

Conjunto ou Individual: Efeitos do Sombreamento no Canal de Desvanecimento - Investigação Preliminar

Beatriz Akiria de Assis Quaresma, Carlos Rafael Nogueira da Silva, e Michel Daoud Yacoub

Resumo— O modelo clássico e fundamental de desvanecimento considera componentes em fase e quadratura independentes e Gaussianas, resultando em envoltória Rayleigh e fase uniforme. Contudo, medições de campo evidenciam desvios sistemáticos desse comportamento em diversos cenários. Neste trabalho, investigam-se flutuações de potência sob regimes Individual e Conjunto, modelados por sombreamento Exponencial. Mostra-se que, no primeiro caso, embora as componentes em fase e quadratura permaneçam independentes, surge dependência entre envoltória e fase. No segundo, a flutuação conjunta induz dependência entre as componentes em fase e quadratura, mas independência entre envoltória e fase. Em ambos os cenários, a severidade do desvanecimento aumenta; no regime Individual há perda de uniformidade da fase, enquanto o regime Conjunto produz maior degradação da envoltória. Além das estatísticas de primeira ordem, também são obtidas métricas de desempenho, como taxa de erro de bit e capacidade do canal.

Palavras-Chave— Cluster de Desvanecimento, Distribuição de Laplace, Funções de Bessel, Sombreamento Exponencial Negativo.

Abstract— The classic and fundamental fading model considers independent Gaussian in-phase and quadrature components, resulting in a Rayleigh envelope and a uniform phase. However, field measurements show systematic deviations from this behavior in several scenarios. In this work, power fluctuations under Individual and Joint regimes, modeled by Exponential shadowing, are investigated. It is shown that, in the former case, although the in-phase and quadrature components remain independent, dependence arises between the envelope and the phase. In the latter, the joint fluctuation induces dependence between the in-phase and quadrature components, while preserving independence between the envelope and the phase. In both scenarios, fading severity increases; in the Individual regime, phase uniformity is lost, whereas the Joint regime produces greater envelope degradation. In addition to first-order statistics, performance metrics such as bit error rate and channel capacity are also obtained.

Keywords— Fading Cluster, Laplace Distribution, Bessel Functions, Negative Exponential Shadowing.

I. INTRODUÇÃO

O canal de comunicação representa um aspecto central no desenvolvimento de tecnologias de telecomunicações, incluindo, obviamente, as emergentes, como 5G/6G, Internet das Coisas (IoT), e superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS). A análise de métricas de desempenho está diretamente

relacionada ao desvanecimento do sinal ao longo do canal de propagação. Sabidamente, o desvanecimento resulta de dois fenômenos principais: o sombreamento e o multipercurso. O primeiro decorre da presença de obstáculos de grande escala e é frequentemente modelado por uma distribuição Lognormal. O segundo é causado pela superposição de múltiplas réplicas do sinal, provenientes de espalhamento e reflexões ao longo de diferentes trajetórias. Efeitos temporais associados à mobilidade, como o Doppler, não são modelados explicitamente, pois o foco recai sobre estatísticas de primeira ordem.

O modelo físico clássico e pioneiro para o desvanecimento de multipercurso descreve o sinal recebido por meio de componentes em fase e quadratura independentes, Gaussianas, com média nula e variâncias idênticas, resultando em envoltória com distribuição Rayleigh e fase uniforme. Ao longo do tempo, medidas de campo têm evidenciado desvios em relação a esse modelo, com distribuições de envoltória e fase distintas das previstas, o que motivou o desenvolvimento de outros mais gerais, como Rice, Hoyt, e Beckmann [1]. Esses modelos estendem o caso clássico ao considerar médias não nulas (Rice), variâncias distintas entre as componentes (Hoyt), ou ambas as generalizações simultaneamente (Beckmann).

Embora esses modelos ampliem o caso clássico, eles ainda preservam a gaussianidade das componentes em fase e quadratura. Essa hipótese pode ser limitada quando clusters de multipercurso e sombreamento modificam a estrutura estatística das componentes do sinal. Apesar de amplamente estudados na envoltória, esses efeitos permanecem pouco explorados nas componentes individuais.

Os parâmetros do canal de desvanecimento variam de acordo com o ambiente de propagação, fato amplamente reconhecido e reportado na literatura. É evidente que essa variação impacta diretamente o desempenho e a confiabilidade do sistema de comunicação sem fio [2].

Em trabalhos anteriores, o efeito da variação estocástica dos parâmetros de desvanecimento tem sido alvo de contínua investigação. Modelou-se, por exemplo, a flutuação dos parâmetros de desbalanceamento em canais de Hoyt [3] e Rice [4], [5] utilizando distribuições Exponenciais e Gamma. Mais recentemente, a distribuição uniforme foi proposta para modelar um cenário de máxima incerteza nesses mesmos ambientes [6]. Apesar do avanço expressivo nessas frentes, a literatura tem focado quase exclusivamente na envoltória do sinal resultante [7], restando um vão fundamental nos efeitos do sombreamento quando este atua sobre o cluster de desvanecimento (componentes em fase e quadratura) [8].

Beatriz Akiria de Assis Quaresma, Departamento de Comunicações, Unicamp, Campinas-SP, e-mail: b203899@dac.unicamp.br; Carlos Rafael Nogueira da Silva, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba-MG, carlos.nogueira@uftm.edu.br; Michel Daoud Yacoub, Departamento de Comunicações, Unicamp, Campinas-SP, e-mail: mdyacoub@unicamp.br.

Para suprir esta lacuna, este artigo investiga o impacto da flutuação do cluster no canal Gaussiano básico sob condições severas. Partindo-se da premissa de que a potência das componentes varia de acordo com uma distribuição Exponencial Negativa de média unitária, isola-se estritamente o efeito da deformação probabilística causada pelo sombreamento, garantindo que o balanço energético global do canal seja conservado.

Nesse sentido, duas abordagens são exploradas: (i) Sombreamento Individual; (ii) Sombreamento Conjunto. No primeiro, considera-se que as componentes em fase e quadratura são afetadas individualmente; no segundo, fase e quadratura são afetadas conjuntamente. Fisicamente plausíveis, esses fenômenos impactam diferentemente no desempenho do sistema. O objetivo desse trabalho é explorar, preliminarmente, como algumas estatísticas e métricas de desempenho são afetadas. Além de estatísticas de primeira ordem, como função densidade de probabilidade (PDF) e função distribuição cumulativa (CDF), também são obtidas expressões analíticas para o *amount of fading* (AF), probabilidade de erro de bit (BER), e capacidade ergódica do canal.

II. MODELO DO SISTEMA E FLUTUAÇÃO EXPONENCIAL NEGATIVA

Seja a transmissão de um sinal em banda base através de um canal com desvanecimento plano. O sinal recebido é fisicamente modelado por clusters de multipercurso, constituindo o desvanecimento de curto prazo, que também experimentam variações de longo prazo afetando a média local. O desvanecimento de curto prazo é modelado por duas variáveis aleatórias, denotadas por $Z \in \{X, Y\}$, que representam as componentes em fase (X) e quadratura (Y).

No canal de desvanecimento elementar, pioneiro, e fundamental, as componentes em fase e quadratura são modeladas por variáveis aleatórias Gaussianas independentes de média nula mesma variância σ^2 - o modelo de Rayleigh. Ainda, as variações de longo prazo com fundamento físico plausível são modeladas por uma distribuição Lognormal. Reconhecidamente, essa distribuição leva a um tratamento matemático intrincado e, usualmente, é substituído por bons modelos estatísticos aproximados e matematicamente manipuláveis, porém sem fundamentação física. Um desses modelos considera a distribuição Gamma, cujo caso particular é uma Exponencial Negativa. Assim, para uma investigação preliminar, este trabalho considera um desvanecimento de curto prazo modelado por uma distribuição de Rayleigh, com a potência de suas componentes Gaussianas (média local) flutuando de acordo com uma Exponencial Negativa.

Para incorporar a flutuação imposta pelo sombreamento, introduz-se uma variável aleatória estocástica ξ . Condiionadas a um dado estado de sombreamento ξ , as componentes do cluster, portanto, do sinal original, mantêm a sua natureza Gaussiana, contudo, a sua potência (variância) é modulada pela perturbação Exponencial. A PDF condicionada de uma componente genérica Z é dada por:

$$f_G(z|\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\xi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{z^2}{2\xi\sigma^2}\right). \quad (1)$$

Para modelar as variações no caminho de propagação, admite-se que o parâmetro de flutuação ξ segue uma distribuição Exponencial Negativa padrão, definida no semi-eixo positivo, cuja PDF é

$$f_E(\xi) = e^{-\xi}, \quad \xi \geq 0. \quad (2)$$

Como essa distribuição possui média unitária,

$$E[\xi] = \int_0^\infty \xi e^{-\xi} d\xi = 1, \quad (3)$$

a potência média global permanece igual a σ^2 , preservando o balanço energético do canal. Adicionalmente, a Exponencial Negativa é um caso particular da Gamma, utilizada na literatura como alternativa matematicamente viável à Lognormal em modelos de sombreamento.

No percurso entre transmissor e receptor, o meio de propagação pode provocar variações no sinal que afetem fase e quadratura individualmente ou conjuntamente. O objetivo do trabalho é investigar o impacto desse fenômeno nas estatísticas resultantes, incluindo métricas de desempenho.

III. ESTATÍSTICAS DE FASE E QUADRATURA

Nesta seção, obtêm-se algumas estatísticas de fase e quadratura para cada cenário.

A. Sombreamento Individual

A primeira hipótese pressupõe que o canal afeta as componentes em fase e quadratura de forma localmente decorrelacionadas. Logo, X e Y são sombreadas separadamente por processos Exponenciais independentes.

A PDF marginal incondicional $f_Z(z)$ é obtida avaliando-se a integral seguinte:

$$f_Z(z) = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\xi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{z^2}{2\xi\sigma^2}\right) e^{-\xi} d\xi. \quad (4)$$

A Equação (4) converge de forma exata para:

$$f_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}|z|}{\sigma}\right). \quad (5)$$

A Equação (5) corresponde à distribuição de Laplace. Embora não seja considerada uma distribuição de cauda pesada, o seu decaimento é mais lento que o da Gaussiana.

De acordo com essa abordagem, a conjunta fase-quadratura é dada por:

$$f_{X,Y}(x, y) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}(|x| + |y|)}{\sigma}\right). \quad (6)$$

B. Sombreamento Conjunto

A segunda premissa examina o cenário no qual o canal atua sobre o cluster como um todo, aplicando simultaneamente o mesmo nível de degradação ξ sobre todo o cluster. Sob esta condição conjunta, a PDF condicional bivariada baseia-se na independência condicional:

$$f_{XY}(x, y) = \int_0^\infty \frac{1}{2\pi\xi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\xi\sigma^2}\right) e^{-\xi} d\xi. \quad (7)$$

Aqui também, obtém-se uma conjunta fechada e exata dada por:

$$f_{XY}(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma^2} K_0 \left(\frac{\sqrt{2}\sqrt{x^2 + y^2}}{\sigma} \right), \quad (8)$$

sendo $K_0(\cdot)$ a Função de Bessel Modificada de Segunda Espécie e ordem zero [9, Eq. (9.6.11)].

C. Dependência Estatística e Ausência de Correlação

É importante ressaltar que para ambas as abordagens a distribuição das marginais é dada por (5). A análise levada a efeito aqui parte de um modelo complexo básico - o de Rayleigh - com fase e quadratura independentes. A abordagem de sombreamento individual mantém a independência dessas componentes. Assim, fase e quadratura são, obviamente, descorrelacionadas. Seja agora a abordagem de sombreamento conjunto. Calculando-se os momentos estatísticos correspondentes, atesta-se que a simetria de média nula é conservada ($E[X] = E[Y] = 0$). Adicionalmente, verifica-se de forma exata que $E[XY] = 0$. Consequentemente, a covariância é nula, provando a ausência de correlação linear.

No entanto, avaliando a Equação (8) e os produtos marginais de (5), observa-se que $f_{XY}(x, y) \neq f_X(x)f_Y(y)$. Constata-se, assim, que o sombreamento conjunto induz estrita dependência estatística nas componentes ortogonais.

IV. ESTATÍSTICAS DE FASE E ENVOLTÓRIA

A mudança para coordenadas polares (R, Θ) , onde $X = R \cos \Theta$ e $Y = R \sin \Theta$, permite determinar a densidade conjunta envoltória-fase e verificar a dependência estatística entre estas variáveis.

A. PDF Conjunta e Independência Estatística

Ao aplicar a transformação de variáveis nas densidades cartesianas apresentadas na Seção III, obtém-se as PDFs conjuntas para os dois regimes de sombreamento.

- **Sombreamento Individual:** Utilizando (6), a PDF conjunta polar é expressa como:

$$f_{R,\Theta}(r, \theta) = \frac{r}{2\sigma^2} \exp \left(-\frac{\sqrt{2}r(|\cos \theta| + |\sin \theta|)}{\sigma} \right). \quad (9)$$

Neste caso, a composição dos termos trigonométricos no expoente com a envoltória r impede a fatoração da densidade em $f_R(r)f_\Theta(\theta)$. Portanto, no sombreamento individual, a envoltória e a fase são variáveis dependentes. Por outro lado, embora $E[R] \neq 0$, $E[\Theta] = E[R, \Theta] = 0$, caracterizando descorrelação linear.

- **Sombreamento Conjunto:** A partir da densidade bivariada em (8), a PDF conjunta polar resulta em:

$$f_{R,\Theta}(r, \theta) = \frac{r}{\pi\sigma^2} K_0 \left(\frac{\sqrt{2}r}{\sigma} \right). \quad (10)$$

Aqui, fica claro que a função não depende da variável θ . Esta independência angular prova que a envoltória e a fase são estatisticamente independentes, portanto, descorrelacionadas.

B. Estatísticas Marginais

As estatísticas marginais são obtidas pelo procedimento canônico, integrando-se a conjunta em todo o domínio da variável a ser eliminada.

- **Sombreamento Individual:** A partir da Equação (9), e depois de algumas manipulações algébricas, a distribuição de fase é obtida de forma exata como:

$$f_\Theta(\theta) = \frac{1}{4(1 + |\sin(2\theta)|)}. \quad (11)$$

A densidade da envoltória converge de forma exata para:

$$f_R(r) = \sum_{n=0}^{\infty} w(r, \sigma, n), \quad (12)$$

na qual o termo $w(r, \sigma, n)$ acopla a Função de Bessel Modificada (I_ν) [9, Eq. (9.6.10)] e a Função de Struve Modificada (L_ν) [9, Eq. (12.2.1)]:

$$w(r, \sigma, n) = \frac{(-1)^n \pi r^{\frac{n}{2}+1} \left(I_{\frac{n}{2}} \left(\frac{\sqrt{2}r}{\sigma} \right) - L_{\frac{n}{2}} \left(\frac{\sqrt{2}r}{\sigma} \right) \right)}{2^{\frac{n}{4}} \Gamma \left(\frac{2+n}{2} \right) \sigma^{\frac{n}{2}+2}}. \quad (13)$$

Já a CDF para a envoltória é obtida como:

$$F_R(r) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2+n)\sigma^2}{2r} w(r, \sigma, n+2). \quad (14)$$

- **Sombreamento Conjunto:** A partir da Equação (10), e depois de algumas manipulações algébricas, a distribuição de fase é obtida de forma exata como:

$$f_\Theta(\theta) = \frac{1}{2\pi}. \quad (15)$$

A densidade da envoltória aparece em fórmula fechada como:

$$f_R(r) = \frac{2r}{\sigma^2} K_0 \left(\frac{\sqrt{2}r}{\sigma} \right), \quad (16)$$

com a CDF dada por:

$$F_R(r) = 1 - \frac{\sqrt{2}r}{\sigma} K_1 \left(\frac{\sqrt{2}r}{\sigma} \right). \quad (17)$$

C. Formato das Distribuições

A Figura 1 mapeia a densidade de probabilidade da fase para ambas as abordagens. No regime Individual, a fase deixa de ser uniforme, indicando perda de simetria rotacional. No regime Conjunto, a fase permanece uniforme, pois a flutuação atua igualmente sobre o cluster.

A Figura 2 compara as densidades e distribuições acumuladas para ambas as abordagens e também inclui aquela de Rayleigh. Note-se que ambos os modelos aqui obtidos concentram a massa de probabilidade mais para a esquerda comparativamente àquela de Rayleigh evidenciando uma maior deterioração do canal. Esse deslocamento indica maior probabilidade de baixos valores de envoltória, isto é, maior ocorrência de desvanecimentos profundos. Dentre as duas abordagens mostradas aqui, a maior deterioração ocorre para o sombreamento conjunto.

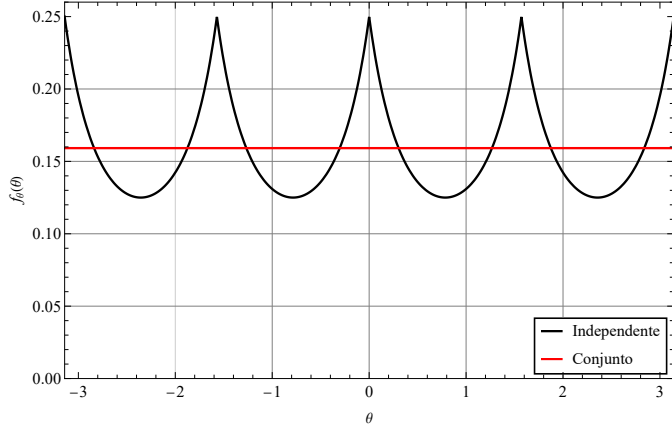


Fig. 1. PDF da fase para ambas as abordagens. A oscilação da densidade comprova a quebra da simetria rotacional e a perda de uniformidade do canal difuso clássico.

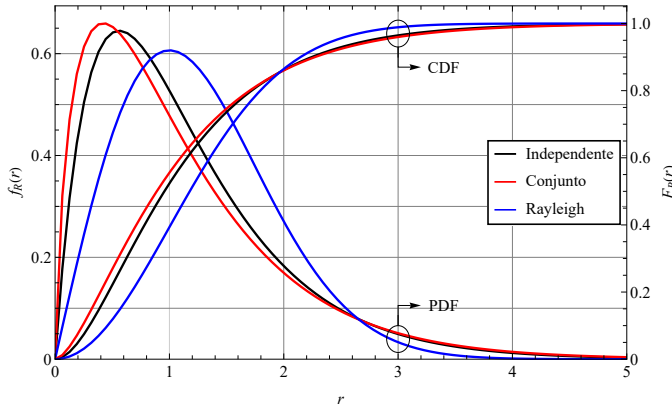


Fig. 2. Comparação das estatísticas da envoltória: o modelo de sombreamento conjunto vs. o modelo individual vs. o de Rayleigh.

V. ANÁLISE DE DESEMPENHO

A. BER

A severidade da envoltória afeta diretamente a BER. Para o canal Gaussiano, a BER é dada como:

$$P(\rho) = \frac{\Gamma(b, a\rho)}{2\Gamma(b)} \quad (18)$$

[1, Eq. (8.100)] em que $\Gamma(\cdot, \cdot)$ denota a função gama incompleta superior [9, Eq. (6.5.3)], a e b são determinados de acordo com a modulação e esquema de detecção, e $\rho = \bar{\gamma}r^2/\mathbb{E}[R^2]$ é relação sinal ruído instantânea com média $\bar{\gamma}$ e $\mathbb{E}[R^2]$ sendo o segundo momento da envoltória. A BER em um canal de desvanecimento é obtida pela BER média sob a PDF do canal.

- **Sombreamento Individual:** Para o sombreamento individual a BER é dada por:

$$\bar{P} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (a\bar{\gamma})^{-1-\frac{n}{4}}}{2\Gamma(b)\Gamma(1+\frac{n}{2})} G_{2,3}^{2,2} \left(\frac{1}{a\bar{\gamma}} \middle| \begin{matrix} -b-\frac{n}{4}, \frac{n+2}{4} \\ \frac{n}{4}, \frac{n+2}{4}, -\frac{n}{4}-1 \end{matrix} \right) \quad (19)$$

em que $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ denota a função G de Meijer [10, Eq. (8.2.1)]. Para SNR média alta o comportamento

aproxima-se de:

$$\hat{P} = \frac{\pi b}{2a\bar{\gamma}}. \quad (20)$$

- **Sombreamento Conjunto:** Para o sombreamento conjunto, a BER é dada por:

$$\bar{P} = \frac{1}{2\Gamma(b)} G_{2,3}^{2,2} \left(\frac{1}{a\bar{\gamma}} \middle| \begin{matrix} 1, 1-b \\ 1, 1, 0 \end{matrix} \right). \quad (21)$$

Para alta SNR, a BER tende a:

$$\hat{P} = \frac{b(\log(a\bar{\gamma}) - H_b - \gamma + 1)}{2a\bar{\gamma}}, \quad (22)$$

em que $\gamma \simeq 0.577$ é a constante de Euler [9, Eq. (6.1.3)] e $H_b = \sum_{n=1}^b 1/n$ é b -ésimo número harmônico.

B. Capacidade Ergódica do Canal

A capacidade ergódica de Shannon, definida como o valor esperado da taxa máxima de transmissão livre de erros, é dada por $C = E[B \log_2(1 + \rho)]$ em que B é a largura de banda e ρ é SNR média. A capacidade incondicional é formulada através da ponderação da capacidade do canal Gaussiano sobre a PDF do canal de desvanecimento.

- **Sombreamento Individual:** Para o sombreamento individual, a capacidade do canal é obtida como:

$$\bar{C} = B \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi \log_2 \left(1 + \frac{\bar{\gamma}r^2}{2\sigma^2} \right) f_{R,\Theta}(r, \theta) d\theta dr, \quad (23)$$

em que $f_{R,\Theta}(r, \theta)$ é a PDF conjunta fase envoltória em (9). Em um regime de SNR alta, a capacidade tende a:

$$\hat{C} = \frac{B(2 \log(\frac{\bar{\gamma}}{4}) - 4\gamma + \pi)}{\log(4)}. \quad (24)$$

- **Sombreamento Conjunto:** Para o sombreamento conjunto, a capacidade ergódica é obtida como:

$$\bar{C} = \frac{B}{\log(2)} G_{1,3}^{3,1} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}} \middle| \begin{matrix} 0 \\ 0, 0, 1 \end{matrix} \right). \quad (25)$$

Para um regime de alta SNR, a capacidade pode ser aproximada por:

$$\hat{C} = \frac{B(\log(\bar{\gamma}) - 2\gamma)}{\log(2)}. \quad (26)$$

A Figura 3 mostra a BER e a capacidade do canal para os cenários com Sombreamento Individual, Conjunto e sem sombreamento (Rayleigh). As métricas indicam claramente uma degradação do desempenho caracterizando um cenário menos favorável ao modelo clássico. Essa degradação é consistente com o aumento do AF, mostrando que a alteração estatística do canal afeta diretamente BER e capacidade.

VI. FIGURA DE DESVANECIMENTO

A fim de quantificar o nível de degradação estrutural imposto ao canal sob a flutuação exponencial investigada, recorre-se à Figura de Desvanecimento (*Amount of Fading* - AF). Esta métrica avalia a variância da potência instantânea normalizada pelo quadrado de sua média, sendo expressa em

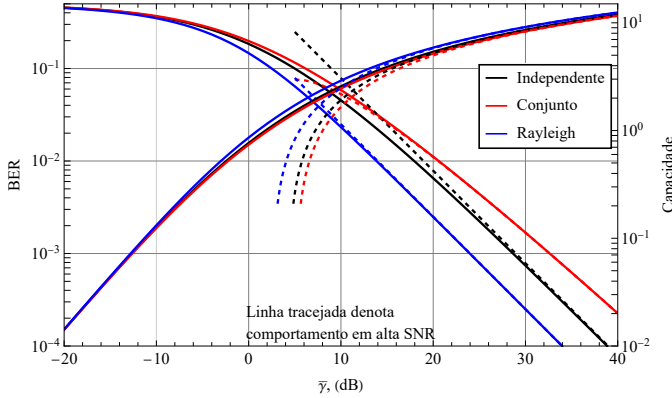


Fig. 3. BER para modulação BPSK com detecção coerente ($a = 1$, $b = 1/2$) em função da SNR média e capacidade do canal.

termos dos momentos de segunda e quarta ordem da envoltória R :

$$AF = \frac{E[R^4] - (E[R^2])^2}{(E[R^2])^2}. \quad (27)$$

Para um cluster de desvanecimento cuja potência média é conservada ($E[\xi] = 1$), a severidade do canal é determinada pela topologia de atuação do sombreamento sobre as componentes em fase e quadratura. Sob a premissa de sombreamento Exponencial Negativa ($E[\xi^2] = 2$), as estatísticas da envoltória divergem conforme o grau de correlação imposto pelo desvanecimento de larga escala:

- **Canal Rayleigh Clássico:** Corresponde ao cenário de ausência de sombreamento de larga escala. Utiliza-se esse modelo como *benchmark* para os demais modelos investigados aqui derivados desse. Neste regime difuso puro, os momentos resultam em $E[R^2] = 2\sigma^2$ e $E[R^4] = 8\sigma^4$, estabelecendo o limite inferior de severidade para o canal.

$$AF = \frac{8\sigma^4 - (2\sigma^2)^2}{(2\sigma^2)^2} = 1, 0. \quad (28)$$

- **Sombreamento Individual:** Quando as componentes ortogonais flutuam de forma independente, os momentos incondicionais da envoltória resultam em $E[R^2] = 2\sigma^2$ e $E[R^4] = 14\sigma^4$. Aplicando estes valores na Equação (27), obtém-se:

$$AF = \frac{14\sigma^4 - (2\sigma^2)^2}{(2\sigma^2)^2} = 2, 5. \quad (29)$$

- **Sombreamento Conjunto:** Caso o sombreamento atue de forma agregada sobre todo o cluster, as componentes tornam-se dependentes, elevando o momento de quarta ordem para $E[R^4] = 16\sigma^4$. Consequentemente, a severidade atinge seu patamar superior:

$$AF = \frac{16\sigma^4 - (2\sigma^2)^2}{(2\sigma^2)^2} = 3, 0. \quad (30)$$

Nota-se que o sombreamento sob flutuação Exponencial resulta em um cenário de desvanecimento maior que o de Rayleigh, já considerado crítico em ambientes de propagação.

A análise demonstra que a decorrelação entre as componentes ortogonais funciona como um mecanismo de diversidade implícita, mitigando o impacto do sombreamento severo

de $AF = 3, 0$ para $AF = 2, 5$. Assim, o regime Conjunto é o mais severo em termos de envoltória e desempenho, enquanto o regime Individual se destaca pela perda de uniformidade da fase.

VII. CONCLUSÕES

Este artigo proveu uma investigação analítica preliminar do impacto de um sombreamento Exponencial Negativo operando diretamente sobre o cluster de desvanecimento. Demonstrou-se que, no Sombreamento Individual, as componentes ortogonais colapsam para distribuições de Laplace, o que impõe perda de simetria rotacional e deformação estatística da fase, além da envoltória. No cenário Conjunto, observa-se maior deformação da envoltória, enquanto a fase permanece uniforme.

Em síntese, constata-se que: (i) no Sombreamento Individual, as componentes em fase e quadratura permanecem independentes e decorrelacionadas, enquanto fase e envoltória tornam-se dependentes, porém decorrelacionadas; (ii) no Sombreamento Conjunto, as componentes em fase e quadratura tornam-se dependentes, porém decorrelacionadas, enquanto fase e envoltória permanecem independentes e decorrelacionadas. Assim, o regime Individual se destaca pela perda de uniformidade da fase, ao passo que o regime Conjunto apresenta maior severidade da envoltória.

REFERÊNCIAS

- [1] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital communication over fading channels*, 2nd ed. Hoboken: NJ: Wiley, 2004.
- [2] N. Simmons, C. R. N. D. Silva, S. L. Cotton, P. C. Sofotasios, S. K. Yoo, and M. D. Yacoub, "On shadowing the κ - μ fading model," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 120 513–120 536, 2020.
- [3] A. Melo, M. D. Yacoub, and C. R. N. da Silva, "Efeito do sombreamento no modelo η - μ complexo para $\mu = 1/2$ (hoyt)," *XL Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2022.
- [4] —, "Sobre a perturbação do parâmetro κ de rice," *XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2023.
- [5] —, "Flutuação dos parâmetros de desvanecimento de rice e hoyt," *XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2024.
- [6] C. R. N. da Silva and M. D. Yacoub, "Rice e hoyt: Parâmetros sob uma abordagem via razão de uniformes," *XLIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2025.
- [7] T. A. Moreira de Bairos, M. B. Loscilia, A. P. de Oliveira, D. C. de Souza e Silva, R. A. A. de Souza, and M. D. Yacoub, "The μ process type i," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 3, pp. 510–514, 2020.
- [8] M. Yacoub, G. Fraidenraich, and J. S. Filho, "Nakagami-m phase-envelope joint distribution," *Electronics Letters*, vol. 41, pp. 259–261, 2005.
- [9] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions: With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. New York: Dover Publications, Incorporated, 1972.
- [10] A. Prudnikov, *Integrals and Series: Volume 3: More Special Functions*. Gordon & Breach Science Publishers, 1990.