frac{\mu_y}{2}-1} \exp\left(\frac{\lambda_x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{\lambda_y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(\frac{r^\alpha}{2\sigma_y^2}\right)} \\ &\quad \times I_{\frac{\mu_x}{2}-1}\left(\frac{\sqrt{u}|\lambda_x|}{\sigma_x^2}\right) I_{\frac{\mu_y}{2}-1}\left(\frac{\sqrt{r^\alpha - u}|\lambda_y|}{\sigma_y^2}\right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned}
f_{R,U}(r, u) &= \frac{\alpha\mu^2 p(\eta+1)^2(\kappa+1)^2((\kappa+1)(\eta q+1))^{\frac{\mu}{2}-1} r^{\alpha-1}}{(p+1)^2 \kappa^{\frac{\mu}{2}-1} \eta^{\frac{\mu p}{2(p+1)}+\frac{1}{2}} q^{\frac{\mu p}{2(p+1)}-\frac{1}{2}} \hat{r}^{\alpha(\frac{\mu}{2}+1)}} \\
&\times \exp\left(-\frac{(\eta+1)(pq+1)\kappa\mu}{(p+1)(\eta q+1)}\right) \exp\left(-\frac{\mu(\eta+1)(\kappa+1)r^\alpha}{(p+1)\hat{r}^\alpha}\right) \\
&\times I_{\frac{\mu p}{p+1}-1}^{\left(\frac{2\mu p q(\eta+1)\sqrt{\kappa(\kappa+1)}\sqrt{u}}{(p+1)\sqrt{\eta q(\eta q+1)}\sqrt{\hat{r}^\alpha}}\right)} I_{\frac{\mu}{p+1}-1}^{\left(\frac{2\mu(\eta+1)\sqrt{\kappa(\kappa+1)}\sqrt{r^\alpha-u}}{(p+1)\sqrt{\eta q+1}\sqrt{\hat{r}^\alpha}}\right)} \\
&\times u^{\frac{\mu p}{2(p+1)}-\frac{1}{2}} (r^\alpha-u)^{\frac{\mu}{2(p+1)}-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{\mu(\eta+1)(\kappa+1)(p-\eta)u}{\eta(p+1)\hat{r}^\alpha}\right). \tag{2.12}
\end{aligned}$$

2.3 Gráficos de PDFs gerados com o modelo de desvanecimento α - η - κ - μ

Nesta seção serão apresentados alguns exemplos de curvas obtidas a partir das PDFs $f_R(r)$ e $f_\Theta(\theta)$ do modelo de desvanecimento α - η - κ - μ . O objetivo é evidenciar a versatilidade e a possibilidade de geração de curvas não convencionais com o novo modelo, que podem ser úteis em situações ou cenários peculiares. Os exemplos apresentados são apenas uma pequena amostra de um enorme universo de possibilidades, que ainda precisa ser melhor explorado. A seta presente em cada figura desta seção serve para orientar a respeito da variação dos parâmetros de cada conjunto de curvas, indicando a direção de crescimento do seu valor.

As Figuras 2.1(a) e 2.1(b) mostram gráficos da PDF da envoltória para diferentes combinações $\alpha\mu = 1$ e valores arbitrários para os demais parâmetros. A condição $\alpha\mu = 1$ é bastante peculiar, pois conduz a curvas com valores não nulos na origem, indicando condições de desvanecimento bem severas, nas quais o receptor percebe com uma probabilidade não nula valores muito próximos de zero (ausência de sinal), conforme já apresentado em [22]. Percebe-se que nos dois gráficos citados, o aumento de α e, consequentemente, a redução de μ provocam o evidenciamento do efeito de alterações abruptas de tendência no comportamento da PDF, denominado de não unimodalidade ou multimodalidade [19]. Mais que isso, na Figura 2.1(b) o aumento de κ e a escolha dos demais parâmetros faz com que o efeito da bimodalidade se manifeste de forma bastante explícita se comparado com o efeito presente nas curvas da Figura 2.1(a).

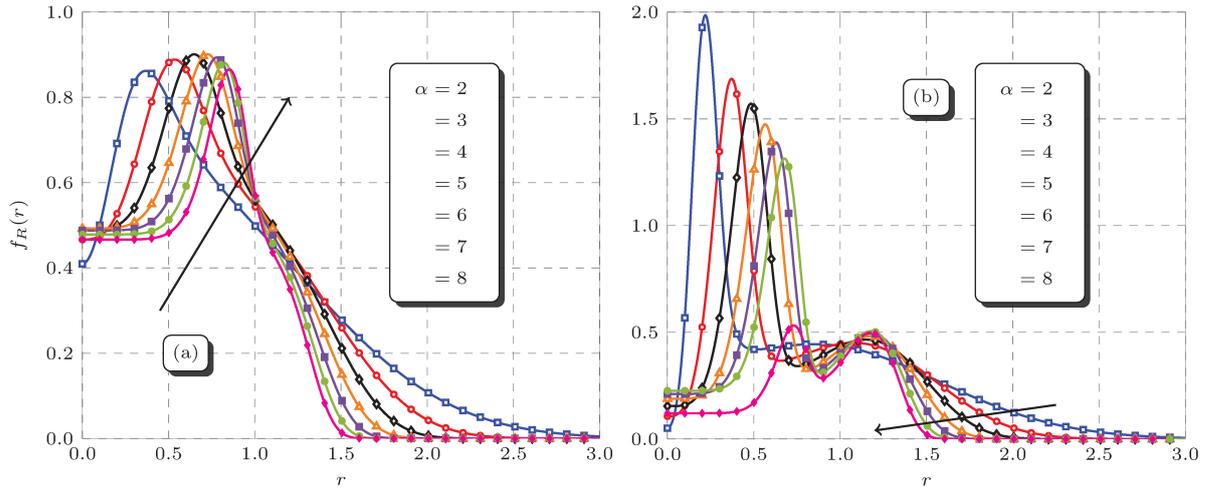


Figura 2.1 – PDFs da envoltória variando α para (a) ($\eta = 100$, $\kappa = 1$, $\mu = 1/\alpha$, $p = 5$, $q = 1/10$ e $\hat{r} = 1$) e (b) ($\eta = 20$, $\kappa = 10$, $\mu = 1/\alpha$, $p = 1/5$, $q = 1$ e $\hat{r} = 1$).

A Figura 2.2 apresenta cinco conjuntos de gráficos da PDF da envoltória. Cada conjunto é gerado variando um determinado parâmetro e deixando os demais fixos em valores arbitrários, conforme detalhado na legenda da figura. Em particular, a Figura 2.2(a) apresenta curvas de PDFs da envoltória para diferentes valores de μ . É possível perceber que o aumento de μ , nesse caso, causa uma redução da proeminência do pico da PDF, localizado nas regiões próximas de zero, resultando em uma menor probabilidade de se encontrar baixos valores da envoltória do sinal desvanecido. Na Figura 2.2(b) são mostradas curvas de PDFs da envoltória para diferentes valores de q , por meio das quais é possível verificar que o aumento de q provoca um deslocamento para a esquerda do pico da PDF, resultando em uma maior probabilidade de se encontrar baixos valores da envoltória do sinal desvanecido. Além disso, percebe-se também que o aumento citado introduz mudanças mais abruptas de tendências nas curvas apresentadas. Na Figura 2.2(c) são apresentadas curvas de PDFs da envoltória obtidas com a variação do parâmetro p . Nela, é possível observar que, com o aumento de p , o pico, presente para baixos valores de r , tende a desaparecer e a curva resultante passa a possuir um formato mais convencional, que poderia ser facilmente reproduzido por distribuições mais simples, tais como Rayleigh, Rice e Nakagami- m . A Figura 2.2(d) retrata algumas curvas de PDFs da envoltória obtidas com a variação do parâmetro η . Para altos valores de η , um pico na PDF acontece na região próxima de zero, destacando o efeito bimodal. Entretanto, essa bimodalidade tende a desaparecer à medida que η possui um valor menor. Note, também, na Figura 2.2(d), que não existe simetria em torno de $r = 1$, típica em distribuições η - μ [19]. Por último, a Figura 2.2(e) apresenta curvas de PDFs da envoltória para vários valores de κ . Nesse conjunto de curvas fica evidenciado o poder de alteração de comportamento da PDF do modelo α - η - κ - μ . Para pequenas variações do valor da envoltória, pode-se verificar uma

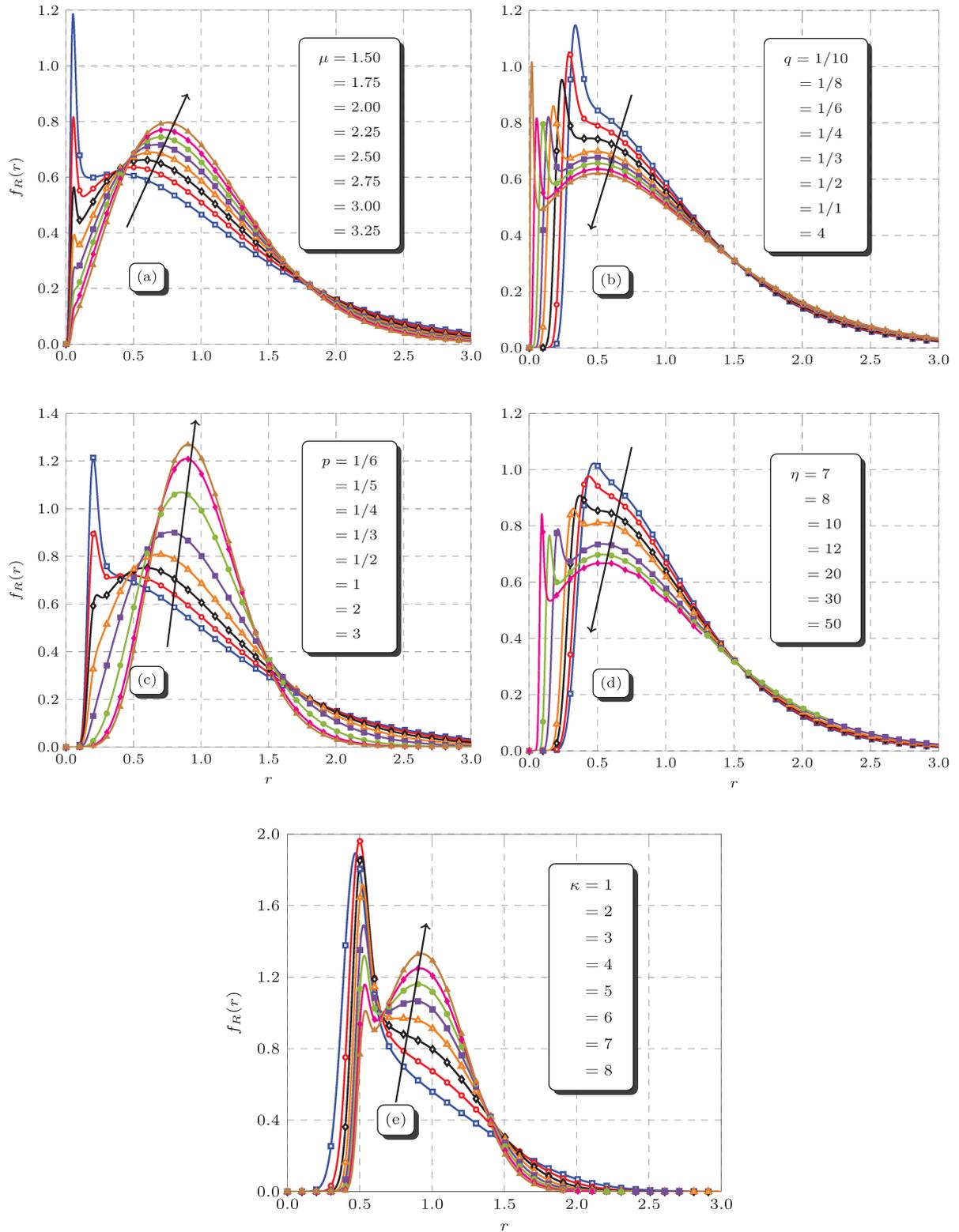


Figura 2.2 – PDFs da envoltória variando os valores de (a) μ ($\alpha = 1$, $\eta = 20$, $\kappa = 10$, $p = 1/5$ e $q = 1/10$), (b) q ($\alpha = 1$, $\eta = 20$, $\kappa = 10$, μ e $p = 1/5$), (c) p ($\alpha = 1$, $\eta = 20$, $\kappa = 10$, $\mu = 1.75$ e $q = 1/5$) (d) η ($\alpha = 1$, $\kappa = 10$, $\mu = 2.25$, $q = 1/5$ e $p = 1/6$) e (e) κ ($\alpha = 2.5$, $\eta = 20$, $\mu = 2.25$, $q = 1/5$ e $p = 1/6$) com $\hat{r} = 1$ para todos os casos.

grande alteração no valor da PDF. Analisando a Figura 2.2(e) é possível constatar que, pouco acima de $r = 0.50$, a curva que apresenta o menor valor de PDF é a que utiliza o maior valor de κ , $\kappa = 8$, entretanto, em $r = 1$, esta mesma curva já é a que apresenta a maior densidade de probabilidade dentre todas as demais apresentadas.

A Figura 2.3 mostra quatro conjuntos de curvas de PDFs da fase. Na Figura 2.3(a) as curvas de PDFs da fase foram obtidas variando o parâmetro q . Pela figura é possível verificar que o aumento desse parâmetro de desbalanceamento preserva a quadrimodalidade inicial, entretanto, fica notável a maior concentração da PDF em regiões de fase próximas de 0 e a redução do seu valor nas regiões próximas de π e $-\pi$. Percebe-se que para as análises de fase os parâmetros \hat{r} e α são irrelevantes, uma vez que eles não afetam o comportamento da distribuição em questão. Na Figura 2.3(b) é apresentado um conjunto de curvas de PDFs da fase obtidas simulando-se um cenário de ausência e presença de componentes dominantes a partir da variação do parâmetro κ . Neste exemplo, fica claro que existe uma tendência das curvas de se moverem de uma situação de simetria quadrimodal para assimetria trimodal quando se aumenta o parâmetro κ . Na Figura 2.3(c) é apresentado dois conjuntos de gráficos, em coordenadas polares, para a PDF da fase em situação de ausência de componente dominante. Um primeiro conjunto utilizando o parâmetro $\eta = 6$ e o outro conjunto utilizando $\eta = 1/6$, ambos variando o parâmetro p . Pela análise das curvas da Figura 2.3(c) é possível identificar que, para $\eta > 0$ as curvas se concentram no entorno de 0 e $\pm\pi$, enquanto que para $\eta < 0$ a concentração ocorre nas proximidades de $\pi/2$ e $3\pi/2$. Pode-se notar, também, que para $\eta > 0$ o aumento de p provoca uma mudança de característica das curvas de quadrimodal para bimodal, enquanto que para $\eta < 0$ acontece exatamente o contrário. A bimodalidade ocorre quando uma das componentes X ou Y aproxima-se de um formato Gaussiano [19]. Para finalizar, a Figura 2.3(d) apresenta um conjunto de curvas mais uma vez variando κ , assim como foi realizado para geração das curvas da Figura 2.3(b), entretanto agora utilizando um valor de $\eta = 3$. Percebe-se que essa mudança no parâmetro η , em comparação com a situação da Figura 2.3(b), fez com que a distribuição da fase, que antes se concentrava em $\Theta = \pm\pi/2$, passasse a se concentrar nas proximidade de $\Theta = 0$ e $\Theta = \pm\pi$.

A partir do exposto nesta seção, foi possível destacar a grande flexibilidade das formas geradas pelas PDFs do modelo de desvanecimento α - η - κ - μ . A influência exata de cada parâmetro da distribuição está longe de ter sido abordada nessa parte do trabalho e merece um estudo mais aprofundando. Conforme mencionado no início da seção, o objetivo por trás da apresentação das curvas foi apenas destacar a versatilidade e a possibilidade de geração de curvas excêntricas com o modelo α - η - κ - μ , tanto para a PDF da envoltória quanto para a PDF da fase, impossíveis de serem geradas com os modelos de desvanecimento convencionais.

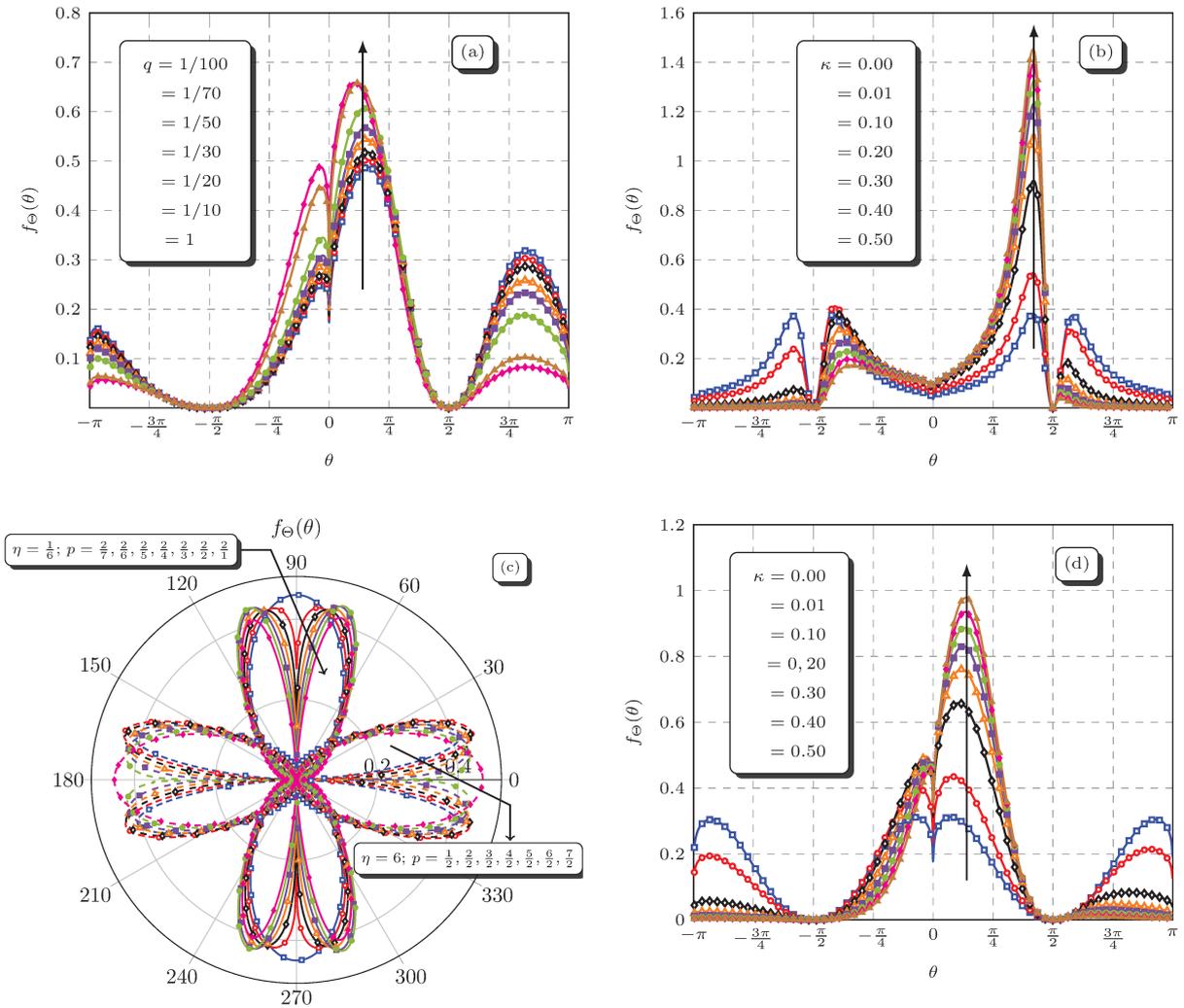


Figura 2.3 – PDFs da fase variando os valores de (a) q ($\eta = 3$, $\kappa = 0.1$, $\mu = 2.25$ e $p = 3$), (b) κ ($\eta = 1/6$, $\mu = 2.25$, $q = 1$ e $p = 3$), (c) p ($\kappa = 0$, $\mu = 2.25$ e $q = 1$) em coordenadas polares e (d) κ ($\eta = 3$, $\mu = 2.25$, $q = 1$ e $p = 3$) com α e \hat{r} irrelevantes para todos os casos.

3 Aplicações Iniciais do Modelo de Desvanecimento α - η - κ - μ em Ondas Milimétricas

Neste capítulo, para fins de motivação do trabalho de doutorado, é mostrando que o modelo de desvanecimento α - η - κ - μ proporciona o melhor ajuste para a PDF e CDF da envoltória de dados experimentais coletados em 60 GHz e 28 GHz, respectivamente, encontrados em artigos disponíveis na literatura [55,56]. Primeiramente, como testes estatísticos de melhor ajuste, tanto o NMSE quanto o KS foram usados para os dados de [55], em que as distribuições Rayleigh, Rice, Nakagami- m , Weibull e α - μ foram inicialmente comparadas. Na sequência, para os dados de [56], em que as distribuições Rayleigh e Rice foram inicialmente testadas, a métrica de melhor ajuste estatístico utilizada foi o KS modificado. Antes de apresentar os resultados obtidos nas aplicações iniciais do modelo α - η - κ - μ em ondas milimétricas, uma explicação detalhada de todos os métodos de avaliação de ajuste utilizados neste trabalho de doutorado será apresentada na próxima seção.

3.1 Testes de qualidade de ajuste (GoF)

Com o objetivo de definir qual modelo estatístico teórico melhor se ajusta aos dados práticos, é necessário, antes, especificar o teste (*Godness of Fit*) a ser utilizado. Na literatura existem inúmeros critérios estatísticos de GoF [63–68] para definir a melhor escolha dentre um conjunto de modelos avaliados, e cada um deles tem suas características específicas. Porém, vale ressaltar que nenhum critério é inequívoco e unanimemente considerado o melhor, pois cada um deles utiliza metodologias de análise particulares para a realização de suas escolhas, o que pode levar, inclusive, a resultados diferentes caso mais de um critério seja utilizado para um mesmo conjunto de dados. As distribuições empíricas são obtidas por meio de histogramas construídos a partir das medidas de campo, por outro lado as distribuições ou curvas teóricas são alcançadas pela estimação de seus parâmetros, ao se utilizar alguma técnica específica para este fim. A seguir os critérios estatísticos de GoF utilizados neste trabalho e suas principais características são apresentados.

1. Normalized Mean Square Error (NMSE): este teste estatístico é adequado para as análises em que o foco está na comparação de uma curva empírica com curvas de modelos teóricos, com objetivo de quantificar a dissimilaridade entre elas (erro

médio). A métrica NMSE é apresentada em decibel (dB), podendo ser calculada por

$$\text{NMSE}_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} (f[n] - \hat{f}[n])^2}{\sum_{n=0}^{N-1} f[n]^2} \right), \quad (3.1)$$

na qual $f[n]$ e $\hat{f}[n]$ representam discretamente a distribuição, ou curva, empírica e estimada, respectivamente; n representa a n -ésima amostra do sinais e N é o número total de amostras consideradas. Quanto menor o valor de NMSE, melhor a qualidade de ajuste do modelo teórico avaliado.

2. Kolmogorov-Smirnov (KS): o teste em questão é considerado adequado quando o objetivo é a comparação de uma CDF empírica com as CDFs teóricas sob hipóteses. Sua estatística de teste é calculada por

$$D \triangleq \arg \max_x |\hat{F}(x) - F(x)|, \quad (3.2)$$

na qual $\hat{F}(x)$ representa a CDF estimada e $F(x)$ a CDF empírica. Perceba que D representa o máximo valor absoluto da diferença entre as curvas comparadas. Se as amostras empíricas seguem o mesmo modelo da distribuição teórica avaliada, o parâmetro citado tende, no limite, quando o número de amostras avaliadas tende ao infinito, para zero. Comumente, o parâmetro D da estatística KS é apresentado juntamente com o parâmetro p , que representa o nível de confiança do teste realizado. Quanto menor D e, conseqüentemente, maior p , melhor é a qualidade do ajuste realizado.

3. KS modificado: tal métrica foi proposta em [69] para quantificar a qualidade do ajuste entre uma CDF empírica e uma teórica, ambas em escala logarítmica, a fim de dar mais peso ao ajuste naqueles valores de amplitude próximos de zero. Isto é, o KS modificado enfatiza a análise de ajuste na calda da CDF, em que o desvanecimento é mais severo. A métrica em questão pode ser calculada como

$$KS_m \triangleq \arg \max_x |\log_{10} \hat{F}(x) - \log_{10} F(x)|. \quad (3.3)$$

4. Akaike Information Criterion (AIC): este teste é recomendado para a comparação entre curvas empíricas e modelos estatísticos teóricos levando em consideração no seu cômputo a dissimilaridade entre as curvas, quantidade de amostras utilizadas e o número de parâmetros da distribuição teórica em avaliação [65]. Este teste penaliza distribuições com um número maior de parâmetros, pois tenta selecionar a distribuição que apresenta a melhor relação entre qualidade de ajuste e custo computacional de implementação. O valor da métrica pode ser calculado por meio

da seguinte expressão:

$$AIC = N \times \ln \left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} (f[n] - \hat{f}[n])^2}{N} \right) + (2k + 1), \quad (3.4)$$

na qual n representa a n -ésima amostra do sinal empírico ou teórico (formato digitalizado), N é o número total de amostras consideradas e, por último, k é o número de parâmetros utilizados pelo modelo teórico avaliado. No teste em questão, a distribuição teórica que alcançar o menor valor com o cálculo da expressão anterior é a que apresenta a melhor relação entre qualidade de ajuste e complexidade computacional.

Como os quatro testes estatísticos mencionados anteriormente usam diferentes abordagens, as conclusões apresentadas por eles podem não ser as mesmas ou, em outras palavras, a melhor distribuição eleita em um determinado teste pode não ser a melhor em outro teste. Figuras de mérito objetivas, que podem ser utilizadas para avaliar a qualidade de ajuste entre distribuições empíricas e teóricas, são obtidas nos quatro testes de GoF apresentados. Em todos eles, o modelo teórico que melhor se ajusta aos dados práticos é aquele que obtém o menor valor nas estatísticas calculadas.

3.2 Aplicação do modelo α - η - κ - μ em 60 GHz

Uma análise abrangente do desvanecimento de curto prazo em 60 GHz foi realizada em condições de LoS, como reportado em [55]. Por meio da campanha de medições realizada, os autores de [55] investigaram o comportamento estatístico da envoltória do desvanecimento de curto prazo em uma banda de 9 GHz. A partir dos dados coletados, os parâmetros das distribuições Rayleigh, Rice, Nakagami- m , Weibull e α - μ foram estimados, utilizando diferentes abordagens, para modelar o desvanecimento de curto prazo. A PDF experimental dos dados foi obtida pelas medidas realizadas no *bin* de frequência 57.002 GHz. A descrição detalhada dos cenários da campanha de medições pode ser encontrada em [55].

Nesta parte do trabalho, as medições realizadas em [55] foram aproveitadas para investigar a adequação do uso da distribuição de desvanecimento da envoltória α - η - κ - μ em 60 GHz. As análises de aderência investigadas aqui utilizaram os dados apresentados em [55, Fig. 3], extraídos com o auxílio do software digitalizador Origin Pro, mais especificamente por meio da sua função *Digitizer*. Na figura, as PDFs teóricas Rayleigh, Rice, Weibull, Nakagami- m e α - μ são plotadas ao lado da PDF estimada a partir dos dados coletados, todas elas utilizando o nível de potência em dBm. Com todos os dados e PDFs cuidadosamente extraídos da figura, ou seja, com ela tendo sido fielmente repro-

duzida, aqui apresentada na Figura 3.1, a primeira análise realizada foi a de avaliar as métricas NMSE e KS das distribuições mencionadas em relação à PDF experimental.

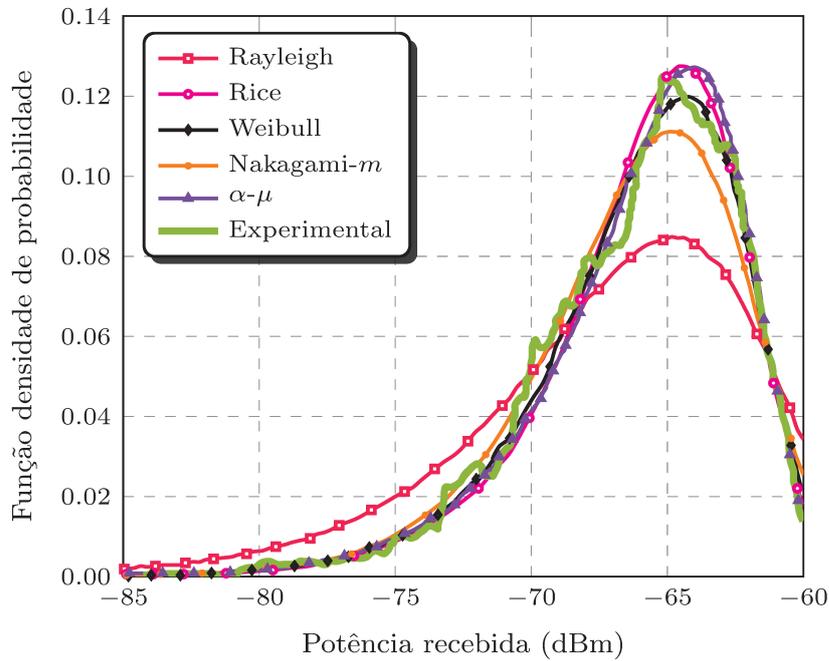


Figura 3.1 – PDFs extraídas da referência [55, Fig. 3] com o software digitalizador Origin Pro.

As conclusões preliminares encontradas aqui coincidiram com aquelas relatadas pelos autores de [55], em que, para as curvas analisadas, o melhor ajuste foi obtido pela distribuição Weibull, seguido pelas distribuições α - μ , Rice, Nakagami- m e Rayleigh, corroborando a exatidão da extração dos dados da referência mencionada.

É discutível que a distribuição α - μ possa ter alcançado um desempenho menos satisfatório do que a Weibull, uma vez que a distribuição Weibull constitui um dos seus casos particulares. Portanto, seu desempenho teria que ser, no mínimo, tão bom quanto. Possivelmente, esse fato ocorreu devido aos estimadores utilizados para obtenção dos respectivos parâmetros das distribuições em [55]. Entretanto, aqui, por coerência, os achados de [55] foram fielmente reproduzidos, ou seja, não foram realizadas novas estimações de parâmetros para as distribuições, uma vez que elas foram extraídas da referência, exatamente como lá se encontravam, com a ajuda do software digitalizador Origin Pro. Na sequência, iniciou-se a busca de parâmetros da distribuição α - η - κ - μ , usando sua parametrização global, que melhor se adequassem à PDF experimental. É informativo mencionar que, na época em que os testes apresentados nesta seção foram realizados, ainda não se conheciam métodos para estimação dos parâmetros correspondentes da nova distribuição. Desta forma, o processo de ajuste foi realizado manualmente com base na tentativa e erro. Para realizar uma busca orientada dos parâmetros, o ponto de partida foi utilizar os parâmetros da distribuição α - μ , obtidos a partir do processo de ajuste apresentado

em [55, Fig. 3], e, então, variando-se os demais parâmetros da distribuição α - η - κ - μ , visando a obtenção de um menor valor de erro NMSE. Por meio deste processo de tentativa e erro, os parâmetros obtidos foram os seguintes: $\alpha = 3.49$, $\eta = 0.12$, $\kappa = 0.6$, $\mu = 0.79$, $p = 0.5$, $q = 0.07$ e $\hat{r} = 10.89$.

A Tabela 3.1 apresenta os resultados de NMSE, em dB, e a estatística KS para cada distribuição avaliada, em que é possível verificar o melhor ajuste em ambos os critérios, destacado em negrito, utilizando-se a distribuição α - η - κ - μ . A Figura 3.2 (a) contrasta a PDF α - η - κ - μ e a distribuição experimental dos dados. Já a Figura 3.2 (b) apresenta todas as distribuições testadas e também a distribuição experimental.

Tabela 3.1 – Resultados de NMSE e estatística KS.

Distribuição	NMSE [dB]	KS (D)
Rayleigh	-11.55	0.1077
Nakagami- m	-19.02	0.0385
Rice	-20.57	0.0348
α - μ	-21.31	0.0286
Weibull	-23.35	0.0109
α-η-κ-μ	-24.07	0.0084

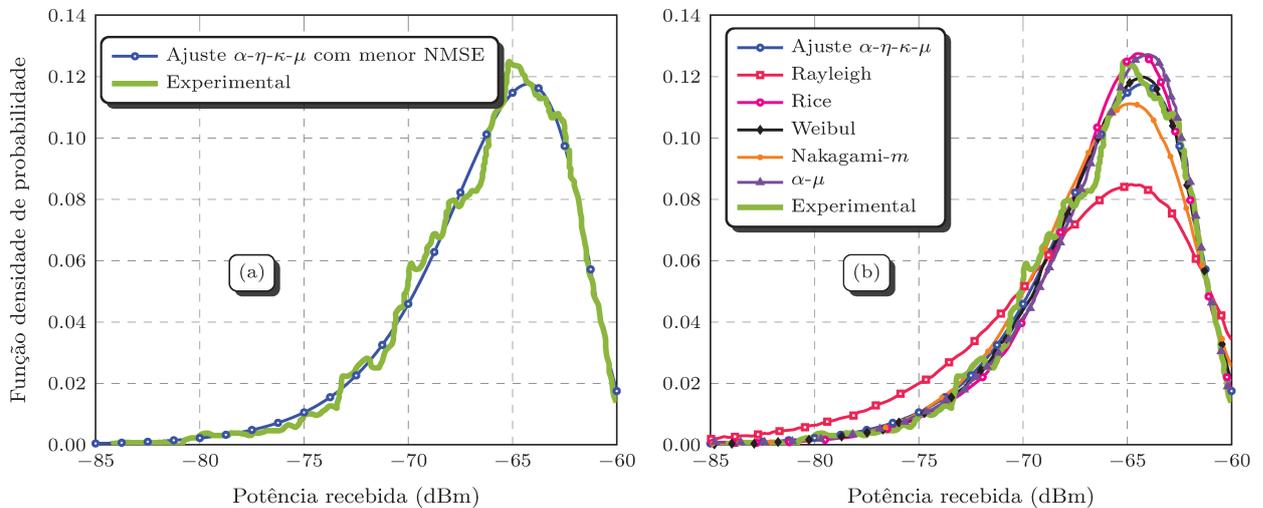


Figura 3.2 – (a) Ajuste de curva da distribuição α - η - κ - μ e (b) comparação de todas as distribuições avaliadas.

Outra característica interessante explorada neste ponto do trabalho foi a não-unimodalidade da PDF da envoltória α - η - κ - μ [19]. A ideia foi ajustar os parâmetros da distribuição α - η - κ - μ não objetivando alcançar um menor valor de erro (NMSE ou KS), mas sim ter a PDF α - η - κ - μ rastreando a tendência do gráfico experimental em regiões específicas. A Figura 3.3 mostra dois ajustes, obtidos com parâmetros apresentados na Tabela 3.2, na tentativa de se reproduzir mais fielmente o sutil efeito bimodal presente na PDF experimental.

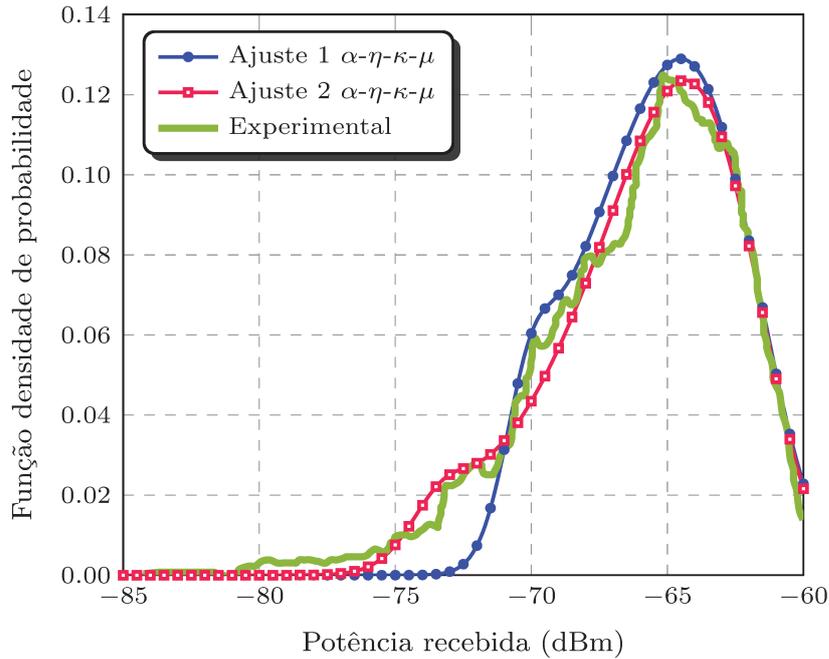


Figura 3.3 – Ajuste de curva da distribuição α - η - κ - μ explorando efeitos não-unimodais.

Tabela 3.2 – Parâmetros de ajuste α - η - κ - μ para obtenção dos efeitos não-unimodais.

Ajuste	α	η	κ	μ	p	q	\hat{r}
Ajuste 1	1.96	14	7.9	1.88	0.23	0.19	10.5
Ajuste 2	2	12	9	2.3	0.16	0.59	10.3

Novamente, vale ressaltar que o objetivo desta análise não foi encontrar o melhor desempenho em termos de ajuste, mas sim o de conseguir modelar regiões com efeitos não-unimodais, enfatizando a flexibilidade do novo modelo de desvanecimento.

3.3 Aplicação do modelo α - η - κ - μ em 28 GHz

Campanhas de medições em 28 GHz em condições externas de LoS e nLoS foram reportadas em [56]. As distribuições Rice e Rayleigh foram testadas e, em ambos os casos, LoS e nLoS, a distribuição Rice obteve o melhor ajuste. A descrição detalhada das medições realizadas pode ser encontrada em [56].

Novamente aproveitando dados disponíveis na literatura, as medições realizadas em [56] foram utilizadas aqui para investigar a adequação do uso da distribuição de desvanecimento da envoltória α - η - κ - μ em 28 GHz. As análises de aderência investigadas nesta parte do trabalho fizeram uso dos dados extraídos cuidadosamente das CDFs apresentadas na referência [56, Fig.6], em que o nível do sinal em relação à média é dado em uma escala logarítmica [dB].

Após a cuidadosa extração dos dados com o software digitalizador Origin Pro, procedeu-se com a estimação da métrica KS modificado para as diversas curvas das distribuições Rayleigh e Rice, apresentadas em [56, Fig. 6]. Nossas conclusões também coincidiram com as dos autores de [56, Fig. 6], em que, para as curvas apresentadas, o melhor ajuste foi dado pela distribuição Rice de fatores $K = 6$ dB e $K = 5.43$ dB para os Cenários LoS e nLoS, respectivamente. Na sequência, a tarefa foi a de encontrar um conjunto de parâmetros da distribuição α - η - κ - μ , para cada cenário, que produzissem curvas que melhor se adequassem aos dados experimentais extraídos da referência. Mais uma vez, esse processo foi realizado por meio de ajustes manuais, mas não de forma exaustiva. De fato, tendo encontrado o primeiro conjunto de parâmetros satisfazendo a condição de melhor ajuste, o processo de busca foi interrompido. A Tabela 3.3 apresenta os resultados de KS modificado para a distribuição que obteve o melhor resultado de ajuste em [56] e também para a distribuição α - η - κ - μ ajustada manualmente. Em negrito, estão destacados os valores de KS modificado calculados utilizando-se a distribuição α - η - κ - μ . Os parâmetros da distribuição α - η - κ - μ para os dois ajustes realizados estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Resultado do KS modificado em Cenários LoS e nLoS.

Distribuição	KS Modificado	
	LoS	nLoS
Rice	0.45	0.67
α-η-κ-μ	0.21	0.29

Tabela 3.4 – Parâmetros α - η - κ - μ para obtenção do menor valor de KS modificado em Cenários de LoS e nLoS.

Ajuste	α	η	κ	μ	p	q	\hat{r}
LoS	2.2	73	5.7	1.01	1.05	1	1
nLoS	2.545	0.006	2.5	1.98	1.5	1.05	1

A Figura. 3.4 contrasta as CDFs teóricas (α - η - κ - μ e Rice) e a CDF experimental. Em particular, a Figura 3.4 (a) apresenta as curvas do Cenário LoS e a Figura 3.4 (b) do Cenário nLoS. Pela análise das figuras é possível notar como a distribuição α - η - κ - μ produz um excelente ajuste em ambos os casos, conseguindo acompanhar a tendência da CDF experimental, mesmo nas regiões em que o desvanecimento é mais severo, ou seja, para menores valores de amplitude. Além disso, os valores de KS modificado alcançados com a distribuição α - η - κ - μ são bem menores que aqueles obtidos com a distribuição Rice, enfatizando a sua melhor qualidade de ajuste.

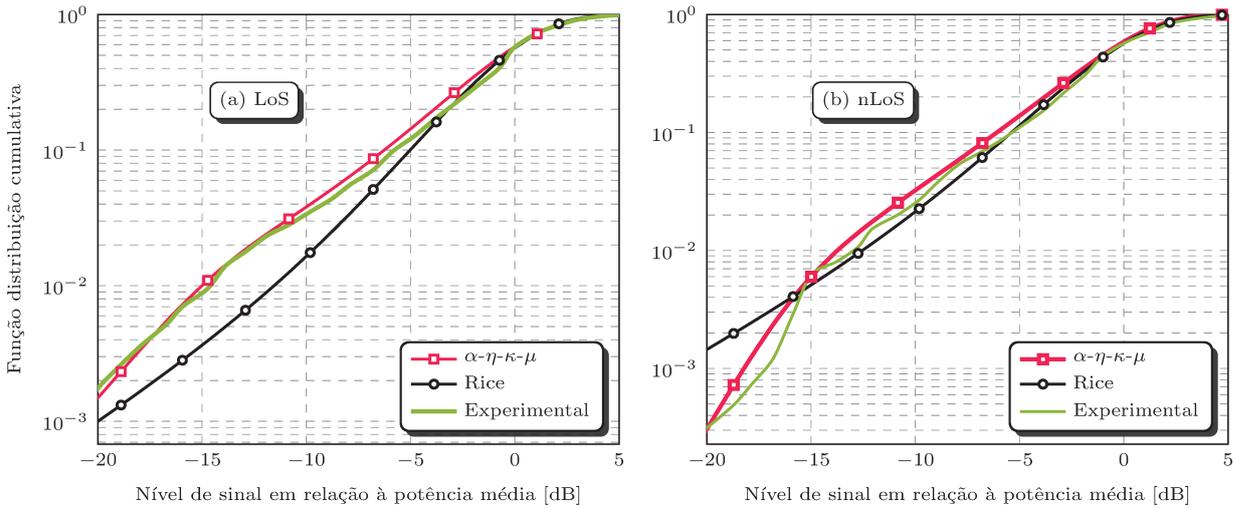


Figura 3.4 – Ajuste de curvas da distribuição α - η - κ - μ explorando o menor valor de KS modificado em (a) Cenário LoS e (b) Cenário nLoS.

3.4 Comentários

Claramente, por intermédio das figuras e dos resultados de ajustes apresentados neste capítulo, pode-se constatar que o modelo de desvanecimento α - η - κ - μ produz um melhor ajuste, em termos de aderência aos dados empíricos, se comparado às demais distribuições mencionadas. Vale lembrar que seria possível encontrar ajustes ainda melhores que os relatados nessa parte do trabalho, pois, conforme comentado, o processo de busca de parâmetros esteve longe de ter sido exaustivo. Desta forma, é possível sustentar que o modelo α - η - κ - μ é muito flexível e abrangente, sendo uma ferramenta altamente útil, que permite a modelagem de alguns cenários que os modelos de desvanecimento convencionais podem não ser capazes de representar com fidelidade. É claro que, idealmente, seria interessante a utilização de métodos formais e objetivos para estimação dos parâmetros da distribuição. No entanto, na época em que os testes foram realizados, desconhecia-se qualquer método capaz de realizar a estimação de todos os parâmetros do modelo α - η - κ - μ , partindo-se então para os ajustes utilizando o processo de tentativa e erro, o que não desqualifica de forma alguma os resultados e conclusões apresentados neste capítulo. Na parte final do trabalho de doutorado, funções eficientes para estimação dos parâmetros de uma determinada distribuição personalizada, disponíveis no software MATLAB[®], vieram a ser conhecidas e utilizadas no processo de estimação de parâmetros da distribuição α - η - κ - μ , evitando assim a necessidade do ajuste manual.

É importante enfatizar que, embora algumas aplicações em ondas milimétricas tenham sido escolhidas como forma de motivação para aprofundar o estudo do processo de desvanecimento α - η - κ - μ , tal modelo é geral o suficiente para torná-lo aplicável a qualquer outro cenário de desvanecimento em uma vasta faixa de frequências.

4 Estatísticas de Ordem Superior do Modelo Complexo α - η - κ - μ

As estatísticas de ordem superior do modelo de desvanecimento α - η - κ - μ abordadas neste capítulo são aquelas relacionadas com a derivada temporal das componentes do sinal. O desenvolvimento é iniciado com o cálculo da distribuição conjunta de X , \dot{X} , Y e \dot{Y} , na qual o ponto significa a derivada temporal da variável em questão. Na sequência, é realizada uma transformação de variáveis para obtenção da distribuição conjunta de R , \dot{R} , Θ e $\dot{\Theta}$. O objetivo é a obtenção de várias distribuições conjuntas de combinações das variáveis anteriores, com o foco na dedução de importantes métricas de desvanecimento, denominadas: (i) taxa de cruzamento de nível no domínio do tempo (LCR_t); (ii) tempo médio de desvanecimento (AFD_t); e (iii) taxa de cruzamento de fase no domínio do tempo (PCR_t).

4.1 A PDF de \dot{Z}

As componentes em fase e em quadratura do sinal, X e Y , segundo o modelo de desvanecimento α - η - κ - μ , seguem a distribuição apresentada em (2.2), com o correspondente modelo físico dado por (2.1). Conforme mostrado em [19], a distribuição de potência do processo de quadratura, Z , do modelo α - η - κ - μ é idêntica à distribuição de potência de uma distribuição κ - μ com parâmetros $\kappa = \lambda_z^2 / (\mu_z \sigma_z^2)$ e $\mu = \mu_z / 2$. Desta forma, o referido processo de quadratura toma a forma de uma distribuição κ - μ com os respectivos parâmetros. Em [25], tal processo foi minuciosamente investigado. Então, recorrendo às descobertas de [25], considera-se que Z e \dot{Z} são processos independentes, com a PDF de \dot{Z} sendo uma variável aleatória Gaussiana de média zero, cuja variância é definida como $\sigma_{\dot{z}}^2 = -\sigma_z^2 \ddot{\psi}(0)$. Então,

$$f_{\dot{z}}(\dot{z}) = \frac{1}{\sqrt{-2\pi\sigma_z^2\ddot{\psi}(0)}} \exp\left(-\frac{\dot{z}^2}{2\sigma_z^2\ddot{\psi}(0)}\right), \quad (4.1)$$

na qual $\psi(\tau)$ é a correlação em função do tempo τ e $\ddot{\psi}(0)$ é sua derivada temporal segunda em $\tau = 0$. É bem estabelecido que as condições (an)isotrópicas têm impacto direto no coeficiente de correlação de um processo. Assim sendo, o modelo desenvolvido neta tese atende a qualquer densidade espectral de potência Doppler (DPSD - do inglês, *Doppler Power Spectral Density*), simétrica ou assimétrica. Em particular, para o caso isotrópico, ou seja, DPSD simétrica, o bem conhecido modelo de Clarke, $\psi(\tau) = J_0(2\pi f_z \tau)$, em que $J_0(\cdot)$ é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero e f_z é o máximo desvio

Doppler. Assim, $\ddot{\psi}(0) = -2\pi^2 f_z^2$. Por questões de simplicidade, explora-se aqui o caso isotrópico, sabendo que o foco do trabalho está nas estatísticas de ordem superior do sinal e não em como a condição de (an)isotropia das ondas espalhadas o afeta. Note, entretanto, que qualquer DPSD (ou, equivalentemente, modelo (an)isotrópico) pode ser incorporado diretamente no modelo proposto, bastando para isso que o máximo desvio Doppler seja substituído nas expressões por $f_z = (-\ddot{\psi}(0)/(2\pi^2))^{1/2}$.

4.2 A PDF conjunta de X, \dot{X}, Y, \dot{Y}

Devido aos fatos anteriormente expostos sobre os processos Z e \dot{Z} , nessa parte do trabalho também considera-se que X, \dot{X}, Y, \dot{Y} são conjuntamente independentes. Então, $f_{X,\dot{X},Y,\dot{Y}}(x, \dot{x}, y, \dot{y}) = f_X(x)f_{\dot{X}}(\dot{x})f_Y(y)f_{\dot{Y}}(\dot{y})$. Conforme mencionado, as PDFs $f_X(x)$ e $f_Y(y)$, de X e Y , seguem a PDF de Z , apresentada em (2.2), com os respectivos parâmetros $(\mu_x, \sigma_x, \lambda_x)$ e $(\mu_y, \sigma_y, \lambda_y)$. Desta forma, as PDFs $f_{\dot{X}}(\dot{x})$ e $f_{\dot{Y}}(\dot{y})$, de \dot{X} e \dot{Y} , seguem aquela PDF de \dot{Z} , mostrada em (4.1), com os respectivos parâmetros $\sigma_x^2 = 2\pi^2 f_x^2 \sigma_x^2$ e $\sigma_y^2 = 2\pi^2 f_y^2 \sigma_y^2$. Assim, a distribuição conjunta final é encontrada como

$$\begin{aligned}
 f_{X,\dot{X},Y,\dot{Y}}(x, \dot{x}, y, \dot{y}) &= \frac{|x|^{\frac{\mu_x}{2}} |y|^{\frac{\mu_y}{2}} |\lambda_x|^{1-\frac{\mu_x}{2}} |\lambda_y|^{1-\frac{\mu_y}{2}}}{8\pi\sigma_x^2\sigma_y^2\dot{\sigma}_x\dot{\sigma}_y} \\
 &\times \exp\left(-\frac{(x-\lambda_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{\dot{x}^2}{2\dot{\sigma}_x^2}\right) \exp\left(-\frac{(y-\lambda_y)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{\dot{y}^2}{2\dot{\sigma}_y^2}\right) \\
 &\times I_{\frac{\mu_x}{2}-1}\left(\frac{|x\lambda_x|}{\sigma_x^2}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{x\lambda_x}{\sigma_x^2}\right) I_{\frac{\mu_y}{2}-1}\left(\frac{|y\lambda_y|}{\sigma_y^2}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{y\lambda_y}{\sigma_y^2}\right).
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

4.3 A PDF conjunta de $R, \dot{R}, \Theta, \dot{\Theta}$

Uma vez que R e Θ são, respectivamente, a envoltória e a fase do sinal, e \dot{R} e $\dot{\Theta}$ representam suas derivadas temporais, conforme definido anteriormente, a PDF conjunta $f_{R,\dot{R},\Theta,\dot{\Theta}}(r, \dot{r}, \theta, \dot{\theta})$ pode ser obtida por meio de uma transformação de variáveis, das coordenadas cartesianas (X, \dot{X}, Y, \dot{Y}) para as coordenadas polares $(R, \dot{R}, \Theta, \dot{\Theta})$. Assim, $f_{R,\dot{R},\Theta,\dot{\Theta}}(r, \dot{r}, \theta, \dot{\theta}) = |J|f_X(x)f_{\dot{X}}(\dot{x})f_Y(y)f_{\dot{Y}}(\dot{y})$, em que J representa a transformação Jacobiana. Recordando que $X = R^{\frac{\alpha}{2}} \cos(\theta)$ e $Y = R^{\frac{\alpha}{2}} \sin(\theta)$. Portanto, $\dot{X} = \frac{\alpha}{2} R^{\frac{\alpha}{2}-1} \dot{R} \cos(\theta) - R^{\frac{\alpha}{2}} \dot{\theta} \sin(\theta)$ e $\dot{Y} = \frac{\alpha}{2} R^{\frac{\alpha}{2}-1} \dot{R} \sin(\theta) + R^{\frac{\alpha}{2}} \dot{\theta} \cos(\theta)$. Então, $|J| = (\alpha^2/4)r^{2\alpha-2}$. Agora, realizando as manipulações algébricas necessárias, o resultado da PDF conjunta, na Parametrização-0 (Raw), fica dada por

$$\begin{aligned}
 f_{R,\dot{R},\Theta,\dot{\Theta}}(r,\dot{r},\theta,\dot{\theta}) &= \frac{\alpha^2 |\lambda_x|^{(1-\frac{\mu_x}{2})} |\lambda_y|^{(1-\frac{\mu_y}{2})} |\cos(\theta)|^{\frac{\mu_x}{2}} |\sen(\theta)|^{\frac{\mu_y}{2}} r^{-2+\alpha+\alpha(1+\frac{\mu_x+\mu_y}{4})}}{64\pi^3 \sigma_x^3 \sigma_y^3 f_x f_y \exp\left(\left(\frac{\lambda_x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{\lambda_y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right)} \\
 &\times I_{\frac{\mu_x}{2}-1}\left(\frac{r^{\frac{\alpha}{2}} |\lambda_x \cos(\theta)|}{\sigma_x^2}\right) I_{\frac{\mu_y}{2}-1}\left(\frac{r^{\frac{\alpha}{2}} |\lambda_y \sen(\theta)|}{\sigma_y^2}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{r^{\frac{\alpha}{2}} \lambda_x \cos(\theta)}{\sigma_x^2}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{r^{\frac{\alpha}{2}} \lambda_y \sen(\theta)}{\sigma_y^2}\right) \\
 &\times \exp\left(-\frac{\left(r^{\frac{\alpha}{2}} \dot{\theta} \cos(\theta) + \frac{r}{2}^{\frac{\alpha}{2}-1} \dot{r} \alpha \sen(\theta)\right)^2}{4f_y^2 \pi^2 \sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{\left(\frac{r}{2}^{\frac{\alpha}{2}-1} \dot{r} \alpha \cos(\theta) - r^{\frac{\alpha}{2}} \dot{\theta} \sen(\theta)\right)^2}{4f_x^2 \pi^2 \sigma_x^2}\right) \\
 &\times \exp\left(r^{\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{\lambda_x \cos(\theta)}{\sigma_x^2} + \frac{\lambda_y \sen(\theta)}{\sigma_y^2}\right)\right) \exp\left(\frac{r^\alpha}{2} - \left(\frac{\cos^2(\theta)}{\sigma_x^2} + \frac{\sen^2(\theta)}{\sigma_y^2}\right)\right). \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

Convertendo a expressão anterior para a Parametrização-2 (Global) chega-se em

$$\begin{aligned}
 f_{R,\dot{R},\Theta,\dot{\Theta}}(r,\dot{r},\theta,\dot{\theta}) &= \frac{\alpha^2 (1+\eta)^2 (1+\kappa)^2 \mu^2 p (1+d) r^{-2+\frac{1}{2}\alpha(4+\mu)} \hat{r}^{-2\alpha} \left(\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}\right)^{\frac{1}{2}\left(1-\frac{\mu}{1+p}\right)}}{32d(1+p)^2 \pi^3 f^2 \eta \sqrt{\frac{(1+p)\hat{r}^\alpha}{(1+\eta)(1+\kappa)\mu}} \sqrt{\frac{(1+p)\hat{r}^\alpha \eta}{p(1+\eta)(1+\kappa)\mu}}} \\
 &\times |\cos(\theta)|^{\frac{p\mu}{1+p}} |\sen(\theta)|^{\frac{\mu}{1+p}} \exp\left(-\frac{(1+pq)(1+\eta)\kappa\mu}{(1+p)(1+q\eta)}\right) \left(\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}\right)^{\frac{1}{2}\left(1-\frac{p\mu}{1+p}\right)} \\
 &\times \exp\left(-\frac{(1+d)^2 \hat{r}^{-\alpha} (1+\eta)(1+\kappa)\mu \left(r^{\frac{\alpha}{2}} \dot{\theta} \cos(\theta) + \frac{1}{2} r^{-1+\frac{\alpha}{2}} \dot{r} \alpha \sen(\theta)\right)^2}{8f^2(1+p)\pi^2}\right) \\
 &\times \exp\left(-\frac{(1+d)^2 p \hat{r}^{-\alpha} (1+\eta)(1+\kappa)\mu \left(\frac{1}{2} r^{-1+\frac{\alpha}{2}} \dot{r} \alpha \cos(\theta) - r^{\frac{\alpha}{2}} \dot{\theta} \sen(\theta)\right)^2}{8d^2 f^2(1+p)\pi^2 \eta}\right) \\
 &\times \exp\left(\frac{\left(2p\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \cos(\theta) + 2\eta\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \sen(\theta) - r^{\frac{\alpha}{2}} (p \cos^2(\theta) + \eta \sen^2(\theta))\right)}{r^{\frac{\alpha}{2}} \hat{r}^{-\alpha} (1+\eta)(1+\kappa)\mu}}\right) \\
 &\times I_{\frac{\mu}{1+p}-1}\left(\frac{\mu\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}} |\sen(\theta)|}{\frac{1+p}{2r^{\frac{\alpha}{2}} \hat{r}^{-\alpha} (1+\eta)(1+\kappa)}}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}} (1+\kappa)\mu \cos(\theta)}{\frac{(1+p)\eta}{2pr^{\frac{\alpha}{2}} \hat{r}^{-\alpha} (1+\eta)}}\right) \\
 &\times I_{\frac{p\mu}{1+p}-1}\left(\frac{\mu\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}} |\cos(\theta)|}{\frac{(1+p)\eta}{2pr^{\frac{\alpha}{2}} \hat{r}^{-\alpha} (1+\eta)(1+\kappa)}}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}} (1+\kappa)\mu \sen(\theta)}{\frac{1+p}{2r^{\frac{\alpha}{2}} \hat{r}^{-\alpha} (1+\eta)}}\right). \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

4.4 A PDF conjunta de R , \dot{R} , Θ

A PDF conjunta de R , \dot{R} e Θ é calculada pela integração de (4.3) em relação a $\dot{\Theta}$. O resultado do cálculo anterior na Parametrização-0 e na Parametrização-2 está apresentado, respectivamente, nas seguintes expressões:

$$\begin{aligned}
 f_{R,\hat{R},\Theta}(r, \dot{r}, \theta) &= \frac{r^{-2+\frac{\alpha}{4}(\mu_x+\mu_y+8)}\alpha^2|\lambda_x|^{(1-\frac{\mu_x}{2})}|\lambda_y|^{(1-\frac{\mu_y}{2})}|\cos(\theta)|^{\frac{\mu_x}{2}}|\sin(\theta)|^{\frac{\mu_y}{2}}}{32\pi^{\frac{3}{2}}\sigma_x^2\sigma_y^2\sqrt{r^\alpha(f_x^2\sigma_x^2\cos^2(\theta)+f_y^2\sigma_y^2\sin^2(\theta))}} \\
 &\times \exp\left(\frac{r^{\alpha/2}\lambda_x\cos(\theta)}{\sigma_x^2}+\frac{r^{\alpha/2}\lambda_y\sin(\theta)}{\sigma_y^2}\right)\exp\left(-\frac{r^{\alpha-2}\dot{r}^2\alpha^2\cos^2(\theta)}{16\pi^2f_x^2\sigma_x^2}-\frac{r^{\alpha-2}\dot{r}^2\alpha^2\sin^2(\theta)}{16\pi^2f_y^2\sigma_y^2}\right) \\
 &\times \exp\left(-\frac{r^\alpha\cos^2(\theta)}{2\sigma_x^2}-\frac{r^\alpha\sin^2(\theta)}{2\sigma_y^2}\right)\exp\left(-\frac{r^{2\alpha}\dot{r}^2\alpha^2\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)}{2\pi^2(4f_x^2r^{\alpha+2}\sigma_x^2\cos^2(\theta)+4f_y^2r^{\alpha+2}\sigma_y^2\sin^2(\theta))}\right) \\
 &\times \exp\left(\frac{f_x^2r^{2\alpha}\dot{r}^2\alpha^2\sigma_x^2\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)}{4\pi^2f_y^2\sigma_y^2(4f_x^2r^{\alpha+2}\sigma_x^2\cos^2(\theta)+4f_y^2r^{\alpha+2}\sigma_y^2\sin^2(\theta))}\right)I_{\frac{\mu_x}{2}-1}\left(\frac{r^{\alpha/2}|\lambda_x\cos(\theta)|}{\sigma_x^2}\right) \\
 &\times \exp\left(\frac{f_y^2r^{2\alpha}\dot{r}^2\alpha^2\sigma_y^2\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)}{4\pi^2f_x^2\sigma_x^2(4f_x^2r^{\alpha+2}\sigma_x^2\cos^2(\theta)+4f_y^2r^{\alpha+2}\sigma_y^2\sin^2(\theta))}\right)I_{\frac{\mu_y}{2}-1}\left(\frac{r^{\alpha/2}|\lambda_y\sin(\theta)|}{\sigma_y^2}\right) \\
 &\times \exp\left(-\frac{\lambda_x^2}{2\sigma_x^2}-\frac{\lambda_y^2}{2\sigma_y^2}\right)\operatorname{sech}\left(\frac{r^{\alpha/2}\lambda_x\cos(\theta)}{\sigma_x^2}\right)\operatorname{sech}\left(\frac{r^{\alpha/2}\lambda_y\sin(\theta)}{\sigma_y^2}\right) \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{R,\hat{R},\Theta}(r, \dot{r}, \theta) &= \frac{\alpha^2(1+\eta)^2(1+\kappa)^2\mu^2p(1+d)r^{-2+\frac{1}{2}\alpha(4+\mu)}\hat{r}^{-2\alpha}\left(\frac{\hat{r}^\alpha\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}\right)^{\frac{1}{2}(1-\frac{\mu}{1+p})}}{8\sqrt{2}(1+p)^2\pi^{\frac{3}{2}}\eta f\sqrt{\frac{(1+p)\hat{r}^\alpha}{(1+\eta)(1+\kappa)\mu}}\sqrt{\frac{(1+p)\hat{r}^\alpha\eta}{p(1+\eta)(1+\kappa)\mu}}} \\
 &\times \exp\left(-\frac{(1+pq)(1+\eta)\kappa\mu}{(1+p)(1+q\eta)}\right)\frac{|\cos(\theta)|^{\frac{p\mu}{1+p}}|\sin(\theta)|^{\frac{\mu}{1+p}}}{\sqrt{\frac{r^\alpha\hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)\mu(d^2\eta\cos^2(\theta)+p\sin^2(\theta))}{(1+p)\eta}}}\left(\frac{q\hat{r}^\alpha\eta\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}\right)^{\frac{1}{2}(1-\frac{p\mu}{1+p})} \\
 &\times \exp\left(\frac{2r^{\frac{\alpha}{2}}\hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)\mu\left(p\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha\eta\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}}\cos(\theta)+\eta\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}}\sin(\theta)\right)}{(1+p)\eta}\right) \\
 &\times \exp\left(-\frac{\mu(p\cos^2(\theta)+\eta\sin^2(\theta))}{\frac{(1+p)\eta}{r^\alpha\hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)}}\right)\exp\left(-\frac{(1+d)^2pr^{-2+\alpha}\hat{r}^{-\alpha}\dot{r}^2\alpha^2(1+\eta)(1+\kappa)\mu}{32d^2f^2(1+p)\pi^2(\eta\cos^2(\theta)+p\sin^2(\theta))}\right) \\
 &\times I_{\frac{p\mu}{1+p}-1}\left(\frac{\mu\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha\eta\kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}}|\cos(\theta)|}{\frac{(1+p)\eta}{2pr^{\frac{\alpha}{2}}\hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)}}\right)\operatorname{sech}\left(\frac{2pr^{\frac{\alpha}{2}}\hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha\eta\kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}}(1+\kappa)\mu\cos(\theta)}{(1+p)\eta}\right) \\
 &\times I_{\frac{\mu}{1+p}-1}\left(\frac{\mu\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha\kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}}|\sin(\theta)|}{\frac{1+p}{2r^{\frac{\alpha}{2}}\hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)}}\right)\operatorname{sech}\left(\frac{2r^{\frac{\alpha}{2}}\hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha\kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}}(1+\kappa)\mu\sin(\theta)}{1+p}\right) \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

4.5 A PDF conjunta de R , Θ , $\hat{\Theta}$

Similarmente, a PDF conjunta de R , Θ e $\hat{\Theta}$ é calculada pela integração de (4.3) em relação a \hat{R} . Assim, a PDF conjunta em questão pode ser expressa como

$$\begin{aligned}
 f_{R,\Theta,\dot{\Theta}}(r, \theta, \dot{\theta}) &= \frac{r^{-2+\alpha+\alpha(1+\frac{\mu_x+\mu_y}{4})} \alpha^2 |\lambda_x|^{(1-\frac{\mu_x}{2})} |\lambda_y|^{(1-\frac{\mu_y}{2})} |\cos(\theta)|^{\frac{\mu_x}{2}} |\sin(\theta)|^{\frac{\mu_y}{2}}}{8\sqrt{2}\pi^{\frac{3}{2}} \sigma_x^2 \sigma_y^2 \sqrt{r^{\alpha-2} \alpha^2 (f_x^2 \sigma_x^2 + f_y^2 \sigma_y^2 + (f_y^2 \sigma_y^2 - f_x^2 \sigma_x^2) \cos(2\theta))}} \\
 &\times \exp\left(-\frac{\lambda_x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{\lambda_y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(r^{\alpha/2} \left(\frac{\lambda_x \cos(\theta)}{\sigma_x^2} + \frac{\lambda_y \sin(\theta)}{\sigma_y^2}\right)\right) \exp\left(\frac{r^\alpha}{2} \left(-\frac{\cos^2(\theta)}{\sigma_x^2} - \frac{\sin^2(\theta)}{\sigma_y^2}\right)\right) \\
 &\times \exp\left(-\frac{r^\alpha \dot{\theta}^2}{4\pi^2 (f_y^2 \sigma_y^2 \cos^2(\theta) + f_x^2 \sigma_x^2 \sin^2(\theta))}\right) I_{\frac{\mu_x}{2}-1} \left(\frac{r^{\alpha/2} |\lambda_x \cos(\theta)|}{\sigma_x^2}\right) I_{\frac{\mu_y}{2}-1} \left(\frac{r^{\alpha/2} |\lambda_y \sin(\theta)|}{\sigma_y^2}\right) \\
 &\times \operatorname{sech}\left(\frac{r^{\alpha/2} \lambda_x \cos(\theta)}{\sigma_x^2}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{r^{\alpha/2} \lambda_y \sin(\theta)}{\sigma_y^2}\right), \tag{4.7}
 \end{aligned}$$

que convertida para sua parametrização Global fica dada por

$$\begin{aligned}
 f_{R,\Theta,\dot{\Theta}}(r, \theta, \dot{\theta}) &= \frac{pr^{-2+\frac{1}{2}\alpha(4+\mu)} \hat{r}^{-2\alpha} \alpha^2 (1+d)(1+\eta)^2 (1+\kappa)^2 \mu^2 \left(\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}\right)^{\frac{1}{2}(1-\frac{\mu}{1+p})}}{4(1+p)^2 \pi^{\frac{3}{2}} \eta f \sqrt{\frac{(1+p)\hat{r}^\alpha}{(1+\eta)(1+\kappa)\mu}} \sqrt{\frac{(1+p)\hat{r}^\alpha \eta}{p(1+\eta)(1+\kappa)\mu}}} \\
 &\times \exp\left(-\frac{(1+pq)(1+\eta)\kappa\mu}{(1+p)(1+q\eta)}\right) \frac{|\cos(\theta)|^{\frac{p\mu}{1+p}} |\sin(\theta)|^{\frac{\mu}{1+p}}}{\sqrt{\frac{r^{-2+\alpha}\hat{r}^{-\alpha}\alpha^2(1+\eta)(1+\kappa)\mu(p+d^2\eta+(p-d^2\eta)\cos(2\theta))}{(1+p)\eta}}} \\
 &\times \exp\left(\frac{\mu \left(p\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \cos(\theta) + \eta\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \sin(\theta)\right)}{\frac{(1+p)\eta}{2r^{\frac{\alpha}{2}} \hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)}}\right) \left(\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}\right)^{\frac{1}{2}(1-\frac{p\mu}{1+p})} \\
 &\times \exp\left(-\frac{(1+d)^2 p r^\alpha \hat{r}^{-\alpha} (1+\eta) \dot{\theta}^2 (1+\kappa) \mu}{8f^2(1+p)\pi^2 (p\cos^2(\theta) + d^2\eta\sin^2(\theta))}\right) \exp\left(-\frac{\mu(p\cos^2(\theta) + \eta\sin^2(\theta))}{\frac{(1+p)\eta}{r^\alpha \hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)}}\right) \\
 &\times I_{\frac{\mu}{1+p}-1} \left(\frac{\mu\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}} |\sin(\theta)|}{\frac{1+p}{2r^{\frac{\alpha}{2}} \hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)}}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}} (1+\kappa) \mu \sin(\theta)}{\frac{1+p}{2r^{\frac{\alpha}{2}} \hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)}}\right) \\
 &\times I_{\frac{p\mu}{1+p}-1} \left(\frac{\mu\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}} |\cos(\theta)|}{\frac{(1+p)\eta}{2pr^{\frac{\alpha}{2}} \hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)}}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{(1+q\eta)(1+\kappa)}} (1+\kappa) \mu \cos(\theta)}{\frac{(1+p)\eta}{2pr^{\frac{\alpha}{2}} \hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)}}\right). \tag{4.8}
 \end{aligned}$$

4.6 A PDF conjunta de R, Θ

A PDF conjunta de R e Θ pode ser calculada pela integração de (4.5) em relação a \dot{R} ou (4.7) em relação a $\dot{\Theta}$, da mesma forma que realizado anteriormente. Isto leva às expressões (2.4) (Parametrização-0) e (2.5) (Parametrização-2), já apresentadas no Capítulo 2.

4.7 Outras PDFs conjuntas e marginais

Todas as PDFs marginais e conjuntas derivadas de (4.3), tais como $f_{\dot{R}}(\dot{r})$, $f_{\dot{\Theta}}(\dot{\theta})$ e $f_{\dot{R},\dot{\Theta}}(\dot{r},\dot{\theta})$ são encontradas por intermédio de integrações apropriadas. Infelizmente, as integrações com relação a Θ ou R parecem problemáticas, não produzindo expressões fechadas, sendo assim, as requeridas PDFs foram deixadas em sua forma integral, conforme apresentado na sequência:

$$f_{\dot{R}}(\dot{r}) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f_{R,\dot{R},\theta}(r, \dot{r}, \theta) d\theta dr, \quad (4.9)$$

$$f_{\dot{\Theta}}(\dot{\theta}) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f_{R,\Theta,\dot{\Theta}}(r, \theta, \dot{\theta}) d\theta dr, \quad (4.10)$$

$$f_{\dot{R},\dot{\Theta}}(\dot{r}, \dot{\theta}) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f_{R,\dot{R},\Theta,\dot{\Theta}}(r, \dot{r}, \theta, \dot{\theta}) d\theta dr. \quad (4.11)$$

4.8 Taxa de cruzamento de nível no domínio temporal (LCR_t)

A LCR_t é uma estatística de segunda ordem que fornece o número médio de cruzamentos por segundo, ascendentes (ou descendentes), em relação a um determinado nível [14]. A LCR_t de um processo contínuo é dada por

$$N_R(r) = \int_0^\infty \dot{r} f_{R,\dot{R}}(r, \dot{r}) d\dot{r}. \quad (4.12)$$

O cálculo da LCR_t α - η - κ - μ envolve uma tarefa complicada, pois não há uma expressão na forma fechada de $f_{R,\dot{R}}(r, \dot{r})$. Essa PDF conjunta pode ser expressa como

$$f_{R,\dot{R}}(r, \dot{r}) = \int_0^{2\pi} f_{R,\dot{R},\Theta}(r, \dot{r}, \theta) d\theta. \quad (4.13)$$

Substituindo (4.13) em (4.12) e alterando a ordem de integração, é possível reescrever a LCR_t como

$$N_R(r) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \dot{r} f_{R,\dot{R},\Theta}(r, \dot{r}, \theta) d\dot{r} d\theta. \quad (4.14)$$

Definindo a integral mais interna como sendo a função $N_R(r, \theta)$, tem-se

$$N_R(r, \theta) = \int_0^\infty \dot{r} f_{R,\dot{R},\Theta}(r, \dot{r}, \theta) d\dot{r}. \quad (4.15)$$

É importante notar que $N_R(r, \theta)$ não é a LCR_t , mas sim uma função intermediária criada para tornar o cálculo da métrica em questão mais fácil. Felizmente, é possível resolver a integral em relação a \dot{r} da expressão (4.15). Consequentemente, $N_R(r, \theta)$ é encontrada, de maneira exata, como

$$\begin{aligned}
 N_R(r, \theta) &= \frac{\sqrt{\pi} r^{-\alpha + \frac{\alpha}{4}(8 + \mu_x + \mu_y)} |\lambda_x|^{(1 - \frac{\mu_x}{2})} |\lambda_y|^{(1 - \frac{\mu_y}{2})} |\cos(\theta)|^{\frac{\mu_x}{2}} |\sen(\theta)|^{\frac{\mu_y}{2}}}{4\sigma_x^2 \sigma_y^2 \sqrt{r^\alpha (f_x^2 \sigma_x^2 \cos^2(\theta) + f_y^2 \sigma_y^2 \sen^2(\theta))}} \\
 &\times \exp\left(-\frac{\lambda_y^2 \sigma_x^2 + \lambda_x^2 \sigma_y^2}{2\sigma_x^2 \sigma_y^2}\right) \exp\left(\frac{r^{\frac{\alpha}{2}} (\lambda_x \sigma_y^2 \cos(\theta) + \lambda_y \sigma_x^2 \sen(\theta))}{\sigma_x^2 \sigma_y^2}\right) \\
 &\times \exp\left(-\frac{r^\alpha (\sigma_y^2 \cos^2(\theta) + \sigma_x^2 \sen^2(\theta))}{2\sigma_x^2 \sigma_y^2}\right) (f_x^2 \sigma_x^2 \cos^2(\theta) + f_y^2 \sigma_y^2 \sen^2(\theta)) \\
 &\times I_{\frac{\mu_x}{2}-1}\left(\frac{r^{\frac{\alpha}{2}} |\lambda_x \cos(\theta)|}{\sigma_x^2}\right) I_{\frac{\mu_y}{2}-1}\left(\frac{r^{\frac{\alpha}{2}} |\lambda_y \sen(\theta)|}{\sigma_y^2}\right) \\
 &\times \operatorname{sech}\left(\frac{r^{\frac{\alpha}{2}} \lambda_x \cos(\theta)}{\sigma_x^2}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{r^{\frac{\alpha}{2}} \lambda_y \sen(\theta)}{\sigma_y^2}\right). \tag{4.16}
 \end{aligned}$$

Convertendo (4.16) para sua forma Global chega-se em

$$\begin{aligned}
 N_R(r, \theta) &= \frac{f^4 \sqrt{2\pi} r^{\frac{1}{2}\alpha(2+\mu)} \frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa} \left(\frac{1+p-\mu}{2+2p}\right) \frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa} \left(\frac{1+p-p\mu}{2+2p}\right) |\cos(\theta)|^{\left(\frac{p\mu}{1+p}\right)} |\sen(\theta)|^{\left(\frac{\mu}{1+p}\right)}}{\frac{(1+d)^4 \eta}{d^2 \eta \cos^2(\theta)^2 + p \sen^2(\theta)^2} \left(\frac{f^2(1+p)\hat{r}^\alpha}{(1+d)^2(1+\eta)(1+\kappa)\mu}\right)^{3/2} \sqrt{\frac{r^\alpha (d^2 \eta \cos^2(\theta)^2 + p \sen^2(\theta)^2)}{p}}} \\
 &\times \exp\left(-\frac{\left(-2p\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \cos(\theta) - 2\eta\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \sen(\theta) + r^{\alpha/2} (p \cos^2(\theta)^2 + \eta \sen^2(\theta)^2)\right)}{\frac{\hat{r}^\alpha ((1+\eta)\mu)^{-1} (1+p)\eta(1+q\eta)}{(1+pq)\hat{r}^\alpha \eta \kappa}}\right) \\
 &\times \exp\left(-\frac{\left(-2p\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \cos(\theta) - 2\eta\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \sen(\theta) + r^{\alpha/2} (p \cos^2(\theta)^2 + \eta \sen^2(\theta)^2)\right)}{\frac{\hat{r}^\alpha ((1+\eta)\mu)^{-1} (1+p)\eta(1+q\eta)}{r^{\alpha/2} (1+q\eta)(1+\kappa)}}\right) \\
 &\times I_{\frac{p\mu}{1+p}-1}\left(\frac{\mu\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} |\cos(\theta)|}{\frac{\hat{r}^\alpha ((1+p)\eta)}{2pr^{\alpha/2} (1+\eta)(1+\kappa)}}\right) I_{\frac{\mu}{1+p}-1}\left(\frac{\mu\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} |\sen(\theta)|}{\frac{\hat{r}^\alpha (1+p)}{2r^{\alpha/2} (1+\eta)(1+\kappa)}}\right) \\
 &\times \operatorname{sech}\left(\frac{\sqrt{\frac{q\hat{r}^\alpha \eta \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \mu \cos(\theta)}{\frac{(1+p)\eta}{2pr^{\alpha/2} \hat{r}^{-\alpha} (1+\eta)(1+\kappa)}}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{\sqrt{\frac{\hat{r}^\alpha \kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \mu \sen(\theta)}{\frac{1+p}{2r^{\alpha/2} \hat{r}^{-\alpha} (1+\eta)(1+\kappa)}}\right) \tag{4.17}
 \end{aligned}$$

Agora, a LCR_t pode ser calculada por meio da avaliação numérica de uma única integral própria, ficando dada por

$$N_R(r) = \int_0^{2\pi} N_R(r, \theta) d\theta. \tag{4.18}$$

4.9 Tempo médio de desvanecimento (AFD_t)

O AFD_t da envoltória de um sinal de desvanecimento, $T_R(r)$, é definido como sendo o tempo médio que o sinal passa abaixo de um determinado nível de limiar R [14].

Esta métrica está relacionada com a LCR_t por intermédio da expressão

$$T_R(r) = \frac{F_R(r)}{N_R(r)}, \quad (4.19)$$

em que $F_R(r)$ é a CDF da variável aleatória R . A CDF mencionada pode ser calculada de maneira exata utilizando-se a seguinte integração dupla:

$$F_R(R) = \int_0^R \int_0^{2\pi} f_{R,\Theta}(r, \theta) d\theta dr. \quad (4.20)$$

Ou, alternativamente e de preferência, é possível fazer uso da CDF em sua forma de série infinita, como apresentado em [19, Eq. (26)], isto é,

$$F_R(r) = \frac{r^{\alpha \frac{\mu_x + \mu_y}{2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{k! m_k L_k^{\frac{\mu_x + \mu_y}{2}} \left(\left(\frac{2}{\mu_x + \mu_y} + 1 \right) 2r^\alpha \right)}{\left(\frac{\mu_x + \mu_y}{2} + 1 \right)_k}{2^{\frac{\mu_x + \mu_y}{2} + 1} \Gamma \left(\frac{\mu_x + \mu_y}{2} + 1 \right) \exp \left(\frac{r^\alpha}{2} \right)}, \quad (4.21)$$

em que $\Gamma(\cdot)$ representa a função Gamma [62, Eq. (6.1.1)], $(a)_n$ é o símbolo de Pochhammer [62, Eq. (6.1.22)], e $L_r^p(x) = r! L_r^{p-1}(x)$ é o polinômio generalizado de Laguerre [70, eq. (8.970/1)], com $L_r^{p-1}(x) = \sum_{j=0}^r (-1)^j \Gamma(p+r) x^j / (j!(r-j)!\Gamma(p+j))$. Assim, o AFD_t pode ser resolvido numericamente avaliando-se (4.19), utilizando (4.20) ou (4.21) e, também, (4.18).

4.10 Taxa de cruzamento de fase no domínio temporal (PCR_t)

A PCR_t é, também, uma estatística de segunda ordem, mas que mede o número médio de cruzamentos por segundo, ascendentes (ou descendentes), em relação a uma determinada fase θ [14]. A PCR_t de um processo contínuo é calculada por

$$N_{\Theta}(\theta) = \int_0^{\infty} \dot{\theta} f_{\Theta, \dot{\Theta}}(\theta, \dot{\theta}) d\dot{\theta}. \quad (4.22)$$

Similarmente ao que aconteceu com a LCR_t , o cálculo da PCR_t também é uma tarefa árdua, uma vez que não são conhecidas as expressões na forma fechada de $f_{\Theta, \dot{\Theta}}(\theta, \dot{\theta})$. A PDF conjunta mencionada pode ser expressa por meio da seguinte integral:

$$f_{\Theta, \dot{\Theta}}(\theta, \dot{\theta}) = \int_0^{\infty} f_{R, \Theta, \dot{\Theta}}(r, \theta, \dot{\theta}) dr. \quad (4.23)$$

Substituindo (4.23) em (4.22) e alterando a ordem de integração, similarmente ao passo realizado para alcançar a LCR_t , a PCR_t fica dada por

$$N_{\Theta}(\theta) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \dot{\theta} f_{R, \Theta, \dot{\Theta}}(r, \theta, \dot{\theta}) d\dot{\theta} dr. \quad (4.24)$$

Considerando que a integral mais interna seja denotada como a função $N_{\Theta}(r, \theta)$, assim

$$N_{\Theta}(r, \theta) = \int_0^{\infty} \dot{\theta} f_{R, \Theta, \dot{\Theta}}(r, \theta, \dot{\theta}) d\dot{\theta}. \quad (4.25)$$

Perceba que $N_{\Theta}(r, \theta)$ é uma função auxiliar criada como passo intermediário para a dedução da PCR_t . A integral em (4.25) possui solução fechada. Assim sendo, $N_{\Theta}(r, \theta)$ pode ser encontrada de forma exata como

$$\begin{aligned} N_{\Theta}(r, \theta) &= \frac{\sqrt{\frac{\pi}{2}} \alpha^2 r^{-2+\alpha} \left(1 + \frac{\mu_x}{4} + \frac{\mu_y}{4}\right) |\lambda_x|^{1-\frac{\mu_x}{2}} |\lambda_y|^{1-\frac{\mu_y}{2}} |\cos(\theta)|^{\frac{\mu_x}{2}} |\sin(\theta)|^{\frac{\mu_y}{2}}}{4\sigma_x^2 \sigma_y^2 \sqrt{\alpha^2 r^{-2+\alpha} \left(f_x^2 \sigma_x^2 + f_y^2 \sigma_y^2 + \left(f_y^2 \sigma_y^2 - f_x^2 \sigma_x^2\right) \cos(2\theta)\right)}} \\ &\times \exp\left(-\frac{\lambda_y^2 \sigma_x^2 + \lambda_x^2 \sigma_y^2}{2\sigma_x^2 \sigma_y^2}\right) \exp\left(\frac{2r^{\alpha/2} \left(\lambda_x \sigma_y^2 \cos(\theta) + \lambda_y \sigma_x^2 \sin(\theta)\right)}{2\sigma_x^2 \sigma_y^2}\right) \\ &\times \exp\left(-\frac{r^{\alpha} \left(\sigma_y^2 \cos^2(\theta) + \sigma_x^2 \sin^2(\theta)\right)}{2\sigma_x^2 \sigma_y^2}\right) \left(f_y^2 \sigma_y^2 \cos^2(\theta) + f_x^2 \sigma_x^2 \sin^2(\theta)\right) \\ &\times I_{\frac{\mu_x}{2}-1}\left(\frac{r^{\alpha/2} |\lambda_x \cos(\theta)|}{\sigma_x^2}\right) I_{\frac{\mu_y}{2}-1}\left(\frac{r^{\alpha/2} |\lambda_y \sin(\theta)|}{\sigma_y^2}\right) \\ &\times \operatorname{sech}\left(\frac{r^{\alpha/2} \lambda_x \cos(\theta)}{\sigma_x^2}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{r^{\alpha/2} \lambda_y \sin(\theta)}{\sigma_y^2}\right), \end{aligned} \quad (4.26)$$

que convertida para a sua parametrização Global fica dada por

$$\begin{aligned} N_{\Theta}(r, \theta) &= \frac{f^4 \sqrt{\pi} r^{-2+\alpha} \frac{\alpha^{\frac{\mu}{2}}}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa} \hat{r}^{\alpha\kappa} \frac{\left(\frac{1+p-\mu}{2+2p}\right) q \hat{r}^{\alpha\eta\kappa}}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa} \left(\frac{1+p-p\mu}{2+2p}\right) |\cos(\theta)|^{\frac{p\mu}{1+p}} |\sin(\theta)|^{\frac{\mu}{1+p}}}{\frac{(1+d)^4 \eta}{p \cos(\theta)^2 + d^2 \eta \sin(\theta)^2} \left(\frac{f^2(1+p) \hat{r}^{\alpha}}{(1+d)^2(1+\eta)(1+\kappa)\mu}\right)^{3/2} \sqrt{\frac{r^{-2+\alpha} \alpha^2 (p+d^2\eta+(p-d^2\eta) \cos(2\theta))}{p}}} \\ &\times \exp\left(-\frac{\left(-2p\sqrt{\frac{q \hat{r}^{\alpha\eta\kappa}}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \cos(\theta) - 2\eta\sqrt{\frac{\hat{r}^{\alpha\kappa}}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \sin(\theta) + r^{\alpha/2} (p \cos(\theta)^2 + \eta \sin(\theta)^2)\right)}{\frac{\hat{r}^{\alpha}((1+\eta)\mu)^{-1}(1+p)\eta(1+q\eta)}{(1+pq)\hat{r}^{\alpha\eta\kappa}}}\right) \\ &\times \exp\left(-\frac{\left(-2p\sqrt{\frac{q \hat{r}^{\alpha\eta\kappa}}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \cos(\theta) - 2\eta\sqrt{\frac{\hat{r}^{\alpha\kappa}}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \sin(\theta) + r^{\alpha/2} (p \cos(\theta)^2 + \eta \sin(\theta)^2)\right)}{\frac{\hat{r}^{\alpha}((1+\eta)\mu)^{-1}(1+p)\eta(1+q\eta)}{r^{\alpha/2}(1+q\eta)(1+\kappa)}}}\right) \\ &\times I_{\frac{p\mu}{1+p}-1}\left(\frac{\mu\sqrt{\frac{q \hat{r}^{\alpha\eta\kappa}}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} |\cos(\theta)|}{\frac{\hat{r}^{\alpha}((1+p)\eta)}{2pr^{\alpha/2}(1+\eta)(1+\kappa)}}\right) I_{\frac{\mu}{1+p}-1}\left(\frac{\mu\sqrt{\frac{\hat{r}^{\alpha\kappa}}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} |\sin(\theta)|}{\frac{\hat{r}^{\alpha}(1+p)}{2r^{\alpha/2}\hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)}}\right) \\ &\times \operatorname{sech}\left(\frac{\sqrt{\frac{q \hat{r}^{\alpha\eta\kappa}}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \mu \cos(\theta)}{\frac{(1+p)\eta}{2pr^{\alpha/2}\hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)}}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{\sqrt{\frac{\hat{r}^{\alpha\kappa}}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \mu \sin(\theta)}{\frac{1+p}{2r^{\alpha/2}\hat{r}^{-\alpha}(1+\eta)(1+\kappa)}}\right). \end{aligned} \quad (4.27)$$

Desta forma, a PCR_t pode agora ser solucionada avaliando-se numericamente uma única integral como

$$N_{\Theta}(\theta) = \int_0^{\infty} N_{\Theta}(r, \theta) dr. \quad (4.28)$$

4.11 Gráficos de estatísticas de ordem superior do modelo de desvanecimento α - η - κ - μ

Esta seção apresenta, com propósito ilustrativo, três grupos de gráficos organizados da seguinte forma: (i) taxa de cruzamento de nível $N_R(r)$; (ii) tempo médio de desvanecimento $T_R(r)$ e (iii) taxa de cruzamento de fase $N_\Theta(\theta)$. Em todas as figuras, a seta indica a direção de crescimento do parâmetro que está sendo variado.

A Figura 4.1 apresenta curvas de LCR_t variando os parâmetros α , μ , q e p , mantendo os demais com valores fixos, descritos na legenda de cada figura. Por intermédio da Figura 4.1 é possível perceber que o parâmetro de não linearidade é o que tem um impacto mais significativo no formato das curvas. Quando se transita de $\alpha = 1$ para $\alpha = 2$ observa-se uma grande variação entre as curvas de LCR_t , que se torna menos intensa à medida que α cresce. Os demais parâmetros também têm influência nas curvas, mais notavelmente p , seguido por μ e, então, por q . Conforme esperado, o formato das curvas de LCR_t apresenta semelhança significativa com o das correspondentes PDFs da envoltória $f_R(r)$ apresentadas na Seção 2.3.

A Figura 4.2 mostra curvas de AFD_t variando novamente os parâmetros α , μ , q , e p , mantendo os demais com valores fixos. Como antes, o parâmetro que tem um impacto mais dramático nas curvas é o de não linearidade. Note, por exemplo, na Figura 4.2(a), que a concavidade das curvas é diferente para $\alpha = 1$ e para $\alpha \geq 2$. De fato, isto ocorre uma vez que a distribuição da envoltória para $\alpha < 2$ tem uma cauda com maior peso. Ao se analisar as Figuras 4.2(b), 4.2(c) e 4.2(d), é possível constatar que, depois do parâmetro de não linearidade, o parâmetro p é o que tem maior impacto nas curvas, seguido pelo μ e, por último, por q .

A Figura 4.3 apresenta curvas de PCR_t para os mesmos parâmetros utilizados na geração das Figuras 2.3(c) e 2.3(d) do Capítulo 2, exceto por aqueles exclusivos das estatísticas de ordem superior (f e d), nas quais $f_\Theta(\theta)$ é representada variando p e κ , respectivamente. Pode-se notar que, assim como acontece para o caso da LCR_t com relação à PDF da envoltória, as formas correspondentes das curvas de PCR_t e da PDF da fase são bastante semelhantes. Além disso, embora não seja mostrado aqui, mas conforme observado anteriormente, os comentários relacionados à influência dos parâmetros μ , q e p , citados acima, também se aplicam no caso da PCR_t . Relembrando que a PCR_t é independente do parâmetro α , que, desta forma, é irrelevante para o seu cálculo.

Vale ressaltar que o cálculo das métricas LCR_t em (4.18), AFD_t em (4.19) e PCR_t em (4.28) não impõem nenhuma dificuldade numérica. Em particular, a LCR_t faz o uso de uma única integral própria. Para o AFD_t , o resultado da LCR_t é utilizado em

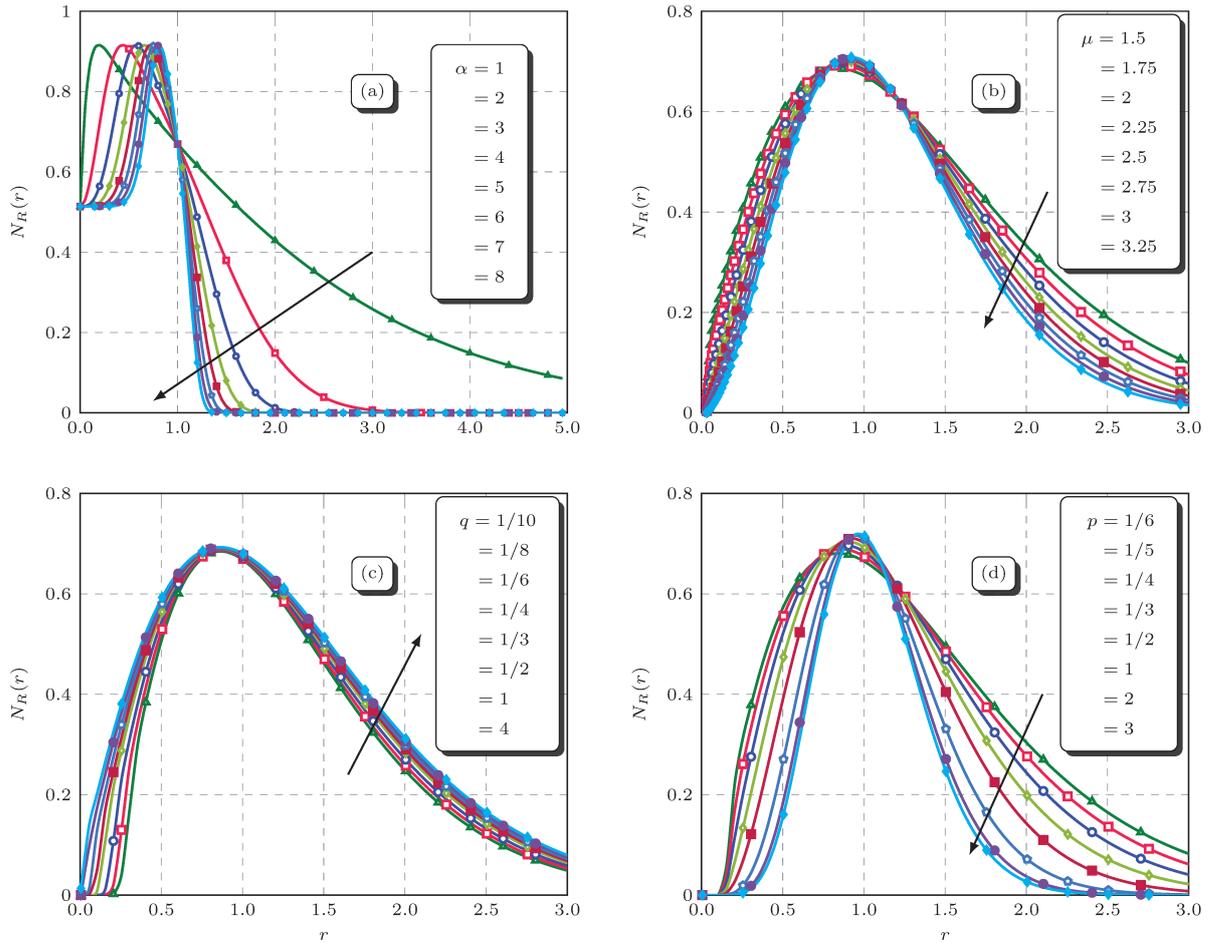


Figura 4.1 – LCR_t variando valores de (a) α ($\eta = 100$, $\kappa = 1$, $\mu = 1/2$, $q = 1/10$ e $p = 5$), (b) μ ($\alpha = 1$, $\eta = 20$, $\kappa = 10$, $q = 1$ e $p = 1/5$), (c) q ($\alpha = 1$, $\eta = 20$, $\kappa = 10$, $\mu = 1.75$ e $p = 1/5$) e (d) p ($\alpha = 1$, $\eta = 20$, $\kappa = 10$, $\mu = 1.75$ e $q = 1/5$) com $\hat{r} = 1$, $f = 1$ e $d = 1$.

conjunto com a CDF da envoltória, que pode ser calculada por meio de uma integral dupla própria ou por meio de expansão em série. Nesse último caso, o número de termos necessários para atingir um erro menor que um valor especificado irá depender dos parâmetros utilizados. Em geral, para um erro máximo de 10^{-5} , o número de termos da série a ser utilizado é em torno de 30. Em relação à PCR_t , novamente apenas uma integração é necessária, neste caso, de fato é necessário realizar o cálculo de uma integral imprópria. Entretanto, novamente, isso não é problema. Tal integração pode ser realizada diretamente por qualquer ferramenta ou software matemático (Mathematica ou MATLAB[®], no nosso caso) ou substituindo o limite superior (infinito) por algum valor finito apropriado. Por meio de testes constatou-se que, substituindo o valor infinito por um valor igual a cinco vezes o valor eficaz da envoltória (limite superior = $5\hat{r}$), o erro incorrido é da ordem de 10^{-10} .

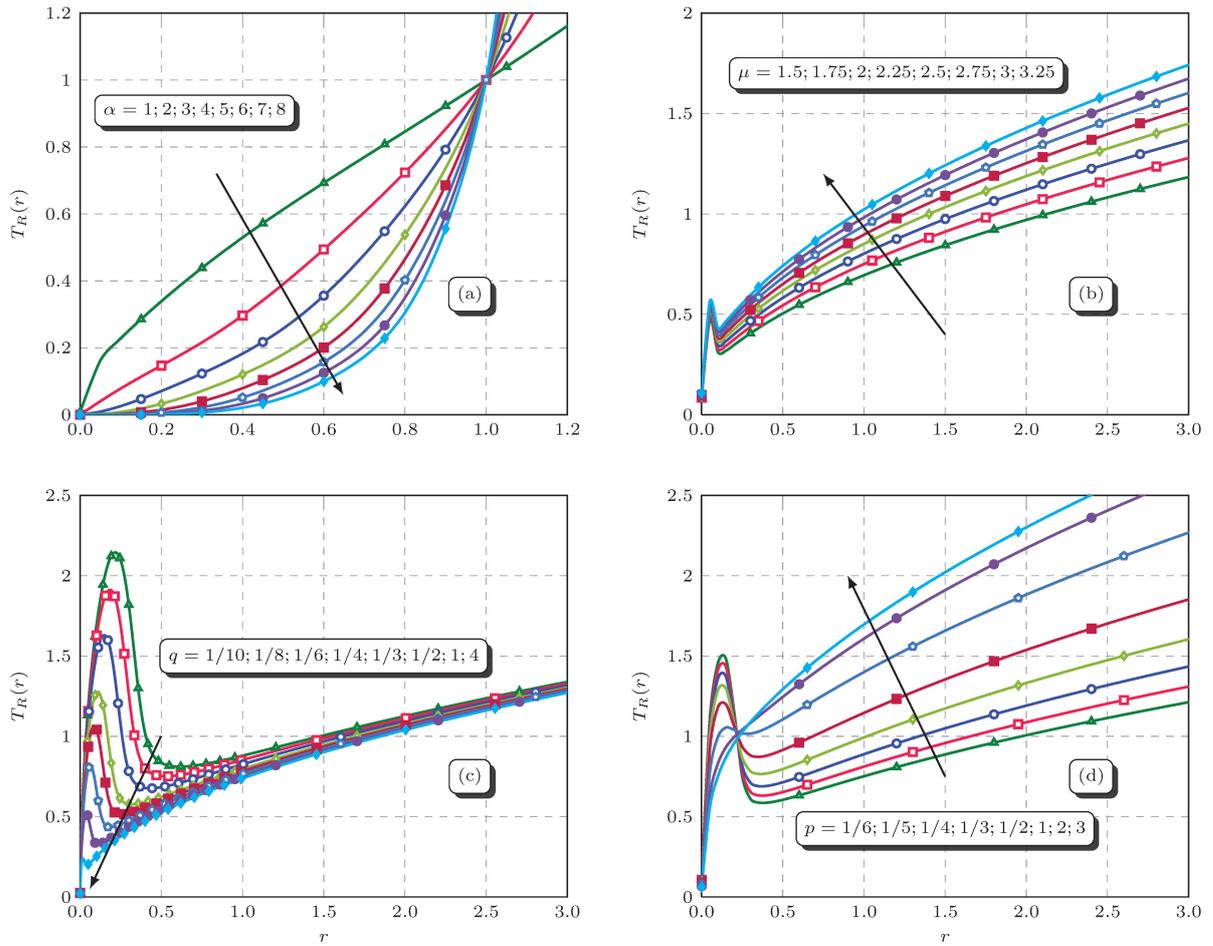


Figura 4.2 – AFD_t variando os valores de (a) α ($\eta = 100$, $\kappa = 1$, $\mu = 1/2$, $q = 1/10$ e $p = 5$), (b) μ ($\alpha = 1$, $\eta = 20$, $\kappa = 10$, $q = 1$ e $p = 1/5$), (c) q ($\alpha = 1$, $\eta = 20$, $\kappa = 10$, $\mu = 1.75$ e $p = 1/5$) e (d) p ($\alpha = 1$, $\eta = 20$, $\kappa = 10$, $\mu = 1.75$ e $q = 1/5$) com $\hat{r} = 1$, $f = 1$ e $d = 1$.

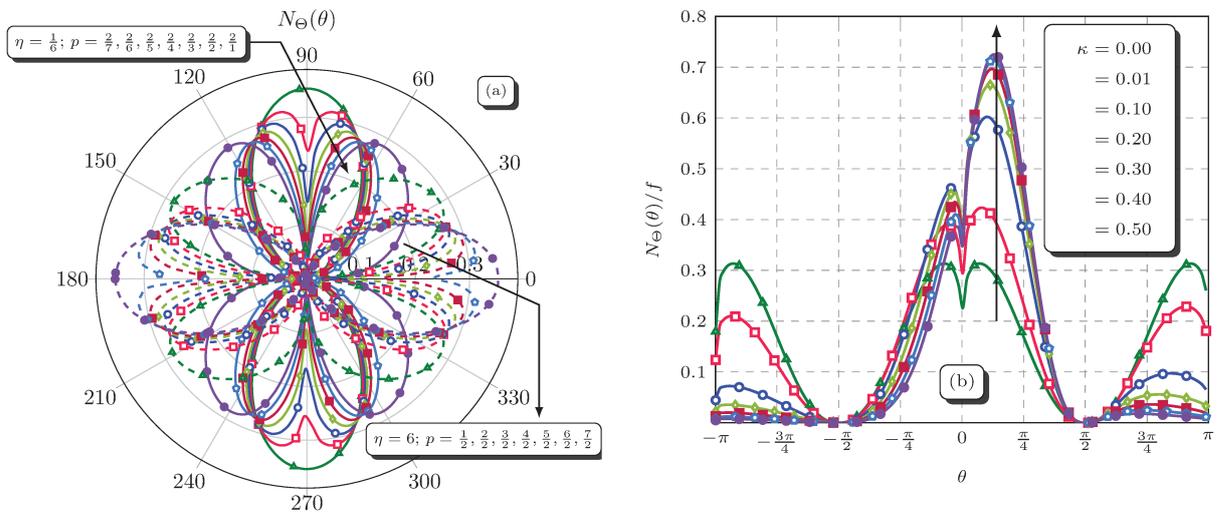


Figura 4.3 – PCR_t variando os valores de (a) p ($\kappa = 0$, $\mu = 2.25$, $q = 1$ e $\eta = 1/6$ ou $\eta = 6$) em coordenadas polares e (b) κ ($\eta = 3$, $\mu = 2.25$, $q = 1$ e $p = 3$) com α e \hat{r} irrelevantes, $f = 1$ e $d = 1$ para ambos os casos.

5 Campanha de Medições e Validações Experimentais

5.1 Ambiente de propagação

As medições de canal apresentadas nesta tese de doutorado foram realizadas em parceria com o instituto de pesquisa iTEAM, da Universidade Politécnica de Valência, na Espanha. As especificações para a condução das medidas foram definidas em conjunto com membros do instituto, que ficaram responsáveis pela suas realizações e pelo posterior envio. De posse das medidas, disponibilizadas pelos membros do instituto, elas foram processadas no software MATLAB[®] para avaliação do desvanecimento de curto prazo nos cenários escolhidos para análise.

O ambiente de medições do laboratório iTEAM é caracterizado pela presença de vários equipamentos de radiofrequência, aparelhos eletrônicos, armários metálicos, mesas de trabalho, dentre outros. Esses elementos interagem com as frentes de onda do sinal transmitido, produzindo mecanismos de reflexão, difração e espalhamento, tornando-o um ambiente bastante rico em multipercursos, quando comparado com outros ambientes internos mais comuns, tais como escritórios ou casas. A Figura 5.1 apresenta uma visão geral do ambiente escolhido para as análises. As dimensões totais do laboratório são de 13.5 m de extensão, 7 m de largura e 2.6 m de altura. Ele está integrado em uma construção moderna, onde tanto o teto quanto o piso são construídos em concreto armado sobre placas de aço, com paredes revestidas de madeira e gesso acartonado.

5.2 Procedimento de medição e configurações do estimador de canal

A função de transferência complexa do canal (CCTF - do inglês, *Complex Channel Transfer Function*), denotada por $H(f)$, foi medida utilizando-se o analisador de rede vetorial (VNA - do inglês, *Vector Network Analyzer*) Keysight N5227A. Este VNA tem 119 dB de faixa dinâmica na banda de frequências alvo. Antenas banda larga, desenvolvidas pela empresa Q-PAR, foram utilizadas tanto na parte de transmissão quanto na de recepção. As antenas em questão têm um padrão de radiação omnidimensional em azimute (plano horizontal), polarização linear e um ganho médio de 5 dBi. Três amplificadores de baixa figura de ruído (LNA - do inglês, *Low Noise Amplifier*), um deles na

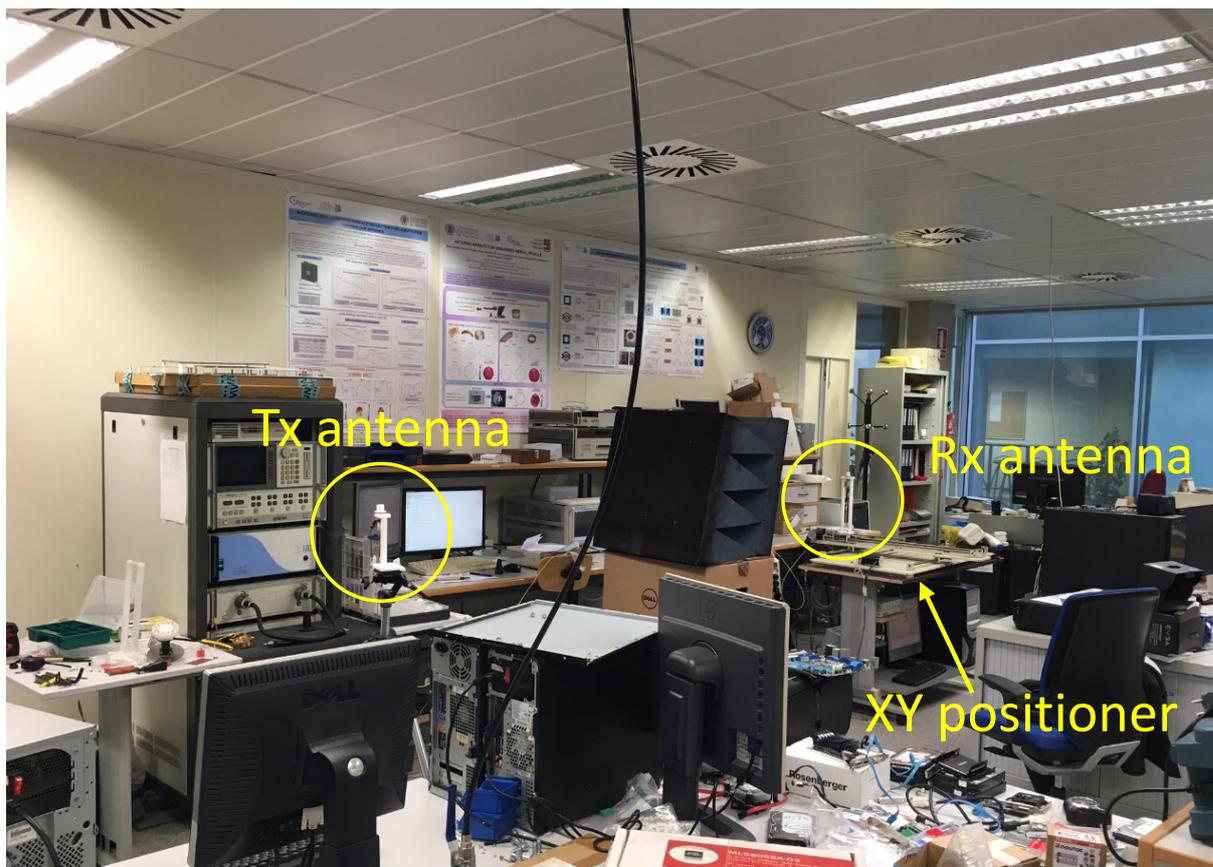


Figura 5.1 – Visão do ambiente de propagação com as antenas de transmissão e recepção.

parte de transmissão e os outros dois na etapa de recepção, desenvolvidos pela empresa HXI Millimeter Wave Products, com ganho médio de 25 dB, também foram utilizados com o objetivo de compensar as perdas por propagação, que na faixa de ondas milimétricas, considerada neste trabalho, são consideravelmente elevadas. A utilização dos LNAs aumentou, portanto, a faixa dinâmica das medições. Adicionalmente, cabos com estabilização de fase e com uma atenuação de 6 dB/m também compuseram o *setup* de medições.

A antena de recepção ficou localizada em um sistema de posicionamento XY automatizado, que implementa uma matriz retangular uniforme (URA - do inglês, *Uniform Rectangular Array*) de dimensões $N \times M$ (15×750). A separação entre os elementos dentro do URA utilizado foi de 1 mm. Tanto o sistema de análise vetorial quanto o sistema de posicionamento automatizado são controlados por um computador pessoal, medindo a CCTF em 55 GHz, 60 GHz e 65 GHz, ou seja, 10 GHz de SPAN e 3 pontos de frequência por traço. Antes de dar início ao procedimento de medições, o *setup* em questão passou por um processo de calibração, em que o principal objetivo foi o de compensar as atenuações e imperfeições do estimador de canal (*channel sounder*). Para reduzir o nível de potência do piso de ruído, a largura de banda do filtro de frequência intermediária utilizado no VNA foi de 100 Hz. A Figura 5.2 apresenta o diagrama esquemático do estimador de

canal utilizado para realização das medições.

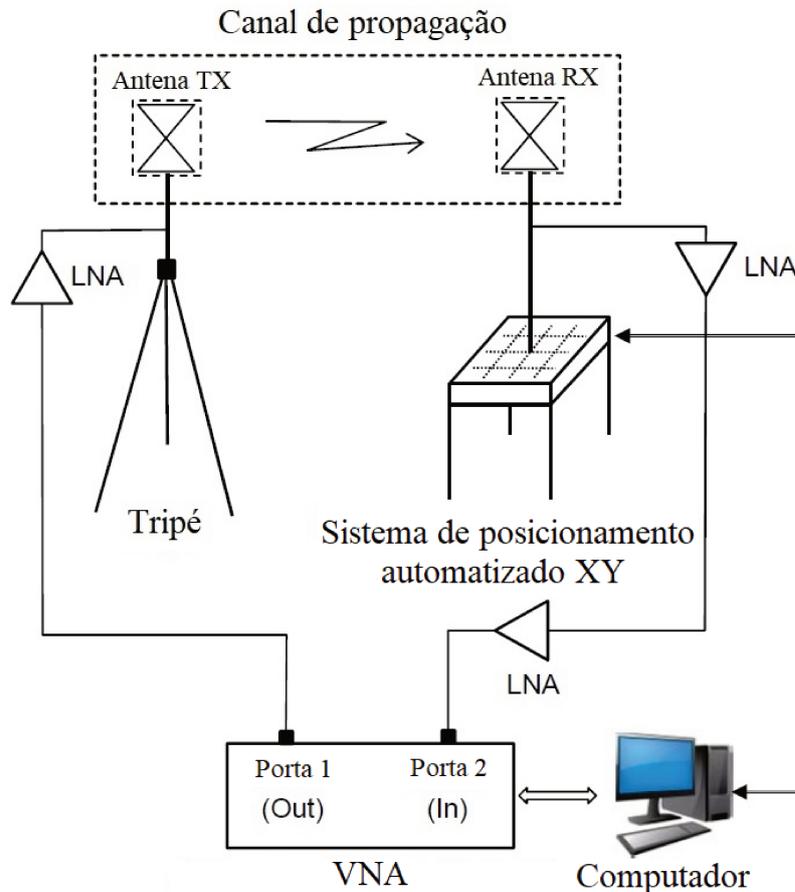


Figura 5.2 – Diagrama do estimador de canal utilizado para as medições.

A antena de transmissão foi montada sobre um tripé. A altura das antenas de transmissão e recepção considerada foi de 1.44 m acima do piso, que corresponde à altura média dos muitos espalhadores que se localizam no ambiente de propagação. Duas posições distintas para a antena de transmissão foram consideradas. Na primeira posição, indicada como Pos1, a distância considerada entre transmissor (tx) e receptor (rx) foi de 3.29 m; já na segunda posição, denotada como Pos2, a distância considerada entre as antenas tx-rx foi de 2.77 m. As medidas do canal foram coletadas utilizando diferentes polarizações e condições de propagação, LoS e nLoS (conseguida obstruindo-se a visada direta com um material absorvente de radiação). Assim, a polarização vertical (V) nas antenas de transmissão e recepção, indicada como VV, e a polarização horizontal (H) na antena de transmissão e vertical na antena de recepção, indicada como HV, foram consideradas. Baseando-se nas condições de propagação, 8 cenários foram definidos. As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam, respectivamente, um resumo das condições nas quais as medidas foram coletadas para cada cenário avaliado e um resumo dos parâmetros utilizados no sistema de medição.

Tabela 5.1 – Características dos cenários de propagação

Cenário	Posição da antena transmitter	Polarização (tx, rx)	Propagação
1	Pos1	HV	LoS
2	Pos1	HV	nLoS
3	Pos1	VV	LoS
4	Pos1	VV	nLoS
5	Pos2	HV	LoS
6	Pos2	HV	nLoS
7	Pos2	VV	LoS
8	Pos2	VV	nLoS

Tabela 5.2 – Parâmetros do sistema de medição

Parâmetros	Valores
Potência saída do VNA	0 dBm
Frequência central do VNA	60 GHz
VNA SPAN	10 GHz
VNA BW	100 Hz
Pontos de frequência por traço	3
Ganho médio das antenas	5 dBi
Ganho dos LNAs	25 dB
Altura antena tx	1.44 m
Altura antena rx	1.44 m
Comprimento total dos cabos	5.5 m
Atenuação dos cabos em 60 GHz	6 dB/m

5.3 Modelos teóricos de desvanecimento considerados nas validações experimentais

5.3.1 Estatística de primeira ordem - função densidade de probabilidade

As distribuições de desvanecimento avaliadas neste capítulo incluem: (i) os modelos mais conhecidos e consolidados, isto é, Rayleigh, Rice e Nakagami- m ; (ii) os já populares modelos generalizados, ou seja, α - μ , η - μ e κ - μ ; e (iii) o modelo mais generalizado e recentemente proposto, denominado α - η - κ - μ , detalhado no Capítulo 2, que abrange todas as distribuições anteriormente mencionadas como seus casos particulares. As expressões das estatísticas de primeira ordem, mais especificamente a PDF da envoltória normalizada, $\rho = R/\sqrt{\mathbb{E}(R^2)}$, dos modelos teóricos considerados aqui são apresentadas a

seguir, por conveniência, utilizando-se os parâmetros globais equivalentes do modelo mais generalizado:

1) Rayleigh

$$f_P(\rho) = 2\rho \exp(-\rho^2) \quad (5.1)$$

2) Rice (com parâmetro κ)

$$f_P(\rho) = 2(\kappa + 1)\rho \exp(-\kappa - (\kappa + 1)\rho^2) I_0\left(2\sqrt{\kappa(1 + \kappa)}\rho\right) \quad (5.2)$$

3) Nakagami- m (com parâmetro μ)

$$f_P(\rho) = \frac{2\mu^\mu \rho^{2\mu-1} \exp(-\mu\rho^2)}{\Gamma(\mu)} \quad (5.3)$$

4) α - μ

$$f_P(\rho) = \frac{\alpha\mu^\mu \rho^{\alpha\mu-1}}{\Gamma(\mu) \exp(\mu\rho^\alpha)} \quad (5.4)$$

5) κ - μ

$$f_P(\rho) = \frac{2\mu(1 + \kappa)^{\frac{\mu+1}{2}} \rho^\mu I_{\mu-1}\left(2\mu\sqrt{\kappa(1 + \kappa)}\rho\right)}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\mu\kappa) \exp(\mu(1 + \kappa)\rho^2)} \quad (5.5)$$

6) η - μ

$$f_P(\rho) = \frac{2\sqrt{\pi}(1 + \eta)^{\mu+\frac{1}{2}} \mu^{\mu+\frac{1}{2}} \rho^{2\mu} I_{\mu-\frac{1}{2}}\left(\frac{\mu(1-\eta)^2 \rho^2}{2\eta}\right)}{\sqrt{\eta}(1 - \eta)^{\mu-\frac{1}{2}} \Gamma(\mu) \exp(\mu(1 + \eta)^2 \rho^2 / (2\eta))} \quad (5.6)$$

7) α - η - κ - μ

$$f_P(\rho) = \int_0^{2\pi} f_{P,\Theta}(\rho, \theta) d\theta \quad (5.7)$$

sendo $f_{P,\Theta}(\rho, \theta)$ dada por

$$\begin{aligned} f_{P,\Theta}(\rho, \theta) &= \frac{\alpha\mu^2 p(\eta + 1)^2 (\kappa + 1)^{\frac{\mu}{2}+1} \rho^{\frac{\alpha}{2}(\mu+2)-1} |\text{sen}(\theta)|^{\frac{\mu}{p+1}} |\cos(\theta)|^{\frac{\mu p}{p+1}}}{2\eta(p + 1)^2 \left(\frac{\kappa}{\eta q + 1}\right)^{\frac{\mu}{2}-1} (\eta q)^{\frac{\mu p}{2(p+1)}-\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{\kappa\mu(\eta+1)(q p + 1)}{(p+1)(\eta q + 1)}\right)} \\ &\times \frac{\exp\left(\frac{2\mu(\eta+1)\cos(\theta-\phi)}{\eta(p+1)} \sqrt{\frac{\eta\kappa(\kappa+1)(\eta+q p^2)}{\eta q + 1}} \rho^{\frac{\alpha}{2}}\right)}{\exp\left(\frac{\mu(\eta+1)(\kappa+1)(\eta \text{sen}^2(\theta) + p \cos^2(\theta))}{\eta(p+1)} \rho^\alpha\right)} \\ &\times \text{sech}\left(\frac{2\mu p(\eta + 1)\cos(\theta)}{\eta(p + 1)} \sqrt{\frac{\eta\kappa q(\kappa + 1)}{\eta q + 1}} \rho^{\frac{\alpha}{2}}\right) \text{sech}\left(\frac{2\mu(\eta + 1)\text{sen}(\theta)}{p + 1} \sqrt{\frac{\kappa(\kappa + 1)}{\eta q + 1}} \rho^{\frac{\alpha}{2}}\right) \\ &\times I_{\frac{\mu}{p+1}-1}\left(\frac{2\mu(\eta + 1)|\text{sen}(\theta)|}{p + 1} \sqrt{\frac{\kappa(\kappa + 1)}{\eta q + 1}} \rho^{\frac{\alpha}{2}}\right) \\ &\times I_{\frac{\mu p}{p+1}-1}\left(\frac{2\mu p(\eta + 1)|\cos(\theta)|}{\eta(p + 1)} \sqrt{\frac{\eta\kappa q(\kappa + 1)}{\eta q + 1}} \rho^{\frac{\alpha}{2}}\right). \end{aligned} \quad (5.8)$$

5.3.2 Estatística de segunda ordem - taxa de cruzamento de nível no domínio espacial

Até este momento, a taxa de cruzamento de nível foi expressa no domínio temporal. Entretanto, embora essa métrica seja usualmente considerada no domínio do tempo, também é possível estender o seu conceito para os domínios espaciais e frequenciais.

A taxa de cruzamento de nível no domínio da frequência (LCR_f - do inglês, *Level Crossing Rate in frequency-domain*) e no domínio espacial (LCR_s) referem-se ao número médio de vezes que o sinal de recepção cruza um determinado nível em um intervalo de frequência ou de espaço, respectivamente [71]. A dedução de tais estatísticas, ao se considerar agora esses novos atributos (frequência e espaço), seguem exatamente a mesma abordagem que aquela realizada para alcançar a expressão de taxa de cruzamento de nível no domínio do tempo. Assim, seguindo o mesmo conceito, mas tendo agora como atributo de cruzamento a distância, em vez do tempo, é possível obter as estatísticas LCR_s , para vários ambientes, nos quais, por conveniência, serão apresentadas também em função da envoltória normalizada ρ . Desta forma, a LCR_s para vários modelos de desvanecimento avaliados neste capítulo fica dada conforme apresentado a seguir:

1) Rayleigh

$$N_{R_s}(\rho) = \frac{\rho \sqrt{-\ddot{\psi}(0)}}{\sqrt{\pi} \exp(\rho^2)} \quad (5.9)$$

2) Rice (com parâmetro κ)

$$N_{R_s}(\rho) = \frac{\rho \sqrt{-\ddot{\psi}(0)(\kappa + 1)} I_0(2\rho \sqrt{\kappa(\kappa + 1)})}{\sqrt{\pi} \exp(\kappa) \exp((\kappa + 1)\rho^2)} \quad (5.10)$$

3) Nakagami- m (com parâmetro μ)

$$N_{R_s}(\rho) = \frac{\rho^{2\mu-1} \mu^{\mu-\frac{1}{2}} \sqrt{-\ddot{\psi}(0)}}{\sqrt{\pi} \Gamma(\mu) \exp(\mu\rho^2)} \quad (5.11)$$

4) α - μ

$$N_{R_s}(\rho) = \frac{\rho^{\alpha(\mu-\frac{1}{2})} \mu^{\mu-\frac{1}{2}} \sqrt{-\ddot{\psi}(0)}}{\sqrt{\pi} \Gamma(\mu) \exp(\mu\rho^\alpha)} \quad (5.12)$$

5) κ - μ

$$N_{R_s}(\rho) = \frac{\sqrt{-\ddot{\psi}(0)} \mu (1 + \kappa)^\mu I_{\mu-1}(2\mu\rho \sqrt{\kappa(1 + \kappa)})}{\rho^\mu \sqrt{\pi \kappa^{\mu-1}} \exp(\mu\kappa) \exp(\mu(1 + \kappa)\rho^2)} \quad (5.13)$$

6) η - μ

$$N_{R_s}(\rho) = \frac{((1+\eta)\mu)^{2\mu-\frac{1}{2}} \rho^{4\mu-1} \sqrt{-\ddot{\psi}(0)}}{\sqrt{2\pi} \eta^\mu 2^{2\mu-2} \Gamma^2(\mu)} \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\text{sen}(2\theta)^{2\mu-1} \sqrt{1 + \eta - (1-\eta) \cos(2\theta)}}{\exp(((1+\eta)^2 + (1-\eta)^2 \cos(2\theta)) \mu \rho^2 / (2\eta))} d\theta \quad (5.14)$$

7) α - η - κ - μ

$$N_{R_s}(\rho) = \int_0^{2\pi} N_{R_s}(\rho, \theta) d\theta, \quad (5.15)$$

em que $N_{R_s}(\rho, \theta)$ é dada por

$$\begin{aligned} N_{R_s}(\rho, \theta) &= \frac{\sqrt{-\ddot{\psi}(0)} \rho^{\frac{1}{2}\alpha(2+\mu)} \left(\frac{\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}\right)^{\frac{1+p-\mu}{2+2p}} \left(\frac{q\eta\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}\right)^{\frac{1+p-p\mu}{2+2p}}}{|\cos(\theta)|^{-\frac{p\mu}{1+p}} |\sin(\theta)|^{-\frac{\mu}{1+p}} \sqrt{\pi}(1+d)^4 \eta \left(\frac{(1+p)}{(1+d)^2(1+\eta)(1+\kappa)\mu}\right)^{3/2}} \\ &\times \frac{\exp\left(\frac{2\rho^{\alpha/2}(1+q\eta)(1+\kappa)p\sqrt{\frac{q\eta\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \cos(\theta) - \rho^\alpha(1+q\eta)(1+\kappa)p \cos(\theta)^2}{((1+\eta)\mu)^{-1}(1+p)\eta(1+q\eta)}\right)}{\exp\left(-\frac{\eta\left(2\rho^{\alpha/2}(1+q\eta)(1+\kappa)\sqrt{\frac{\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \sin(\theta) - (1+p)q\kappa - \rho^\alpha(1+q\eta)(1+\kappa)\sin(\theta)^2\right)}{((1+\eta)\mu)^{-1}(1+p)\eta(1+q\eta)}\right)} \\ &\times I_{\frac{\mu}{1+p}-1} \left(\frac{2\rho^{\alpha/2}(1+\eta)(1+\kappa)\mu\sqrt{\frac{\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} |\sin(\theta)|}{1+p}\right) \frac{(d^2\eta \cos(\theta)^2 + p\sin(\theta)^2)}{\sqrt{\frac{\rho^\alpha(d^2\eta \cos(\theta)^2 + p\sin(\theta)^2)}{p}}} \\ &\times I_{\frac{p\mu}{1+p}-1} \left(\frac{2\rho^{\alpha/2}(1+\eta)(1+\kappa)\mu p\sqrt{\frac{q\eta\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} |\cos(\theta)|}{(1+p)\eta}\right) \\ &\times \operatorname{sech}\left(\frac{2\rho^{\alpha/2}(1+\eta)(1+\kappa)\mu\sqrt{\frac{\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \sin(\theta)}{1+p}\right) \\ &\times \operatorname{sech}\left(\frac{2\rho^{\alpha/2}(1+\eta)(1+\kappa)\mu p\sqrt{\frac{q\eta\kappa}{1+q\eta+\kappa+q\eta\kappa}} \cos(\theta)}{(1+p)\eta}\right). \end{aligned} \quad (5.16)$$

Neste ponto, é necessário realizar as seguintes redefinições para a expressão em (5.16): (i) $\ddot{\psi}(0)$ representa a derivada segunda em relação ao espaço da função de autocorrelação espacial no ponto zero e (ii) d é o parâmetro de desbalanceamento da derivada espacial da função de autocorrelação das componentes em fase e em quadratura. Conseqüentemente, (i) $2(-\ddot{\psi}(0))^{1/2} = (-\ddot{\psi}_x(0))^{1/2} + (-\ddot{\psi}_y(0))^{1/2}$ e (ii) $d = (-\ddot{\psi}_x(0))^{1/2}/(-\ddot{\psi}_y(0))^{1/2}$.

É importante deixar claro que, no Capítulo 4 e também em [22, 72–74], as formulações para a LCR_t foram deduzidas para um ambiente isotrópico e, nesse caso, $\ddot{\psi}(0) = -2\pi^2 f_d^2$. Porém, um ambiente anisotrópico pode ser incorporado diretamente nos modelamentos mencionados, caso a frequência Doppler seja substituída por $f_d = (-\ddot{\psi}(0)/(2\pi^2))^{1/2}$. Enfatiza-se novamente que as expressões de LCR_s foram obtidas tendo em mente que $\ddot{\psi}(0)$ representa a derivada segunda em relação ao espaço da função de autocorrelação espacial no ponto zero.

5.4 Resultados

Nesta seção, a aderência entre as curvas de PDF e LCR_s teóricas, apresentadas na Seção 5.3, e as curvas empíricas, obtidas a partir dos dados coletados na campanha de medição, será avaliada em todos os oito cenários detalhados nas Seções 5.1 e 5.2, para as frequências 55 GHz, 60 GHz e 65 GHz.

Para as análises conduzidas nesta parte do trabalho, os parâmetros dos modelos de desvanecimento Rayleigh, Rice, Nakagami- m , α - μ , κ - μ , η - μ e α - η - κ - μ foram estimados em todos os oito cenários e frequências consideradas nas medições. Existem diversas funções disponíveis no software MATLAB[®] que podem ser utilizadas para o propósito de estimação de parâmetros. Nesse caso, a função do MATLAB[®] denominada `lsqcurvefit`, baseada em um algoritmo de minimização do erro médio quadrático, foi utilizada. O método de otimização utilizado pela função `lsqcurvefit` é denominado Levenberg-Marquardt [75], com método reflexivo de região de confiança [76]. Nesta função, o conjunto de parâmetros estimados da distribuição teórica é aquele que satisfaz a seguinte expressão:

$$\min \left[\sum_{i=1}^N \left(\hat{P}(x_i, p_1, p_2, \dots, p_k) - P_{\text{exp}}(x_i) \right)^2 \right],$$

na qual $\hat{P}(\cdot)$ representa a curva estimada para os modelos teóricos considerados, que em nosso caso pode ser tanto uma PDF quanto uma LCR_s; $P_{\text{exp}}(\cdot)$ representa a curva experimental; x_i é a i -ésima amostra da PDF ou LCR_s; p_1, p_2, \dots, p_k são os parâmetros a serem estimados de cada modelo; k é o número total de parâmetros, que irá variar com a distribuição considerada e N é o número de pontos discretizados das curvas avaliadas, uniformemente distribuídos entre os valores máximos e mínimos dos dados experimentais. Mais detalhes sobre a função `lsqcurvefit` podem ser encontrados em [77].

Para uma comparação justa, o mesmo método de estimação, com a mesma parametrização inicial, foi utilizado para todas as distribuições avaliadas. Tendo estimado os parâmetros de todos os modelos estatísticos sob análise, as métricas NMSE, KS (apenas para análises de PDF) e AIC foram calculadas a fim de encontrar o modelo que melhor se ajusta a cada cenário de medição considerado.

5.4.1 Resultados para as estatísticas de primeira ordem

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os resultados obtidos no processo de estimação de parâmetros das PDFs teóricas e os valores alcançados para as métricas NMSE, KS e AIC em cada um dos 8 cenários e 3 frequências avaliados, totalizando, desta forma, 24 situações analisadas. Nas tabelas, os números destacados em negrito evidenciam o melhor

resultado de ajuste obtido em cada métrica de avaliação. Caso haja empate nos valores das métricas de teste, a distribuição com menor número de parâmetros é destacada como sendo a que apresenta o melhor ajuste.

A partir dos dados disponibilizados nas Tabelas 5.3 e 5.4 é possível verificar que os resultados dos critérios NMSE, KS e AIC nem sempre indicam a mesma distribuição como sendo a que melhor se ajusta aos dados empíricos. Analisando os resultados de uma forma geral, pode-se constatar que, segundo o critério NMSE, a distribuição mais generalizada, ou seja, a distribuição α - η - κ - μ , alcançou o melhor resultado de ajuste em todas as 24 situações avaliadas, o que de certa forma já era esperado, uma vez que a distribuição em questão possui mais parâmetros, englobando todas as demais avaliadas, sendo desta forma mais abrangente e flexível. Por outro lado, segundo o critério KS, a α - η - κ - μ obteve o melhor desempenho em 19 das 24 situações, enquanto que as distribuições α - μ , η - μ e κ - μ ficaram com o melhor ajuste em 5 das 24 situações, restando apenas uma situação na qual uma distribuição convencional foi eleita como sendo a de melhor ajuste (Rayleigh no Cenário 8 - 60 GHz). Pelo terceiro e último critério, o AIC, que penaliza distribuições com maior número de parâmetros, a distribuição α - η - κ - μ obteve o melhor desempenho em 5 das 24 situações, as distribuições α - μ , η - μ e κ - μ em 8 das 24 e os modelos convencionais em 11 das 24.

Analisando especificamente os resultados obtidos em cada situação é possível perceber que nos Cenários 1 e 5 (LoS e HV), apesar de termos uma situação de LoS, os resultados obtidos nas estimações dos parâmetros indicam que praticamente não existem componentes dominantes, inferido pelos baixos valores de κ , o que ocorre devido à diferença de polarização entre as antenas de transmissão (polarização H) e recepção (polarização V). Apesar de existir um caminho direto entre as antenas de tx-rx, nos cenários mencionados, a componente de visada não é captada pela antena de recepção, exatamente pela utilização de uma polarização diferente da de transmissão. Ao se comparar os valores de κ com os dos Cenários 3 e 7 (LoS e VV), nos quais também tem-se condição de LoS, mas agora com combinação de polarização VV, fica evidente o aumento nos valores do parâmetro κ , indicando a forte presença da componente de visada captada pela antena de recepção. Ao se analisar os resultados obtidos para os Cenários 3 e 7 é possível constatar que distribuições capazes de modelar componentes dominantes tiveram resultados mais satisfatórios que aquelas que não possuem essa habilidade, por exemplo, Rayleigh, Nakagami- m e η - μ , o que é natural, uma vez que elas não foram concebidas para este propósito. Perceba, entretanto, que os resultados obtidos pelas distribuições Nakagami- m e η - μ , mesmo em cenários de LoS, não foram tão ruins quanto os da distribuição Rayleigh, uma vez que elas conseguiram emular o efeito da visada com a utilização de um número maior de *clusters* de multipercurso. Nos Cenários 2 (nLoS e HV) e 4 (nLoS e VV), todas as

Tabela 5.3 – Resultados de ajustes de PDF para o Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4.

Cenários	Frequência	Distribuição	$\hat{\alpha}$	$\hat{\eta}$	$\hat{\kappa}$	$\hat{\mu}$	$\hat{\rho}$	\hat{q}	$\hat{\hat{r}}$	NMSE [dB]	KS test		AIC
											D	valor p	
Cenário 1	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	1.00	-28.48	0.01	0.84	-401.33
		Rice	-	-	0.16	-	-	-	≈ 1	-28.54	0.01	0.93	-400.06
		Nakagami- m	-	-	-	1.02	-	-	≈ 1	-28.77	≈ 0	0.99	-402.68
		α - μ	1.94	-	-	1.06	-	-	≈ 1	-28.82	≈ 0	0.99	-401.33
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.01	-	-	≈ 1	-28.77	≈ 0	0.99	-400.68
		η - μ	-	1.50	-	1.02	-	-	1.01	-28.86	≈ 0	0.98	-401.73
		α - η - κ - μ	2.67	4.94	0.21	0.73	1.31	4.99	1.06	-29.13	≈ 0	≈ 1	-396.91
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	0.99	-27.63	0.01	0.51	-399.15
		Rice	-	-	≈ 0	-	-	-	0.99	-27.63	0.01	0.51	-397.15
		Nakagami- m	-	-	-	0.98	-	-	0.99	-27.88	0.01	0.82	-400.06
		α - μ	1.79	-	-	1.15	-	-	0.98	-28.50	0.01	0.93	-405.42
		κ - μ	-	-	≈ 0	0.98	-	-	≈ 1	-27.89	0.01	0.82	-398.06
		η - μ	-	1.92	-	1.01	-	-	1.01	-28.31	0.01	0.86	-403.04
		α - η - κ - μ	1.87	1.26	≈ 0	1.08	1.00	1.49	0.99	-28.50	≈ 0	0.98	-396.62
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	≈ 1	-27.66	0.01	0.62	-395.27
		Rice	-	-	≈ 0	-	-	-	≈ 1	-27.66	0.01	0.62	-393.27
		Nakagami- m	-	-	-	0.98	-	-	≈ 1	-27.79	0.01	0.84	-394.81
		α - μ	1.84	-	-	1.12	-	-	0.99	-28.18	0.01	0.87	-397.27
		κ - μ	-	-	≈ 0	0.99	-	-	0.99	-27.80	0.01	0.83	-392.81
		η - μ	-	1.70	-	1.01	-	-	1.01	-27.98	0.01	0.90	-394.98
		α - η - κ - μ	1.75	1.48	0.25	1.18	1.49	1.46	0.98	-28.22	0.01	0.91	-389.75
Cenário 2	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	≈ 1	-25.49	0.01	0.67	-368.39
		Rice	-	-	≈ 0	-	-	-	≈ 1	-25.49	0.01	0.67	-366.39
		Nakagami- m	-	-	-	0.99	-	-	≈ 1	-25.58	0.01	0.81	-367.43
		α - μ	1.86	-	-	1.10	-	-	0.99	-25.74	0.01	0.87	-367.30
		κ - μ	-	-	≈ 0	0.98	-	-	≈ 1	-25.58	0.01	0.81	-365.43
		η - μ	-	1.61	-	1.01	-	-	1.01	-25.65	0.01	0.93	-366.31
		α - η - κ - μ	1.76	1.07	0.27	1.16	1.05	3.38	0.98	-25.77	0.01	0.91	-359.56
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	0.99	-26.96	0.01	0.15	-388.25
		Rice	-	-	≈ 0	-	-	-	0.99	-26.96	0.01	0.15	-386.25
		Nakagami- m	-	-	-	≈ 1	-	-	0.98	-26.96	0.01	0.15	-386.25
		α - μ	1.78	-	-	1.19	-	-	0.97	-27.59	≈ 0	0.96	-391.52
		κ - μ	-	-	≈ 0	≈ 1	-	-	≈ 1	-26.96	0.01	0.15	-384.25
		η - μ	-	2.23	-	1.05	-	-	≈ 1	-27.91	≈ 0	0.97	-395.19
		α - η - κ - μ	2.28	3.10	0.99	0.83	0.70	1.11	1.03	-28.75	≈ 0	≈ 1	-396.89
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	0.99	-28.22	0.01	0.35	-405.01
		Rice	-	-	≈ 0	-	-	-	0.99	-28.22	0.01	0.35	-403.01
		Nakagami- m	-	-	-	0.97	-	-	0.99	-28.89	0.01	0.79	-410.70
		α - μ	1.91	-	-	1.04	-	-	0.99	-29.03	0.01	0.89	-410.30
		κ - μ	-	-	≈ 0	0.97	-	-	0.99	-28.89	0.01	0.79	-408.69
		η - μ	-	1.60	-	0.99	-	-	≈ 1	-29.06	0.01	0.92	-410.72
		α - η - κ - μ	1.84	1.71	0.23	1.07	0.81	0.10	0.98	-29.10	≈ 0	0.95	-403.15
Cenário 3	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	1.07	-12.48	0.08	≈ 0	-193.23
		Rice	-	-	1.83	-	-	-	1.01	-24.17	0.01	0.16	-325.79
		Nakagami- m	-	-	-	1.59	-	-	1.04	-21.65	0.03	≈ 0	-296.82
		α - μ	3.18	-	-	0.75	-	-	1.08	-24.92	0.01	0.64	-332.50
		κ - μ	-	-	1.50	1.09	-	-	1.01	-24.25	0.01	0.07	-324.70
		η - μ	-	1.01	-	1.58	-	-	1.04	-21.65	0.02	≈ 0	-294.83
		α - η - κ - μ	2.82	1.15	0.42	0.87	1.18	0.10	1.05	-24.94	0.01	0.57	-324.66
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	1.06	-11.82	0.08	≈ 0	-190.88
		Rice	-	-	1.98	-	-	-	≈ 1	-25.03	0.01	0.51	-340.31
		Nakagami- m	-	-	-	1.66	-	-	1.03	-23.18	0.02	≈ 0	-318.99
		α - μ	2.90	-	-	0.90	-	-	1.06	-25.80	0.01	0.83	-347.12
		κ - μ	-	-	1.24	1.23	-	-	1.01	-25.49	0.01	0.23	-343.58
		η - μ	-	1.00	-	1.66	-	-	1.03	-23.18	0.02	≈ 0	-316.99
		α - η - κ - μ	3.06	1.10	1.54	0.73	0.63	1.43	1.06	-26.70	≈ 0	0.99	-349.47
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	1.07	-12.11	0.08	≈ 0	-193.23
		Rice	-	-	1.97	-	-	-	1.01	-29.54	0.01	0.89	-391.77
		Nakagami- m	-	-	-	1.65	-	-	1.03	-23.35	0.02	≈ 0	-320.58
		α - μ	3.13	-	-	0.80	-	-	1.07	-29.11	≈ 0	0.97	-384.83
		κ - μ	-	-	1.90	1.02	-	-	1.01	-29.54	0.01	0.86	-389.84
		η - μ	-	≈ 1	-	1.65	-	-	1.03	-23.35	0.02	≈ 0	-318.58
		α - η - κ - μ	2.10	0.93	1.54	1.03	0.93	2.74	1.01	-29.61	≈ 0	0.96	-382.67
Cenário 4	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	1.01	-24.30	0.01	0.33	-352.40
		Rice	-	-	0.23	-	-	-	≈ 1	-24.42	0.01	0.62	-351.72
		Nakagami- m	-	-	-	1.02	-	-	1.01	-24.39	0.01	0.44	-351.41
		α - μ	2.08	-	-	0.96	-	-	1.01	-24.43	0.01	0.63	-349.91
		κ - μ	-	-	0.22	≈ 1	-	-	≈ 1	-24.41	0.01	0.59	-349.73
		η - μ	-	≈ 1	-	1.02	-	-	1.01	-24.39	0.01	0.44	-349.41
		α - η - κ - μ	3.09	0.80	1.22	0.60	3.04	0.19	1.10	-24.74	0.01	0.62	-345.44
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	1.02	-22.30	0.01	≈ 0	-324.06
		Rice	-	-	0.61	-	-	-	≈ 1	-25.21	0.01	0.84	-355.47
		Nakagami- m	-	-	-	1.09	-	-	1.01	-24.63	0.01	0.19	-348.85
		α - μ	2.32	-	-	0.87	-	-	1.03	-25.25	≈ 0	0.96	-353.88
		κ - μ	-	-	0.54	1.02	-	-	≈ 1	-25.25	≈ 0	0.97	-353.93
		η - μ	-	1.00	-	1.09	-	-	1.02	-24.63	0.01	0.20	-346.85
		α - η - κ - μ	1.97	1.01	0.56	1.03	1.01	1.29	≈ 1	-25.24	≈ 0	0.97	-345.93
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	0.94	-24.43	0.02	≈ 0	-368.74
		Rice	-	-	≈ 0	-	-	-	0.94	-24.43	0.02	≈ 0	-366.78
		Nakagami- m	-	-	-	0.97	-	-	0.94	-24.76	0.02	≈ 0	-370.46
		α - μ	1.62	-	-	1.34	-	-	0.92	-26.00	0.01	0.08	-382.74
		κ - μ	-	-	≈ 0	0.97	-	-	0.94	-24.76	0.02	≈ 0	-368.46
		η - μ	-	2.74	-	1.03	-	-	0.97	-26.32	0.01	0.23	-386.50
		α - η - κ - μ	1.99	1.21	0.18	1.02	0.27	0.10	≈ 1	-26.80	≈ 0	0.98	-383.96

Tabela 5.4 – Resultados de ajustes de PDF para o Cenário 5, Cenário 6, Cenário 7 e Cenário 8.

Cenários	Frequência	Distribuição	$\hat{\alpha}$	$\hat{\eta}$	$\hat{\kappa}$	$\hat{\mu}$	$\hat{\rho}$	\hat{q}	$\hat{\sigma}$	NMSE [dB]	KS test		AIC	
											D	valor p		
Cenário 5	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	≈ 1	-27.72	0.01	0.28	-392.55	
		Rice	-	-	0.17	-	-	-	0.99	-27.80	0.01	0.34	-391.42	
		Nakagami- m	-	-	-	1.02	-	-	-	≈ 1	-28.23	0.01	0.84	-396.42
		α - μ	1.84	-	-	1.15	-	-	-	0.99	-28.58	≈ 0	0.99	-398.45
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.02	-	-	-	≈ 1	-28.23	0.01	0.85	-394.42
		η - μ	-	1.71	-	1.04	-	-	-	≈ 1	-28.46	≈ 0	0.99	-397.13
		α - η - κ - μ	1.79	1.08	0.22	1.20	1.09	2.43	0.98	-28.60	≈ 0	≈ 1	-390.66	
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	≈ 1	-29.60	0.01	0.90	-418.75
		Rice	-	-	0.22	-	-	-	-	≈ 1	-29.90	≈ 0	≈ 0	-420.17
		Nakagami- m	-	-	-	1.01	-	-	-	≈ 1	-29.76	≈ 0	0.94	-418.58
		α - μ	2.12	-	-	0.93	-	-	-	1.01	-30.05	≈ 0	≈ 1	-419.94
		κ - μ	-	-	0.26	0.99	-	-	-	≈ 1	-29.91	≈ 0	≈ 1	-418.35
		η - μ	-	≈ 1	-	1.01	-	-	-	≈ 1	-29.76	≈ 0	0.94	-416.58
		α - η - κ - μ	2.78	1.94	0.44	0.67	0.64	3.15	1.07	-30.76	≈ 0	≈ 1	-420.48	
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	≈ 1	-27.18	0.01	0.65	-388.07
		Rice	-	-	0.18	-	-	-	-	≈ 1	-27.26	0.01	0.82	-387.02
		Nakagami- m	-	-	-	1.01	-	-	-	≈ 1	-27.34	≈ 0	0.98	-387.94
		α - μ	2.00	-	-	1.02	-	-	-	≈ 1	-27.34	≈ 0	0.98	-385.94
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.01	-	-	-	≈ 1	-27.34	≈ 0	0.98	-385.94
		η - μ	-	1.26	-	1.02	-	-	-	≈ 1	-27.35	≈ 0	0.98	-386.03
		α - η - κ - μ	1.95	1.24	0.72	1.01	0.59	1.53	≈ 1	-27.45	≈ 0	0.99	-379.06	
Cenário 6	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	1.01	-26.03	0.01	0.09	-374.00	
		Rice	-	-	0.31	-	-	-	-	1.01	-26.84	0.01	0.66	-378.19
		Nakagami- m	-	-	-	1.01	-	-	-	1.02	-26.37	0.01	0.16	-372.73
		α - μ	2.30	-	-	0.82	-	-	-	1.03	-27.26	≈ 0	0.98	-380.96
		κ - μ	-	-	0.52	0.95	-	-	-	1.00	-27.27	≈ 0	0.98	-381.16
		η - μ	-	1.00	-	1.01	-	-	-	1.02	-26.36	0.01	0.16	-370.73
		α - η - κ - μ	2.04	0.91	0.43	0.93	1.13	2.07	1.00	-27.27	≈ 0	0.99	-373.17	
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	≈ 1	-26.60	0.01	0.42	-381.91
		Rice	-	-	0.26	-	-	-	-	≈ 1	-26.85	0.01	0.74	-382.83
		Nakagami- m	-	-	-	1.02	-	-	-	1.00	-27.00	0.01	0.90	-384.51
		α - μ	2.02	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-27.00	0.01	0.93	-382.62
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.02	-	-	-	≈ 1	-27.00	0.01	0.90	-382.51
		η - μ	-	1.26	-	1.03	-	-	-	≈ 1	-27.01	0.01	0.87	-382.59
		α - η - κ - μ	2.46	2.07	1.06	0.76	0.55	1.64	1.04	-27.70	≈ 0	≈ 1	-382.64	
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	0.98	-14.76	0.06	≈ 0	-250.89
		Rice	-	-	≈ 0	-	-	-	-	0.99	-14.76	0.06	≈ 0	-248.89
		Nakagami- m	-	-	-	0.76	-	-	-	1.01	-23.33	0.01	0.22	-347.56
		α - μ	1.83	-	-	0.86	-	-	-	≈ 1	-23.48	0.01	0.05	-347.37
		κ - μ	-	-	0.10	0.76	-	-	-	1.01	-23.33	0.01	0.23	-345.58
		η - μ	-	1.01	-	0.76	-	-	-	1.01	-23.33	0.01	0.22	-345.55
		α - η - κ - μ	1.68	1.05	0.38	0.95	1.04	0.48	0.98	-23.65	0.01	0.07	-341.21	
Cenário 7	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	1.08	-7.83	0.15	≈ 0	-128.46
		Rice	-	-	3.37	-	-	-	-	1.00	-26.33	≈ 0	0.96	-339.50
		Nakagami- m	-	-	-	2.53	-	-	-	1.02	-23.70	0.02	≈ 0	-309.14
		α - μ	2.98	-	-	1.26	-	-	-	1.04	-26.07	0.01	0.62	-334.43
		κ - μ	-	-	2.82	1.20	-	-	-	1.00	-26.37	0.01	0.91	-337.88
		η - μ	-	≈ 1	-	2.54	-	-	-	1.02	-23.70	0.02	≈ 0	-307.14
		α - η - κ - μ	2.55	0.29	3.21	0.87	0.94	1.26	1.02	-26.45	≈ 0	0.97	-330.81	
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	1.09	-6.58	0.20	≈ 0	-103.60
		Rice	-	-	4.92	-	-	-	-	≈ 1	-27.31	0.01	0.83	-340.25
		Nakagami- m	-	-	-	3.13	-	-	-	1.02	-24.61	0.02	≈ 0	-309.22
		α - μ	2.98	-	-	1.54	-	-	-	1.04	-26.95	0.01	0.50	-334.13
		κ - μ	-	-	3.76	1.21	-	-	-	1.01	-27.33	0.01	0.72	-338.43
		η - μ	-	1.00	-	3.12	-	-	-	1.02	-24.61	0.02	≈ 0	-307.14
		α - η - κ - μ	3.34	0.10	1.61	0.85	0.48	3.84	1.05	-27.76	≈ 0	0.99	-335.51	
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	1.06	-7.92	0.15	≈ 0	-135.81
		Rice	-	-	3.69	-	-	-	-	0.96	-23.84	0.03	≈ 0	-317.02
		Nakagami- m	-	-	-	2.99	-	-	-	0.99	-25.47	0.01	0.01	-335.81
		α - μ	1.95	-	-	2.61	-	-	-	0.99	-25.48	0.01	0.01	-383.89
		κ - μ	-	-	≈ 0	2.50	-	-	-	0.99	-25.47	0.01	0.01	-333.81
		η - μ	-	1.68	-	2.59	-	-	-	0.99	-25.62	0.01	0.05	-335.53
		α - η - κ - μ	2.34	0.92	1.41	1.28	4.98	3.44	1.02	-29.76	≈ 0	0.98	-375.18	
Cenário 8	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	0.85	-1.70	0.29	0.00	-98.67	
		Rice	-	-	≈ 0	-	-	-	-	0.84	-1.70	0.29	0.00	-96.79
		Nakagami- m	-	-	-	0.39	-	-	-	0.88	-7.12	0.08	≈ 0	-159.18
		α - μ	0.28	-	-	9.98	-	-	-	0.50	-10.12	0.10	≈ 0	-191.75
		κ - μ	-	-	≈ 0	0.39	-	-	-	0.89	-7.12	0.08	≈ 0	-157.18
		η - μ	-	≈ 1	-	4.98	-	-	-	0.44	-7.49	0.10	≈ 0	-161.42
		α - η - κ - μ	2.22	0.11	5.50	0.79	8.15	0.10	1.04	-27.92	0.01	0.12	-388.68	
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-27.37	0.01	0.91	-389.45
		Rice	-	-	≈ 0	-	-	-	-	≈ 1	-27.37	0.01	0.91	-387.46
		Nakagami- m	-	-	-	1.00	-	-	-	≈ 1	-27.37	0.01	0.90	-387.46
		α - μ	1.87	-	-	1.10	-	-	-	0.99	-27.58	0.01	0.82	-387.91
		κ - μ	-	-	≈ 0	≈ 1	-	-	-	≈ 1	-27.37	≈ 0	0.90	-385.46
		η - μ	-	1.56	-	1.01	-	-	-	1.01	-27.46	0.01	0.83	-346.85
		α - η - κ - μ	1.79	1.16	0.25	1.16	1.18	1.37	0.99	-27.62	0.01	0.84	-380.27	
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	0.84	-13.84	0.08	≈ 0	-248.85
		Rice	-	-	≈ 0	-	-	-	-	0.85	-13.85	0.08	≈ 0	-246.85
		Nakagami- m	-	-	-	0.78	-	-	-	0.89	-17.98	0.05	≈ 0	-294.37
		α - μ	0.81	-	-	3.26	-	-	-	0.81	-27.43	0.01	0.56	-401.26
		κ - μ	-	-	≈ 0	0.78	-	-	-	0.89	-17.97	0.05	≈ 0	-292.38
		η - μ	-	4.98	-	0.89	-	-	-	0.94	-24.05	0.02	≈ 0	-362.37
		α - η - κ - μ	1.80	0.31	0.66	1.09	2.11	0.71	0.97	-30.63	≈ 0	0.98	-430.12	

distribuições avaliadas atingiram resultados relativamente satisfatórios e próximos, pois todas elas são capazes de modelar cenários de multipercurso sem componente de visada direta. Por sua vez, nos Cenários 6 e 8 (nLoS e HV), na grande maioria das situações avaliadas, todos os modelos testados aderiram bem aos dados empíricos, exceto Rayleigh e Rice em algumas condições específicas. Entretanto, houve um cenário peculiar (Cenário 8 - 55 GHz) em que a única distribuição que foi capaz de ter uma boa aderência com a curva de PDF empírica foi a α - η - κ - μ , o que será explicado um pouco mais adiante.

Com o objetivo de ilustrar o processo de ajuste, a Figura 5.3 mostra as curvas de PDFs teóricas juntamente com a PDF empírica, obtida por meio dos dados coletados no Cenário 7 e na frequência 65 GHz, em função da envoltória normalizada ρ , que é apresentada em dB. Pela análise da Figura 5.3 é possível perceber que, nessa situação específica, com exceção da distribuição Rayleigh, todas as demais distribuições aderiram bem aos dados, o que também pode ser confirmado pelo resultado da métrica NMSE na Tabela 5.4 para a situação avaliada. Neste caso, o pior desempenho foi obtido por Rayleigh (NMSE = -7.92 dB), seguido de Rice (NMSE = -23.84 dB). Em particular, nesse caso, o melhor ajuste segundo a métrica NMSE e KS foi obtido pela distribuição α - η - κ - μ (NMSE = -29.76 dB, $D \approx 0$ e $p = 0.98$). Por outro lado, o melhor resultado segundo a métrica AIC foi alcançado pela distribuição α - μ (AIC = -383.89), o que é um resultado bastante coerente, visto que a última distribuição citada proporciona um ajuste muito bom em termos de erro médio quadrático e utiliza um número bem menor de parâmetros (2 parâmetros) se comparado à distribuição mais generalizada (7 parâmetros).

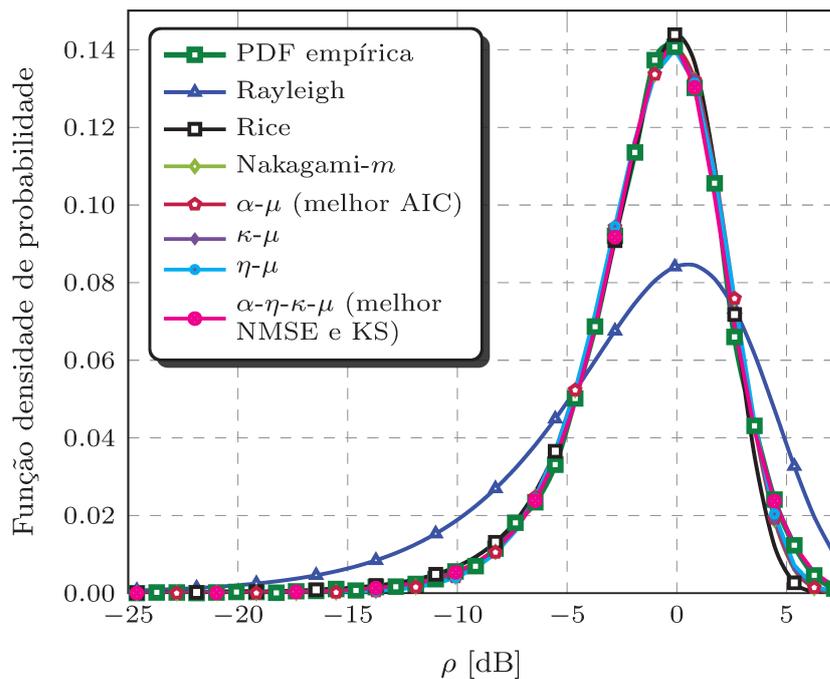


Figura 5.3 – Ajuste de PDF para o Cenário 7 frequência 65 GHz.

A Figura 5.4 apresenta as curvas do processo de ajuste de PDF para um cenário bastante peculiar e excêntrico, Cenário 8 - 55 GHz, já mencionado anteriormente, em que a única distribuição que, segundo a Tabela 5.4, apresentou bons resultados de aderência aos dados empíricos foi a distribuição α - η - κ - μ .

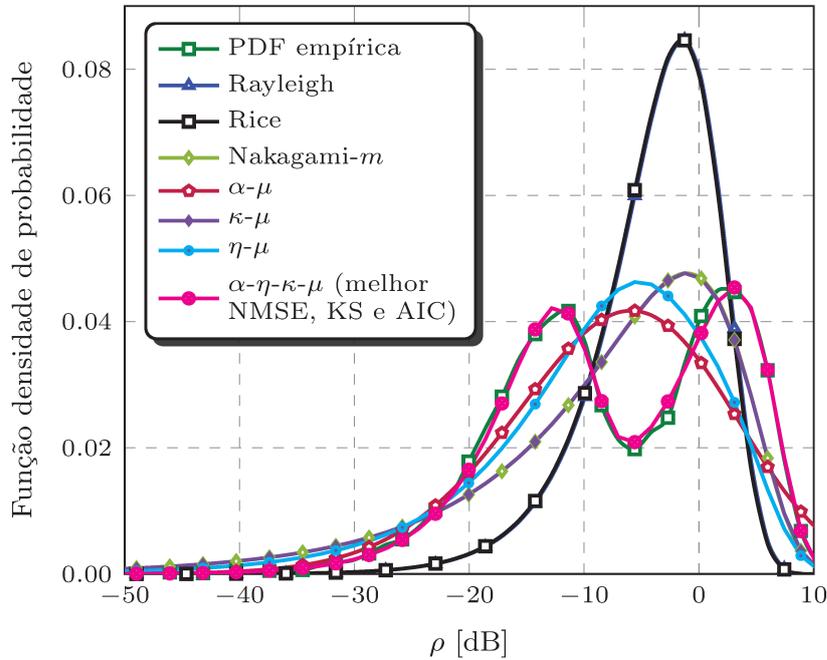


Figura 5.4 – Ajuste de PDF para o Cenário 8 frequência 55 GHz.

Ao analisar a Figura 5.4 é possível confirmar visualmente os dados das métricas de testes fornecidos na Tabela 5.4 para a situação em questão. Percebe-se que a PDF empírica tem um comportamento bimodal, conforme explicado no Capítulo 2, e a única distribuição capaz de reproduzir este efeito é a mais generalizada. Portanto, a única que consegue captar a tendência dos dados e, desta forma, alcançar uma boa aderência. Para o melhor entendimento do que ocorreu nesse cenário singular, a Figura 5.5 também apresenta a PDF de ρ do modelo empírico juntamente com as PDFs dos modelos teóricos, para a mesma situação, mas agora ρ não está mais expresso em dB. Pela figura é possível verificar que, nesta nova escala, a PDF empírica apresenta um pico abrupto próximo de $\rho = 0$, que desaparece para $\rho > 0.5$. A única distribuição que conseguiu captar esse comportamento foi a distribuição α - η - κ - μ , sendo, neste caso, a mais adequada para modelar o ambiente de propagação.

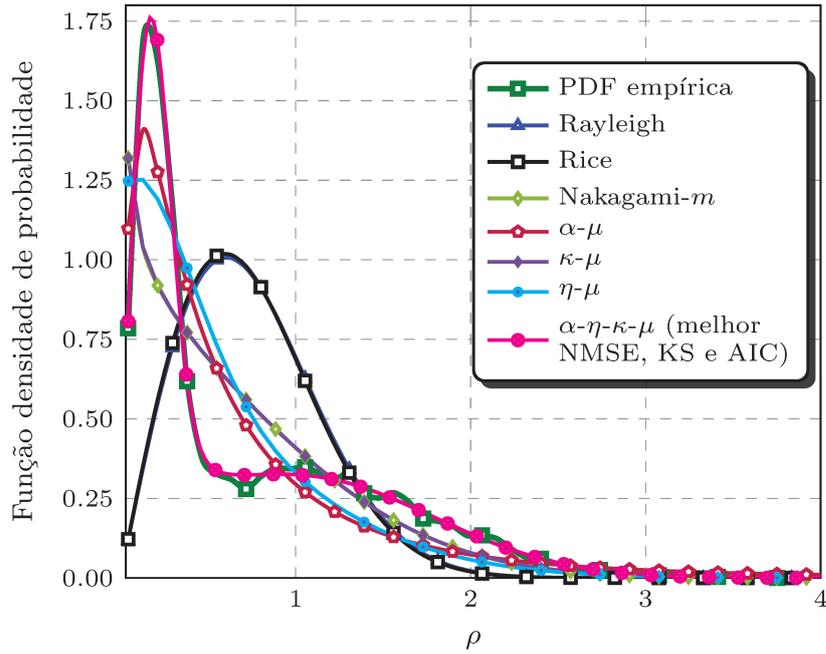


Figura 5.5 – Ajuste de PDF de ρ em escala linear para o Cenário 8 frequência 55 GHz.

Fica nítido pelos resultados da Tabela 5.4 e pelas Figuras 5.4 e 5.5 que, neste tipo de situação, as distribuições convencionais e as generalizadas mais simples não atingem um ajuste satisfatório, pois não possuem a característica de multimodalidade do modelo mais generalizado, não conseguindo proporcionar as mudanças de concavidade exigidas para captar as alterações de tendência da curva empírica. Portanto, caso haja a necessidade de uma representação fiel do canal neste tipo de ambiente de propagação, ou em ambientes semelhantes, o modelo α - η - κ - μ deve, preferencialmente, ser utilizado.

5.4.2 Resultados para as estatísticas de segunda ordem

As Tabelas 5.5 e 5.6 sintetizam o resultado do processo de estimação de parâmetros para cada modelo teórico avaliado, bem como os valores calculados para as métricas NMSE, em dB, e AIC. A partir da análise dos resultados apresentados nas tabelas mencionadas, é possível verificar que em todos os cenários e frequências avaliados o melhor desempenho de ajuste (destacado em negrito) foi alcançado por um dos modelos de desvanecimento mais generalizados (α - μ , κ - μ , η - μ e α - η - κ - μ), destacando-se, desta forma, a grande utilidade de tais modelos na faixa de ondas milimétricas. Conforme já comentado, os resultados dos critérios de GoF, NMSE e AIC nem sempre apontam que o ajuste ótimo foi alcançado por um mesmo modelo de desvanecimento. Enquanto que pelo primeiro critério em 24 das 24 situações avaliadas o melhor ajuste foi alcançado pelo modelo mais geral (α - η - κ - μ), pelo segundo, este mesmo resultado ocorreu em 22 das 24 situações.

Tabela 5.5 – Resultado de ajustes de LCR_s para o Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4.

Cenário	Frequência	Distribuição	$\hat{\alpha}$	$\hat{\eta}$	$\hat{\kappa}$	$\hat{\mu}$	$\hat{\rho}$	\hat{q}	\hat{d}	$\hat{\psi}[\times 10^3]$	NMSE [dB]	AIC	
Cenário 1	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-273.85	-13.37	610.96
		Rice	-	-	1.20	-	-	-	-	-	-674.84	-18.42	472.40
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.28	-	-	-	-	-385.75	-28.00	205.43
		α - μ	1.86	-	-	1.36	-	-	-	-	-382.12	-29.14	175.57
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.28	-	-	-	-	-385.79	-28.00	207.43
		η - μ	-	3.12	-	0.69	-	-	-	-	-368.67	-31.40	112.79
	α - η - κ - μ	1.95	8.11	0.46	1.51	1.63	97.88	0.75	-	-693.27	-39.85	-112.67	
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-334.44	-12.61	576.85
		Rice	-	-	1.29	-	-	-	-	-	-863.21	-17.63	459.92
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.32	-	-	-	-	-488.09	-26.74	243.87
		α - μ	1.87	-	-	1.39	-	-	-	-	-483.75	-27.44	229.05
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.32	-	-	-	-	-487.79	-26.73	245.87
		η - μ	-	0.25	-	0.74	-	-	-	-	-459.24	-33.70	80.60
	α - η - κ - μ	1.97	2.59	1.26	1.46	0.54	2.19	0.62	-	-1229.40	-43.14	-133.12	
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-353.71	-12.23	610.78
		Rice	-	-	1.34	-	-	-	-	-	-940.63	-17.50	183.13
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.33	-	-	-	-	-526.03	-26.66	257.53
		α - μ	1.85	-	-	1.43	-	-	-	-	-520.40	-27.68	234.21
κ - μ		-	-	≈ 0	1.33	-	-	-	-	-526.00	-26.66	259.53	
η - μ		-	0.25	-	0.74	-	-	-	-	-495.76	-32.26	121.57	
α - η - κ - μ	1.73	1.76	0.87	1.77	0.70	98.89	0.44	-	-1437.10	-40.88	-80.90		
Cenário 2	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-303.74	-13.06	564.39
		Rice	-	-	1.22	-	-	-	-	-	-756.32	-17.76	452.87
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.29	-	-	-	-	-433.22	-26.63	238.22
		α - μ	1.88	-	-	1.36	-	-	-	-	-429.60	-27.24	225.54
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.29	-	-	-	-	-433.20	-26.63	240.22
		η - μ	-	0.24	-	0.72	-	-	-	-	-407.09	-33.83	66.27
	α - η - κ - μ	2.06	0.91	0.80	1.44	2.64	≈ 0	1.01	-	-703.81	-39.88	-70.14	
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-373.21	-12.65	669.56
		Rice	-	-	1.28	-	-	-	-	-	-959.83	-17.58	534.32
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.31	-	-	-	-	-543.58	-26.86	275.68
		α - μ	1.88	-	-	1.39	-	-	-	-	-538.80	-27.52	259.29
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.31	-	-	-	-	-543.60	-26.86	277.68
		η - μ	-	0.25	-	0.73	-	-	-	-	-512.39	-36.08	20.80
	α - η - κ - μ	1.81	1.70	0.45	1.61	0.72	28.90	0.66	-	-912.57	-42.24	-140.77	
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-444.20	-11.73	708.29
		Rice	-	-	1.47	-	-	-	-	-	-1259.80	-18.34	529.15
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.37	-	-	-	-	-686.49	-29.16	232.66
		α - μ	1.83	-	-	1.49	-	-	-	-	-678.05	-31.83	161.40
κ - μ		-	-	≈ 0	1.37	-	-	-	-	-686.75	-29.16	234.66	
η - μ		-	2.70	-	0.73	-	-	-	-	-663.73	-32.35	147.11	
α - η - κ - μ	1.58	0.53	0.09	1.81	0.86	1.72	49.33	-	-755.59	-41.48	-93.00		
Cenário 3	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-77.27	-8.68	470.80
		Rice	-	-	2.26	-	-	-	-	-	-311.79	-27.55	85.50
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.70	-	-	-	-	-156.09	-21.74	204.47
		α - μ	1.83	-	-	1.87	-	-	-	-	-154.32	-22.17	197.80
		κ - μ	-	-	1.40	1.24	-	-	-	-	-282.95	-33.44	-33.33
		η - μ	-	0.99	-	1.00	-	-	-	-	-223.37	-15.20	340.47
	α - η - κ - μ	3.19	0.74	1.94	1.01	0.14	7.05	6.50	-	-221.72	-39.66	-150.74	
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-93.03	-8.06	473.58
		Rice	-	-	2.42	-	-	-	-	-	-398.78	-23.49	180.75
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	4.79	-	-	-	-	-200.95	-26.71	119.16
		α - μ	1.91	-	-	1.87	-	-	-	-	-199.76	-27.03	115.19
		κ - μ	-	-	0.80	1.52	-	-	-	-	-315.78	-33.87	-15.73
		η - μ	-	1.12×10^6	-	1.79	-	-	-	-	-200.95	-26.71	121.16
	α - η - κ - μ	1.96	0.97	0.92	1.54	0.95	0.55	9.36	-	-261.59	-33.88	-5.81	
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	109.80	-8.16	552.59
		Rice	-	-	2.32	-	-	-	-	-	-453.00	-26.93	133.45
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.73	-	-	-	-	-226.99	-22.81	227.49
		α - μ	1.85	-	-	1.88	-	-	-	-	-224.66	-23.21	220.28
κ - μ		-	-	1.28	1.30	-	-	-	-	-401.61	-36.52	-83.16	
η - μ		-	1.09	-	0.99	-	-	-	-	-306.40	-16.67	369.28	
α - η - κ - μ	3.29	0.63	1.05	1.01	0.14	3.02	19.44	-	-378.62	-38.79	-124.74		
Cenário 4	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-330.26	-12.37	663.17
		Rice	-	-	1.34	-	-	-	-	-	-879.93	-18.06	506.69
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.33	-	-	-	-	-490.18	-28.54	214.55
		α - μ	1.88	-	-	1.40	-	-	-	-	-486.17	-29.48	190.45
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.33	-	-	-	-	-490.12	-28.54	216.55
		η - μ	-	0.32	-	0.72	-	-	-	-	-469.31	-32.81	97.67
	α - η - κ - μ	1.62	0.78	0.02	1.71	1.25	0.02	20.64	-	-402.58	-35.41	35.15	
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-375.13	-11.06	556.30
		Rice	-	-	1.60	-	-	-	-	-	-1136.10	-18.65	402.75
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.42	-	-	-	-	-607.76	-32.44	120.11
		α - μ	1.89	-	-	1.49	-	-	-	-	-603.16	-34.55	78.86
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.42	-	-	-	-	-607.74	-32.44	122.11
		η - μ	-	2.16	-	0.74	-	-	-	-	-595.29	-34.80	73.73
	α - η - κ - μ	2.02	2.73	0.59	1.53	0.98	39.76	1.02	-	-876.07	-43.82	-101.08	
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-407.01	-11.29	640.59
		Rice	-	-	1.54	-	-	-	-	-	-1195.0	-18.04	479.51
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.40	-	-	-	-	-646.90	-29.95	191.48
		α - μ	1.90	-	-	1.47	-	-	-	-	-642.23	-30.87	171.40
κ - μ		-	-	0.30	1.45	-	-	-	-	-680.77	-17.92	154.66	
η - μ		-	2.89	-	0.75	-	-	-	-	-623.59	-36.37	38.39	
α - η - κ - μ	2.19	0.79	0.56	1.41	2.48	0.13	0.64	-	-776.15	-41.58	-77.73		

Tabela 5.6 – Resultado de ajustes de LCR_s para o Cenário 5, Cenário 6, Cenário 7 e Cenário 8.

Cenários	Frequência	Distribuição	$\hat{\alpha}$	$\hat{\eta}$	$\hat{\kappa}$	$\hat{\mu}$	$\hat{\rho}$	\hat{q}	\hat{d}	$\hat{\psi}[\times 10^3]$	NMSE [dB]	AIC	
Cenário 5	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-296.80	-12.36	534.44	
		Rice	-	-	1.30	-	-	-	-	-769.17	-16.91	436.96	
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.32	-	-	-	-436.74	-25.31	253.21	
		α - μ	1.90	-	-	1.38	-	-	-	-433.79	-25.57	249.45	
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.32	-	-	-	-436.81	-25.31	255.21	
		η - μ	-	0.20	-	0.77	-	-	-	-405.62	-37.90	-20.28	
	α - η - κ - μ	1.54	0.71	0.63	1.97	1.35	≈ 0	3.90	-1029.40	-39.46	-44.40		
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-332.32	-12.81	553.09	
		Rice	-	-	1.30	-	-	-	-	-864.70	-18.71	420.63	
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.31	-	-	-	-484.07	-29.76	168.75	
		α - μ	1.86	-	-	1.40	-	-	-	-479.23	-31.74	125.51	
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.31	-	-	-	-484.12	-29.76	170.75	
		η - μ	-	2.76	-	0.70	-	-	-	-467.23	-34.22	68.96	
	α - η - κ - μ	1.65	1.12	0.21	1.65	1.51	≈ 0	3.25	-530.25	-40.83	-71.65		
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-364.96	-11.96	650.02	
		Rice	-	-	1.41	-	-	-	-	-1005.20	-17.86	498.39	
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.35	-	-	-	-554.27	-28.35	225.33	
		α - μ	1.87	-	-	1.44	-	-	-	-549.01	-29.48	198.03	
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.35	-	-	-	-554.15	-28.35	227.33	
		η - μ	-	0.32	-	0.73	-	-	-	-530.72	-33.36	97.08	
	α - η - κ - μ	1.32	0.93	2.02	2.34	2.12	≈ 0	86.05	-3149.80	-39.59	-55.01		
	Cenário 6	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-312.22	-13.18	511.43
			Rice	-	-	1.24	-	-	-	-	-785.82	-18.60	397.27
			Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.29	-	-	-	-445.32	-29.33	167.55
α - μ			1.90	-	-	1.35	-	-	-	-442.07	-30.23	150.35	
κ - μ			-	-	≈ 0	1.29	-	-	-	-445.42	-29.33	169.55	
η - μ			-	0.35	-	0.69	-	-	-	-428.62	-32.78	95.82	
α - η - κ - μ		1.85	1.17	1.19	1.55	0.48	78.94	0.53	-1155.50	-42.74	-107.54		
60 GHz		Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-336.41	-12.55	560.65	
		Rice	-	-	1.34	-	-	-	-	-891.25	-18.54	425.94	
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.33	-	-	-	-495.81	-29.06	186.29	
		α - μ	1.85	-	-	1.42	-	-	-	-490.37	-31.19	139.72	
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.33	-	-	-	-495.74	-29.06	188.29	
		η - μ	-	2.72	-	0.70	-	-	-	-478.74	-31.94	122.66	
α - η - κ - μ		1.50	1.23	0.95	1.84	1.84	≈ 0	4.54	-1070.30	-38.59	-18.94		
65 GHz		Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-385.24	-12.76	624.66	
		Rice	-	-	1.28	-	-	-	-	-989.76	-17.87	496.18	
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.31	-	-	-	-559.33	-28.19	232.41	
		α - μ	1.92	-	-	1.36	-	-	-	-556.16	-28.53	225.59	
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.31	-	-	-	-559.40	-28.19	234.40	
		η - μ	-	0.30	-	0.71	-	-	-	-532.21	-36.15	30.91	
α - η - κ - μ		1.43	1.09	1.14	1.96	0.66	72.41	≈ 0	-1421.50	-40.33	-65.83		
Cenário 7		55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-150.51	-5.13	585.85
			Rice	-	-	4.12	-	-	-	-	-1062.80	-27.68	157.03
			Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	2.67	-	-	-	-534.20	-26.20	185.16
	α - μ		2.01	-	-	2.66	-	-	-	-534.48	-26.21	187.12	
	κ - μ		-	-	1.26	1.92	-	-	-	-890.18	-33.16	-54.23	
	η - μ		-	0.99	-	1.27	-	-	-	-482.68	-23.92	230.84	
	α - η - κ - μ	2.04	1.32	1.85	1.65	1.52	0.61	24.82	-611.68	-39.29	-52.92		
	60 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-169.17	-4.01	522.35	
		Rice	-	-	5.67	-	-	-	-	-1625.20	-27.98	154.57	
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	3.49	-	-	-	-819.43	-27.07	168.52	
		α - μ	2.04	-	-	3.39	-	-	-	-821.25	-27.13	169.70	
		κ - μ	-	-	1.24	2.48	-	-	-	-1334.70	-31.27	105.83	
		η - μ	-	1.06	-	1.66	-	-	-	-741.58	-24.47	210.76	
	α - η - κ - μ	2.00	2.12	6.88	0.92	3.65	0.98	13.35	-837.50	-37.41	21.03		
	65 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-175.07	-4.48	655.34	
		Rice	-	-	4.90	-	-	-	-	-1463.20	-26.63	203.31	
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	3.08	-	-	-	-737.31	-27.23	191.01	
		α - μ	2.08	-	-	2.93	-	-	-	-740.67	-27.43	188.93	
		κ - μ	-	-	1.02	2.37	-	-	-	-1165.80	-30.56	124.81	
		η - μ	-	0.98	-	1.49	-	-	-	-685.28	-25.58	226.81	
	α - η - κ - μ	2.02	2.63	2.69	1.32	13.34	12.60	7.61	-536.66	-41.11	-81.40		
	Cenário 8	55 GHz	Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-332.60	-13.41	674.25
			Rice	-	-	1.16	-	-	-	-	-1038.40	-17.40	563.03
			Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.28	-	-	-	-605.44	-26.06	317.90
α - μ			2.00	-	-	1.28	-	-	-	-605.29	-26.06	319.82	
κ - μ			-	-	≈ 0	1.28	-	-	-	-605.53	-26.06	319.90	
η - μ			-	0.23	-	0.72	-	-	-	-566.07	-36.49	24.46	
α - η - κ - μ		1.56	3.05	≈ 0	1.78	1.56	99.09	≈ 0	-1018.60	-38.56	24.17		
60 GHz		Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-453.33	-11.11	708.38	
		Rice	-	-	1.58	-	-	-	-	-1361.70	-18.60	512.07	
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.41	-	-	-	-729.22	-29.18	231.84	
		α - μ	1.80	-	-	1.56	-	-	-	-718.71	-34.32	97.84	
		κ - μ	-	-	0.15	1.40	-	-	-	-619.26	-17.01	232.67	
		η - μ	-	2.27	-	0.74	-	-	-	-712.48	-30.39	201.97	
α - η - κ - μ		1.51	1.19	0.56	1.92	1.39	≈ 0	24.59	-869.67	-39.79	-36.98		
65 GHz		Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-523.89	-11.13	639.01	
		Rice	-	-	≈ 0	-	-	-	-	-287.56	-13.23	593.12	
		Nakagami- <i>m</i>	-	-	-	1.41	-	-	-	-841.22	-28.88	236.45	
		α - μ	1.81	-	-	1.55	-	-	-	-829.56	-32.42	157.81	
		κ - μ	-	-	≈ 0	1.41	-	-	-	-841.22	-28.88	238.44	
		η - μ	-	2.68	-	0.75	-	-	-	-814.48	-31.61	176.23	
α - η - κ - μ		1.60	2.25	0.10	1.85	3.19	≈ 0	12.48	-451.26	-42.14	-53.77		

Os efeitos da combinação de polarização nas distribuições de desvanecimento de curto prazo podem ser inferidos analisando-se os resultados obtidos para os Cenários 1 e 3 em condições de LoS para a mesma posição tx-rx (Pos1) e combinações de polarização HV e VV, respectivamente, conforme mostrado na Tabela 5.5. O parâmetro estimado κ do modelo κ - μ , para as frequências 55, 60 e 65 GHz, foi de aproximadamente zero para a combinação de polarização HV; e 1.40, 0.80 e 1.28 para a VV. Utilizando a combinação HV, a contribuição da visada direta decresce substancialmente, ficando com um nível significativamente mais baixo, que é dado pela componente de polarização cruzada de ambas as antenas tx e rx. Por outro lado, ainda no caso HV, as componentes difusas não decrescem com a diminuição da componente dominante. Isto ocorre uma vez que as ondas refletidas e espalhadas sofrem mudança de polarização durante os processos de reflexão e espalhamento e, assim, as componentes difusas em HV não são tão menores se comparadas ao caso VV. Portanto, baseado nos comentários anteriores, é esperado que o valor de κ seja realmente menor em HV do que em VV. Particularmente para o Cenário 1, os valores estimados do parâmetro κ são muito próximos de zero e, conseqüentemente, o modelo de desvanecimento pode ser aproximado para uma distribuição Nakagami- m , em que a componente dominante é desprezível se comparada com as componentes difusas. Perceba, inclusive, que as distribuições κ - μ e Nakagami- m obtiveram, para o Cenário 1, praticamente o mesmo desempenho no critério NMSE, indicando que o ajuste realizado foi tecnicamente idêntico nos dois casos. Em contrapartida, segundo o critério AIC a distribuição Nakagami- m alcançou um resultado ligeiramente superior ao da κ - μ , o que é natural, visto que ela possui um parâmetro a menos e o critério utiliza essa informação a seu favor durante o cômputo da métrica de avaliação. As mesmas conclusões, obtidas neste parágrafo analisando-se os resultados dos Cenários 1 e 3, podem ser extraídas verificando-se os resultados dos Cenários 5 e 7.

Analisando os resultados de uma forma geral, ao considerar a métrica NMSE em todas as frequências consideradas e nos oito cenários avaliados, a melhor qualidade de ajuste foi alcançada pelo modelo de desvanecimento α - η - κ - μ , o que era mais uma vez, de certa forma, esperado, uma vez que o modelo em questão, conforme já citado, é o que possui a maior quantidade de parâmetros dentre todos avaliados, sendo, desta forma, o mais flexível e abrangente. É importante destacar, também, a grande melhoria na qualidade dos ajustes com a utilização da distribuição α - η - κ - μ se comparado às demais distribuições, chegando a proporcionar ganhos de aproximadamente 10 dB com relação à distribuição que obteve o segundo melhor ajuste, como no caso do Cenário 7 na frequência 60 GHz.

Agora, ao considerar a métrica de teste AIC, na maioria dos cenários avaliados o melhor resultado de ajuste também foi alcançado pela distribuição α - η - κ - μ (22 de 24).

Entretanto, nos 2 cenários excepcionais (2 de 24), embora a distribuição mais generalizada tenha obtido um melhor ajuste considerando a métrica NMSE, o modelo não obteve o melhor resultado em termos de AIC. O que pode ser facilmente justificável, visto que a métrica AIC penaliza modelos que possuem um número elevado de parâmetros, que é o caso da distribuição $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$ (7 parâmetros). De fato, no Cenários 3, frequência 60 GHz, e Cenário 7, frequência 55 GHz, com combinação de polarização VV e com condição de LoS, o modelo que melhor se ajustou aos dados empíricos segundo o critério AIC foi o $\kappa\text{-}\mu$ (2 parâmetros), constituindo, nesses dois casos, o modelo que apresenta a melhor relação de compromisso entre qualidade de ajuste e complexidade, corroborando a sua, já conhecida, habilidade de modelar com qualidade ambientes em condições de linha de visada.

Com objetivo de ilustrar o processo de ajuste, a Figura 5.6 apresenta as curvas de LCR_s dos modelos teóricos juntamente com a curva levantada empiricamente, por meio dos dados coletados na campanha de medições, para cada um dos oito cenários, na frequência 60 GHz, em função da envoltória normalizada ρ , que aparece nas figuras em dB.

Ao analisar os resultados apresentados nas figuras é possível verificar que, para os Cenários 1 e 2, apresentados nas Figuras 5.6(a) e 5.6(b), com exceção dos modelos Rayleigh e Rice, todas as demais distribuições se ajustam bem aos dados empíricos de LCR_s . Entretanto, se for realizada uma análise mais cuidadosa apenas na porção extrema inferior da cauda das curvas, ou seja, para valores substancialmente pequenos de ρ , as distribuições $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$ e $\eta\text{-}\mu$ se aderem melhor à curva empírica. Na realidade, o melhor ajuste nos dois cenários citados, considerando as métricas NMSE e AIC foram alcançados pela distribuição $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$. Note que no Cenário 1, embora seja uma condição de LoS, as distribuições Rice e $\kappa\text{-}\mu$, conhecidas por apresentarem bons resultados de ajustes nesse tipo de situação, não obtiveram sucesso na aderência. Isto pode ser creditado à questão da combinação de polarização das antenas tx-rx, que no caso foi HV, na qual a contribuição da componente dominante é drasticamente reduzida devido à polarização cruzada. Para o Cenário 3, apresentado na Figura 5.6(c), com exceção de Rayleigh, todas os demais modelos de desvanecimento alcançaram bons ajustes. Note, porém, que nesse cenário, diferentemente do que acontece no Cenário 1, a distribuição $\kappa\text{-}\mu$ apresentou um resultado de ajuste excelente, uma vez que as componentes diretas do sinal recebido não se degradaram devido à utilização da combinação de polarização VV. Nesse caso específico, o melhor ajuste considerando as métricas NMSE e AIC foram obtidos pelas distribuições $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$ e $\kappa\text{-}\mu$, respectivamente. Para o Cenário 4, mostrado na Figura 5.6(d), uma vez que se tem uma condição nLoS, todos os modelos capazes de retratar o fenômeno de *clusters* de multipercurso obtiveram um ajuste muito bom. Para esta situação específica, o melhor resultado de aderência foi alcançado pela distribuição $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$ em ambos os cri-

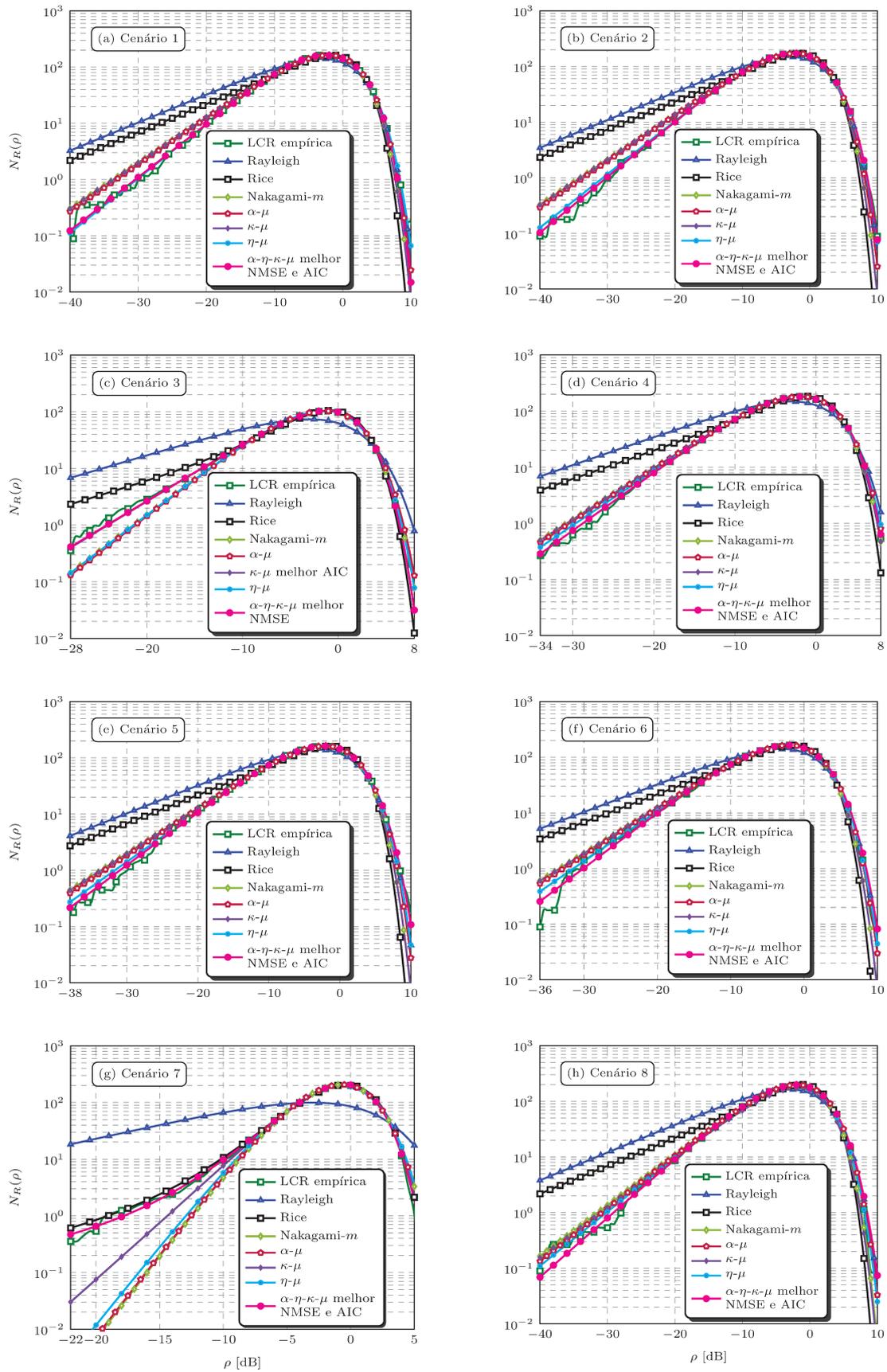


Figura 5.6 – Ajustes de LCR_s na frequência de 60 GHz para os Cenários 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e), 6 (f), 7 (g) e 8 (h).

térios de avaliação considerados. Para os Cenários 5 e 6, mostrados nas Figuras 5.6(e) e 5.6(f), tem-se resultados bem similares àqueles apresentados para os Cenários 1 e 2, em que, com exceção de Rayleigh e Rice, todos os demais modelos apresentaram um bom ajuste, sendo que o melhor resultado também foi alcançado pela distribuição α - η - κ - μ nos testes NMSE e AIC. Para o Cenário 7, apresentado na Figura 5.6(g) tem-se um resultado bastante interessante, em que é possível verificar o excelente ajuste realizado pela distribuição α - η - κ - μ que, inclusive, altera sua concavidade para seguir a tendência da curva empírica. Nesse caso, modelos capazes de prever componentes dominantes obtiveram melhores ajustes que aqueles que não possuem essa habilidade, uma vez que a transmissão no cenário mencionado foi realizada em condição de LoS. Finalmente, para o Cenário 8, mostrado na Figura 5.6(h) e similar ao Cenário 4, modelos com habilidade de reproduzir o fenômeno de *clusters* de multipercurso obtiveram os melhores ajustes. Em particular, mais uma vez, a distribuição que alcançou o melhor resultado nos testes NMSE e AIC para essa situação foi a α - η - κ - μ .

5.4.3 Comentários sobre os resultados

A partir da campanha de medições realizada em ondas milimétricas e dos resultados de ajustes obtidos para as PDFs e LCR_s, é possível concluir que o modelo α - η - κ - μ sempre proporcionará a melhor qualidade de ajuste se considerarmos apenas o erro médio quadrático entre as curvas empíricas e as curvas dos modelos teóricos. Por outro lado, considerando a métrica KS, que só se aplica para ajustes de PDF, a distribuição mais generalizada, ou seja, a α - η - κ - μ , alcançará o melhor resultado na grande maioria dos casos. Para ajustes de PDF, em algumas situações, o ganho proporcionado pelo uso da α - η - κ - μ é tão relevante que o modelo também apresenta o melhor resultado em termos da métrica AIC, que penaliza distribuições mais complexas. Ainda comentando sobre os ajustes de PDF, em algumas situações peculiares, como aquela apresentada para o Cenário 8 frequência 55 GHz, em que a distribuição empírica exhibe comportamentos multimodais, apenas o modelo de desvanecimento α - η - κ - μ é capaz de capturar as mudanças na tendência da curva empírica e proporcionar um bom ajuste. Sobre os resultados da métrica AIC aplicada nas análises de LCR_t, foi possível constatar que, na grande maioria das situações avaliadas, o modelo mais generalizado obteve o melhor ajuste, indicando que para esse tipo de análise de segunda ordem, a distribuição α - η - κ - μ é a que proporciona a melhor relação entre qualidade de ajuste e complexidade em termos de quantidade de parâmetros. Alguns pesquisadores podem questionar a complexidade das expressões do modelo mais generalizado, entretanto é inquestionável a melhoria dos ajustes proporcionados pela sua utilização, tanto nas análises de PDF quanto nas de LCR_s, ficando a decisão de seu uso por parte do próprio pesquisador interessado. Os modelos generalizados mais simples (α - μ ,

κ - μ e η - μ), apesar de apresentarem uma redução na qualidade de ajuste se comparado ao modelo mais generalizado, alcançam bons resultados na maioria dos casos e, de uma forma geral, apresentam um melhor desempenho se comparado aos modelos mais tradicionais (Rayleigh, Rice e Nakagami- m).

Neste ponto, uma conclusão importante e geral é pertinente. Não existe uma única combinação de fenômenos físicos que descreverão categoricamente o comportamento do canal de comunicação. Diferentes combinações de fenômenos físicos, tais como não linearidade do meio, *clusters* de multipercurso, componentes dominantes de potência, dentre outras podem resultar em modelagens parecidas. Analisando, por exemplo, Nakagami- m e α - μ . Em nenhuma premissa de qualquer modelo físico para Nakagami- m uma componente dominante aparece, sendo considerados apenas *clusters* de multipercurso. Nesse sentido, Nakagami- m nunca poderia ser utilizada para modelar ambientes em que haja uma componente de visada. Entretanto, conforme verificado nos resultados das tabelas 5.3 e 5.4 (ajustes de PDFs) a distribuição Nakagami- m obteve, de certa forma, um bom resultado de ajuste em ambos os Cenários LoS e nLoS. Isto só foi possível pelo fato de, em condições de LoS, os *clusters* de multipercurso conseguirem emular os efeitos de uma componente dominante. O mesmo acontece com a distribuição α - μ que, apesar de em seu modelo físico não considerar componentes dominantes, obteve bons resultados nos cenários em condições de LoS combinando suas habilidades de modelar não linearidade e *clusters* de multipercurso. Esta intercambiabilidade de efeitos, comentada aqui apenas para as distribuições Nakagami- m e α - μ , mas que se estende aos demais modelos, é muito mais intensa e poderosa no modelo de desvanecimento α - η - κ - μ , que pode combinar os efeitos de diferentes fenômenos físicos para modelar desde os cenários mais simples aos mais excêntricos. Em geral, os ambientes de propagação são bem complexos e não existe uma solução única e simples para a modelagem do canal rádio móvel, seja ela em termos físicos ou matemáticos.

6 Conclusão e Trabalhos futuros

6.1 Conclusão

Este trabalho avançou no estudo do modelo de desvanecimento α - η - κ - μ , com o objetivo de comprovar sua flexibilidade e, desta forma, reforçar o seu potencial para a utilização em diferentes cenários de desvanecimento. Inicialmente, foi analisado o desempenho de aderência entre a curva da distribuição da envoltória do modelo α - η - κ - μ com as curvas PDF e CDF experimentais extraídas de [55, 56], originalmente obtidas por meio de uma campanha de medições realizadas na faixa de ondas milimétricas. Utilizando as distribuições testadas em [55, 56] e comparando o desempenho de aderência com aquele alcançado pelo modelo α - η - κ - μ , foi demonstrado que o modelo mais generalizado apresentou o melhor ajuste de curvas. Outra interessante característica explorada neste trabalho foi a questão da não unimodalidade da envoltória do modelo α - η - κ - μ . Neste caso específico, os parâmetros da distribuição α - η - κ - μ foram determinados para que este efeito fosse demonstrado. A principal ideia por trás dessa análise preliminar da qualidade de aderência, baseada em dados extraídos de artigos publicados na literatura, não foi mostrar que a nova distribuição proporciona um melhor ajuste se comparada com outras distribuições, o que já era previsível (embora ainda não apresentado na literatura). A intenção foi apenas demonstrar que podem haver situações ou cenários mais complexos e singulares, como alguns mostrados neste trabalho na faixa de ondas milimétricas, nos quais os modelos mais simples não se adequam tão bem, por exemplo, cenários que apresentam características de alteração de concavidades das curvas empíricas (não unimodalidade), ou mesmo naqueles cenários de ajustes de cauda da CDF da envoltória, principalmente nas regiões de baixa relação sinal-ruído. Com esses exemplos, foi possível concluir que os atributos da distribuição α - η - κ - μ podem ser úteis nessas situações excêntricas. Esta breve validação experimental inicial do recente modelo foi utilizada como motivação para aprofundar o seu entendimento, em particular, por meio da obtenção das suas estatísticas de ordem superior.

As estatísticas de ordem superior deduzidas neste trabalho foram aquelas relacionadas com a derivada temporal do processo α - η - κ - μ . Formulações exatas foram obtidas para várias distribuições conjuntas, relacionadas com R , \dot{R} , Θ e $\dot{\Theta}$. Mais importante que isso, formulações exatas para as métricas LCR_t , AFD_t e PCR_t também foram alcançadas. Com propósito ilustrativo, um pequeno conjunto de gráficos foi apresentado e algumas conclusões foram retiradas. Vale ressaltar, também, que as estatísticas de ordem superior deduzidas neste trabalho englobam todas aquelas já disponíveis na literatura para

modelos de desvanecimento de curto prazo (ex: [24, 25, 34, 78]).

Este trabalho também contribuiu para melhorar o entendimento do comportamento do canal na banda de ondas milimétricas, principalmente relacionado ao desvanecimento de curto prazo, investigando as suas estatísticas de primeira e segunda ordem, mais especificamente a PDF e a LCR_t/LCR_s , por meio de medidas de campo. Para tal, uma extensa campanha de medições na banda de mm-wave foi conduzida em um ambiente *indoor*, em parceria com o instituto de pesquisa iTEAM da Universidade Politécnica de Valência. As frequências consideradas nas medições compreenderam a faixa de 55 GHz a 65 GHz, e as condições de propagação LoS e nLoS, com combinações de polarização horizontal e vertical em ambas as antenas de transmissão e recepção. Os modelos que melhor se ajustaram aos dados experimentais foram escolhidos utilizando três figuras de mérito, denominadas, NMSE, KS e AIC. Analisando os resultados dos testes para as estatísticas de primeira ordem (PDF) foi possível constatar que, segundo o critério NMSE, a distribuição mais generalizada alcançou o melhor resultado de ajuste em todas as 24 situações avaliadas, o que já era esperado, uma vez que a distribuição engloba todas as demais avaliadas. Já segundo o critério KS, a α - η - κ - μ obteve o melhor desempenho em 19 das 24 situações, enquanto que as distribuições generalizadas mais simples (α - μ , η - μ e κ - μ) ficaram com o melhor ajuste em 5 das 24 situações, restando apenas uma situação na qual uma distribuição convencional foi eleita como sendo o melhor ajuste. Pelo terceiro e último critério, o AIC, que penaliza distribuições com maior número de parâmetros, a distribuição mais generalizada obteve o melhor desempenho em 5 das 24 situações, as generalizadas mais simples em 8 das 24 e os modelos convencionais em 11 das 24. Analisando também os resultados dos testes para as estatísticas de segunda ordem (LCR_s), foi possível concluir que o modelo mais generalizado também proporcionou o menor erro NMSE em todas as 24 situações avaliadas. Além disso, para a métrica AIC esse mesmo modelo se comportou melhor em 22 das 24 situações. Desta forma, pode-se inferir que o modelo α - η - κ - μ sempre irá proporcionar uma melhor qualidade de ajuste se comparado com os demais modelos. Mais que isso, embora essa melhoria na aderência, com a utilização da distribuição α - η - κ - μ , venha acompanhada também de um aumento de complexidade matemática, verificou-se por meio da métrica AIC que, na maioria dos casos, esse inconveniente é recompensado por um ganho significativo na qualidade de ajuste, que em nossas validações experimentais chegou a ser de até 10 dB com relação ao modelo que proporcionou o segundo melhor ajuste. Por outro lado, caso seja necessário evitar o aumento de carga matemática, os modelos generalizados mais simples (α - μ , η - μ e κ - μ) podem ser utilizados para produzir bons resultados. De forma geral, pode-se dizer que todos os modelos de desvanecimento avaliados neste trabalho, nos cenários previstos pelos seus modelos físicos, podem ser utilizados satisfatoriamente para a modelagem de canal

na faixa de ondas milimétricas.

Uma conclusão muito importante e pertinente, também alcançada com a realização deste trabalho, foi a de que não existe uma única combinação de fenômenos físicos que descreverão categoricamente o comportamento do canal de comunicação. Diferentes combinações de fenômenos físicos poderão resultar em modelagens parecidas. A vasta gama de possibilidade de combinações dos efeitos de diversos fenômenos físicos oferecidos pelo modelo de desvanecimento α - η - κ - μ permite que ele seja capaz de modelar desde os cenários mais simples aos mais excêntricos. Em geral, os ambientes de propagação são bem complexos, não existindo uma solução única e simples, seja ela em termos físicos ou matemáticos, para a modelagem do canal rádio móvel.

Alguns questionamentos a respeito da complexidade nas formulações matemáticas do novo modelo, apresentadas neste trabalho, são pertinentes. Qualquer pesquisador ou engenheiro especializado da área certamente procurará por distribuições matemáticas mais simples e baseadas em fenômenos físicos para ajustes a dados práticos. É perceptível que qualquer solução envolvendo o modelo α - η - κ - μ leva a fórmulas complexas e que sua utilização para aderência em dados práticos ainda pode ser penosa. Entretanto, é reconhecido que a concepção de tal modelo foi totalmente fundamentada em fenômenos físicos, levando em consideração todos eles, sendo exatamente essa a razão do aumento de sua complexidade. Vale ressaltar também que a complexidade matemática de alguns modelos generalizados (por exemplo, α - μ , η - μ e κ - μ) é praticamente a mesma de modelos mais simples (como, Weibull ou Nakagami- m , Hoyt and Rice). Como dito anteriormente, todos procuram por soluções mais simples. No entanto, em vários cenários práticos, as distribuições mais simples podem não produzir um bom ajuste, principalmente nas regiões de cauda das distribuições, ou seja, naquelas condições mais severas de desvanecimento, em que temos inclusive uma baixa relação sinal-ruído. Nestes casos, modelos mais elaborados são necessários. É importante mencionar também que a complexidade matemática é uma questão bastante questionável. O que costumava ser complexo a algum tempo atrás, nos dias atuais, se tornou simples e de uso comum. E, além disso, como individualmente os modelos estatísticos se aplicam, normalmente, a cenários de desvanecimento específicos, é muito interessante e prático ter uma distribuição de desvanecimento mais geral que, combinando os recursos das demais distribuições existentes, possa ser utilizada em uma grande variedade de situações de propagação. O modelo de desvanecimento α - η - κ - μ atende a esse requisito, abrangendo os fenômenos de desvanecimento mais importantes, podendo, portanto, ser aplicado em uma infinidade de cenários de propagação. A flexibilidade mencionada do modelo de desvanecimento α - η - κ - μ é refletida diretamente em suas estatísticas de ordem superior. Sendo assim, suas métricas (LCR, PCR e AFD), tanto no domínio temporal quanto espacial, produzem formas intrigantes, que não podem ser obti-

das pelos modelos de desvanecimento mais simples e já conhecidos. Portanto, o processo de desvanecimento $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$ é certamente o mais apto a modelar os mais distintos cenários de desvanecimento já existentes e futuros.

O objetivo principal por trás deste trabalho não foi o de provar, indiscutivelmente, que o modelo de desvanecimento $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$ é o melhor a ser aplicado em todos os cenários e situações de análises em ondas milimétricas, mesmo porque sabemos que existe uma certa complexidade matemática envolvida na sua utilização. A ideia foi apresentar que os modelos já disponíveis na literatura, principalmente os generalizados $\alpha\text{-}\mu$, $\eta\text{-}\mu$ e $\kappa\text{-}\mu$ são satisfatórios para esse propósito. Entretanto, em algumas situações peculiares, como aquelas em que as curvas empíricas apresentam efeitos multimodais, as distribuições já estabelecidas na literatura não são capazes de captar com fidelidade o comportamento dos dados práticos e, nestes casos, para que se consiga um bom ajuste é necessário a utilização de um modelo mais generalizado como o $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$. Porém, é claro que isto, por si só, não justifica o uso da distribuição mais generalizada em todas as ocasiões. Obviamente, que, em situações práticas, os modelos generalizados mais simples, na vasta maioria dos cenários, são a escolha mais sensata, considerando uma relação de compromisso entre erro de ajuste e o custo computacional de implementação. Entretanto, caso o usuário esteja em busca do melhor ajuste possível sem se preocupar com o aumento de carga matemática, o modelo $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$ é o mais indicado, proporcionando ajustes excelentes, inclusive, em situações nas quais o desvanecimento é mais severo.

6.2 Perspectivas para trabalhos futuros

Ao longo deste trabalho de doutorado foram identificados vários problemas que ainda não foram resolvidos e que seriam contribuições relevantes para a área. A seguir alguns deles são apresentados:

- Validação experimental das métricas AFD e PCR do modelo de desvanecimento $\alpha\text{-}\eta\text{-}\kappa\text{-}\mu$.
- Levantamento das estatísticas dos processos individuais de cada parâmetro do novo modelo segundo a sua variação com a frequência, espaço ou tempo.
- Dedução das expressões de probabilidade de erro e probabilidade de interrupção considerando cenários MIMO, utilizando diferentes técnicas de diversidade, tais como PSC (*Pure Selection Combining*) e MRC (*Maximal Ratio Combining*).

6.3 Artigos publicados em periódicos

Durante o desenvolvimento do trabalho de doutorado, os seguintes artigos, relacionados com o tema desta tese, foram publicados em periódicos pelo autor e seu grupo de pesquisa:

- A. A. dos Anjos, T. R. R. Marins, R. A. A. de Souza, and M. D. Yacoub, “Higher order statistics for the α - η - κ - μ fading model,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 6, pp. 3002–3016, Jun. 2018.
- A. A. Dos Anjos, T. R. R. Marins, C. R. Nogueira Da Silva, V. M. Rodrigo Peñarocha, L. Rubio, J. Reig, R. A. A. De Souza, and M. D. Yacoub, “Higher order statistics in a mmwave propagation environment,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 103 876–103 892, Jul. 2019.
- T. R. R. Marins, A. A. dos Anjos, V. M. R. Peñarocha, L. Rubio, J. Reig, R. A. A. de Souza, and M. D. Yacoub, “Fading evaluation in the mm-wave band,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 12, pp. 8725–8738, Sep. 2019.

Artigo em processo de avaliação:

- T. R. R. Marins, A. A. Dos Anjos, C. R. Nogueira Da Silva, V. M. Rodrigo Peñarocha, L. Rubio, J. Reig, R. A. A. De Souza, and M. D. Yacoub, “Fading evaluation in standardized 5G millimeter-Wave Band,” *IEEE Access*, 2021, Submitted.

Referências

- [1] P. Newman, “How internet of things technology growth is reaching mainstream companies and consumers,” Business Insider, Tech. Rep., Jan. 2019, available at <https://www.businessinsider.com/internet-of-things-report>.
- [2] Ericson, “More than 50 billion connected devices,” <https://vdna.be/publications/Wp-50-Billions.Pdf>, 2011, [Online; accessed 01-October-2020].
- [3] C. F. Kerry and J. Karsten, “Gauging investment in self-driving cars,” Brookings, Tech. Rep., Oct. 2017, available at <https://www.brookings.edu/research/gauging-investment-in-self-driving-cars/>.
- [4] R. Dagar, S. Som, and S. K. Khatri, “Smart farming - IoT in agriculture,” in *2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, Jul. 2018, pp. 1052–1056.
- [5] P. Pirinen, “A brief overview of 5G research activities,” in *5G for Ubiquitous Connectivity (5GU), 2014 1st International Conference on*, Nov. 2014, pp. 17–22.
- [6] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, “Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.
- [7] G. R. MacCartney and T. S. Rappaport, “73 GHz millimeter wave propagation measurements for outdoor urban mobile and backhaul communications in New York City,” in *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2014, pp. 4862–4867.
- [8] S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, “Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges,” *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 366–385, Mar. 2014.
- [9] 3GPP, “Technical Specification Group Radio Access Network; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception,” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 38.101-2-f50, Apr. 2019. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.101-2/
- [10] M. Marcus and B. Pattan, “Millimeter wave propagation: spectrum management implications,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 54–62, Jun. 2005.

-
- [11] J. Pascual-García, J. M. Molina-García-Pardo, M. T. Martínez-Inglés, J. V. Rodríguez, and N. Saurín-Serrano, “On the importance of diffuse scattering model parameterization in indoor wireless channels at mm-Wave frequencies,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 688–701, Feb. 2016.
- [12] T. S. Rappaport., *Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd Edition*. NJ, USA: Upper Saddle River: Pearson, 2001.
- [13] D. A. Guimarães., *Digital Transmission: A Simulation-Aided Introduction with Vis-Sim/Comm*. Berlim/Heidelberg, Germany: Springer Verlag, 2009.
- [14] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*, 1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 1993.
- [15] S. Haykin., *Communication Systems, 4th ed.* New York, USA: John Wiley Sons, 2001.
- [16] L. Rayleigh, “On the resultant of a large number of vibrations of the same pitch and of arbitrary phase,” *Philos. Mag.*, vol. 10, no. 60, pp. 73–78, 1880.
- [17] R. S. Hoyt, “Probability functions for the modulus and angle of the normal complex variate,” *Bell System Tech. J.*, vol. 26, no. 2, pp. 318–359, Apr. 1947.
- [18] S. O. Rice, *Statistical Properties of Random Noise Currents*. NY, USA: Dover: N. Wax, Ed., 1954.
- [19] M. D. Yacoub, “The α - η - κ - μ fading model,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 8, pp. 3597–3610, Aug. 2016.
- [20] M. Nakagami, “The m -distribution-A general formula of intensity distribution of rapid fading,” *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, vol. 26, no. 2, pp. 3–36, Apr. 1960.
- [21] W. Weibull, “A statistical distribution function of wide applicability,” *J. Appl. Mech.*, vol. 18, pp. 293–297, Sep. 1951.
- [22] M. D. Yacoub, “The α - μ distribution: A physical fading model for the stacy distribution,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 27–34, Jan. 2007.
- [23] ———, “The κ - μ distribution and the η - μ distribution,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, no. 1, pp. 68–81, Feb. 2007.
- [24] D. B. D. Costa, J. C. S. S. Filho, M. D. Yacoub, and G. Fraidenraich, “Second-order statistics of η - μ fading channels: Theory and applications,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 3, pp. 819–824, March 2008.

- [25] I. B. G. Pôrto and M. D. Yacoub, "On the phase statistics of the κ - μ process," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 15, no. 7, pp. 4732–4744, Jul. 2016.
- [26] G. Fraidenraich and M. D. Yacoub, "The α - η - μ and α - κ - μ fading distributions," *Proc. IEEE 9th Int. Symp. Spread Spectr. Techn. Appl.*, vol. 49, no. 1, pp. 16–20, Aug. 2006.
- [27] U. S. Dias and M. D. Yacoub, "The κ - μ phase-envelope joint distribution," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 1, pp. 40–45, Jan. 2010.
- [28] D. B. da Costa and M. D. Yacoub, "The η - μ joint phase-envelope distribution," in *2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, March 2007, pp. 1906–1908.
- [29] Q. Wu, D. W. Matolak, and I. Sen, "5-GHz-band vehicle-to-vehicle channels: Models for multiple values of channel bandwidth," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 2620–2625, Jun. 2010.
- [30] P. K. Chong, S. E. Yoo, S. H. Kim, and D. Kim, "Wind-blown foliage and human-induced fading in ground-surface narrowband communications at 400 MHz," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 4, pp. 1326–1336, May 2011.
- [31] V. M. Rodrigo-Penarrocha, J. Reig, L. Rubio, H. Fernández, and S. Loredó, "Analysis of small-scale fading distributions in vehicle-to-vehicle communications," *Mobile Information Systems*, vol. 2016, p. 7, 2016.
- [32] N. Bhargava, S. L. Cotton, and D. B. Smith, "An experimental-based analysis of inter-BAN co-channel interference using the κ - μ fading model," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 2, pp. 983–988, Feb. 2017.
- [33] J. F. Paris, "Statistical characterization of κ - μ shadowed fading," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 2, pp. 518–526, Feb. 2014.
- [34] S. L. Cotton, "Second-order statistics of κ - μ shadowed fading channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 10, pp. 8715–8720, Oct. 2016.
- [35] F. J. Cañete, J. Lopez-Fernandez, C. Garcia-Corrales, A. Sanchez, E. Robles, F. J. Rodrigo, and J. F. Paris, "Measurement and modeling of narrowband channels for ultrasonic underwater communications," *Sensors*, vol. 16, no. 2, 2016. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/2/256>
- [36] A. K. Papazafeiropoulos and S. A. Kotsopoulos, "Second-order statistics for the envelope of α - κ - μ fading channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 291–293, Apr. 2010.

- [37] S. K. Yoo, P. C. Sofotasios, S. L. Cotton, M. Matthaiou, M. Valkama, and G. K. Karagiannidis, "The η - μ / inverse gamma composite fading model," in *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Aug. 2015, pp. 166–170.
- [38] T. Zwick, T. J. Beukema, and H. Nam, "Wideband channel sounder with measurements and model for the 60 GHz indoor radio channel," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 4, pp. 1266–1277, Jul. 2005.
- [39] H. Xu, V. Kukshya, and T. S. Rappaport, "Spatial and temporal characteristics of 60-GHz indoor channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 620–630, Apr. 2002.
- [40] C. R. Anderson and T. S. Rappaport, "In-building wideband partition loss measurements at 2.5 and 60 GHz," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 3, pp. 922–928, May 2004.
- [41] P. F. M. Smulders, "Statistical characterization of 60-GHz indoor radio channels," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 10, pp. 2820–2829, Oct. 2009.
- [42] H. J. Thomas, R. S. Cole, and G. L. Siqueira, "An experimental study of the propagation of 55 GHz millimeter waves in an urban mobile radio environment," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 1, pp. 140–146, Feb. 1994.
- [43] M. Kyro, K. Haneda, J. Simola, K. i. Takizawa, H. Hagiwara, and P. Vainikainen, "Statistical channel models for 60 GHz radio propagation in hospital environments," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 3, pp. 1569–1577, Mar. 2012.
- [44] S. Hur, S. Baek, B. Kim, Y. Chang, A. F. Molisch, T. S. Rappaport, K. Haneda, and J. Park, "Proposal on millimeter-wave channel modeling for 5g cellular system," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 10, no. 3, pp. 454–469, Apr. 2016.
- [45] K. Haneda, J. Jarvelainen, A. Karttunen, M. Kyro, and J. Putkonen, "Indoor short-range radio propagation measurements at 60 and 70 GHz," in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, Apr. 2014, pp. 634–638.
- [46] M.-S. Choi, G. Grosskopf, and D. Rohde, "Statistical characteristics of 60 GHz wideband indoor propagation channel," in *2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 1, Sep. 2005, pp. 599–603.
- [47] M. K. Samimi, G. R. MacCartney, S. Sun, and T. S. Rappaport, "28 GHz millimeter-wave ultrawideband small-scale fading models in wireless channels," in *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2016, pp. 1–6.

- [48] T. Mavridis, L. Petrillo, J. Sarrazin, A. Benlarbi-Delai, and P. D. Doncker, “Near-body shadowing analysis at 60 GHz,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 10, pp. 4505–4511, Oct. 2015.
- [49] Y. J. Chun, S. L. Cotton, H. S. Dhillon, F. J. Lopez-Martinez, J. F. Paris, and S. K. Yoo, “A comprehensive analysis of 5G heterogeneous cellular systems operating over κ - μ shadowed fading channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 11, pp. 6995–7010, Nov. 2017.
- [50] S. K. Yoo, N. Bhargav, S. L. Cotton, P. C. Sofotasios, M. Matthaiou, M. Valkama, and G. K. Karagiannidis, “The κ - μ / inverse gamma and η - μ / inverse gamma composite fading models: Fundamental statistics and empirical validation,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
- [51] P. C. Sofotasios, T. A. Tsiftsis, M. Ghogho, L. R. Wilhelmsson, and M. Valkama, “The η - μ /IG distribution: A novel physical multipath/shadowing fading model,” in *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2013, pp. 5715–5719.
- [52] P. C. Sofotasios and S. Freear, “The α - κ - μ /Gamma distribution: A generalized nonlinear multipath/shadowing fading model,” in *2011 Annual IEEE India Conference*, Dec. 2011, pp. 1–6.
- [53] —, “On the η - μ /gamma and the λ - μ /gamma multipath/shadowing distributions,” in *2011 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference (AT-NAC)*, Nov. 2011, pp. 1–6.
- [54] —, “The κ - μ /gamma composite fading model,” in *2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems*, Aug. 2010, pp. 1–4.
- [55] J. Reig, M.-T. Martinez-Inglés, L. Rubio, V.-M. Rodrigo-Penarrocha, and J.-M. Molina-García-Pardo, “Fading evaluation in the 60 GHz band in line-of-sight conditions,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, p. 12, 2014.
- [56] M. K. Samimi, G. R. MacCartney, S. Sun, and T. S. Rappaport, “28 GHz millimeter-wave ultrawideband small-scale fading models in wireless channels,” in *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2016, pp. 1–6.
- [57] X. Li, X. Chen, J. Zhang, Y. Liang, and Y. Liu, “Capacity analysis of α - η - κ - μ fading channels,” *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 6, pp. 1449–1452, Feb. 2017.
- [58] J. M. Moualeu, D. B. da Costa, F. J. Lopez-Martinez, and R. A. A. Souza, “On the performance of α - η - κ - μ fading channels,” *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 6, pp. 967–970, 2019.

- [59] H. Al-Hmood and H. S. Al-Raweshidy, “On the effective rate and energy detection based spectrum sensing over α - η - κ - μ fading channels,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 8, pp. 9112–9116, 2020.
- [60] A. Mathur, Y. Ai, M. R. Bhatnagar, M. Cheffena, and T. Ohtsuki, “On physical layer security of α - η - κ - μ fading channels,” *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 10, pp. 2168–2171, 2018.
- [61] A. Goswami and A. Kumar, “Performance analysis of multi-hop wireless communication systems over α - η - κ - μ channel,” *Physical Communication*, vol. 33, pp. 9–15, 2019. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490718301460>
- [62] M. Abramowitz, *Handbook of Mathematical Functions, With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications, Incorporated, 1974.
- [63] P. Chen, T. . Wu, and J. Yang, “A comparative study of model selection criteria for the number of signals,” *IET Radar, Sonar Navigation*, vol. 2, no. 3, pp. 180–188, Jun. 2008.
- [64] A. Mariani, A. Giorgetti, and M. Chiani, “Model order selection based on information theoretic criteria: Design of the penalty,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 63, no. 11, pp. 2779–2789, Jun. 2015.
- [65] A. Seghouane, “The Akaike information criterion with parameter uncertainty,” in *Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, 2006.*, Jul. 2006, pp. 430–434.
- [66] J. Ding, V. Tarokh, and Y. Yang, “Model selection techniques: an overview,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 35, no. 6, pp. 16–34, Nov. 2018.
- [67] J. K. Nielsen, M. G. Christensen, and S. H. Jensen, “Bayesian model comparison and the bic for regression models,” in *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, May 2013, pp. 6362–6366.
- [68] P. Stoica and Y. Selen, “Model-order selection: a review of information criterion rules,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 21, no. 4, pp. 36–47, Jul. 2004.
- [69] J. M. Romero-Jerez, F. J. Lopez-Martinez, J. F. Paris, and A. Goldsmith, “The fluctuating two-ray fading model: Statistical characterization and performance analysis,” in *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Dec. 2016, pp. 1–6.
- [70] I. Gradshteyn and I. Ryzhik, *Tables of Integrals, Series, and Products*. New York: Academic Press, 1980.

- [71] R. Zhang, Z. Zhong, Y. Zhang, S. Lu, and L. Cai, "Measurement and analytical study of the correlation properties of subchannel fading for noncontiguous carrier aggregation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 9, pp. 4165–4177, Nov. 2014.
- [72] A. Abdi, K. Wills, H. A. Barger, M. S. Alouini, and M. Kaveh, "Comparison of the level crossing rate and average fade duration of Rayleigh, Rice and Nakagami fading models with mobile channel data," in *52nd Vehicular Technology Conference Fall 2000.*, vol. 4, Sep. 2000, pp. 1850–1857.
- [73] S. L. Cotton and W. G. Scanlon, "Higher-order statistics for κ - μ distribution," *Electronics Letters*, vol. 43, no. 22, Oct. 2007.
- [74] D. B. da Costa, J. C. S. S. Filho, M. D. Yacoub, and G. Fraidenraich, "Second-order statistics of η - μ fading channels: Theory and applications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 819–824, Mar. 2008.
- [75] D. W. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 11, no. 2, pp. 431–441, 1963.
- [76] A. Conn, N. Gould, and P. Toint, *Trust Region Methods*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.
- [77] MathWorks. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/lscurvefit.html>
- [78] W. Dahech, N. Hajri, N. Youssef, T. Kawabata, and M. Patzold, "Outage statistics for Beckmann fading channels in non-isotropic scattering environments," in *2015 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Oct. 2015, pp. 164–168.