

Rice e Hoyt: Parâmetros sob uma Abordagem Via Razão de Uniformes

Carlos Rafael Nogueira da Silva e Michel Daoud Yacoub

Resumo—A variabilidade espaço-temporal dos parâmetros de desvanecimento em modelos que descrevem a propagação de sinais em ambientes sem fio é amplamente reconhecida na literatura como um processo aleatório. No entanto, os impactos diretos dessa flutuação sobre as características estatísticas do sinal recebido permanecem pouco investigados. Tais variações podem explicar, por exemplo, por que determinados modelos ajustam-se adequadamente à envoltória do sinal, mas não à sua fase, ou o contrário. Neste trabalho, são examinados os impactos dessas flutuações nos modelos de desvanecimento de Rice e Hoyt, considerando que a amplitude da componente dominante (Rice) e das espalhadas (Rice e Hoyt), compondo os parâmetros κ (Rice) e η (Hoyt) variam segundo uma distribuição uniforme. A distribuição uniforme modela uma situação crítica em que esses parâmetros podem assumir quaisquer valores dentro do intervalo com igual probabilidade.

Palavras-Chave—Modelo de Rice, modelo de Hoyt, desvanecimento, flutuação de parâmetros

Abstract—The spatio-temporal variability of fading parameters in models describing signal propagation in wireless environments is widely recognized in the literature as a random process. However, the direct impacts of such fluctuations on the statistical characteristics of the received signal remain underexplored. These variations may explain, for instance, why certain models fit the signal envelope well but not its phase, or vice versa. This work examines the impact of these fluctuations on the Rice and Hoyt fading models, assuming that the amplitude of the dominant component (Rice) and of the scattered components (Rice and Hoyt), which form the parameters κ (Rice) and η (Hoyt), vary according to a uniform distribution. The uniform distribution models a critical scenario in which these parameters can assume any value within the interval with equal probability.

Keywords—Rice distribution. Hoyt distribution, parameter fluctuation

I. INTRODUÇÃO

Embora, em medidas de campo, a separação entre desvanecimento de longo prazo e curto prazo seja um processo largamente explorado, na prática, por não ser possível obter de forma exata os intervalos sobre os quais as filtragens devem operar, empirismo e traquejo permeiam tal processo. Assim, incerteza na obtenção do valor exato dos parâmetros pode ocorrer. Da mesma forma, embora o desempenho dos sistemas de comunicações sem fio seja avaliado supondo-se ambientes estacionários, na prática, a não-estacionaridade constitui um fenômeno óbvio, já que o ambiente de propagação, em geral, muda constantemente. Assim, investigar o efeito da variabilidade dos parâmetros e da não-estacionaridade do meio torna-se

uma investigação de interesse. Entre longo prazo e curto prazo, as investigações se concentram na última, já que é nela que técnicas de melhoria de desempenho são aplicadas. O desvanecimento causado por multipercursos é modelado por estatísticas diversas dependendo dos fenômenos físicos impostos pelo ambiente. Assim, um ambiente de propagação provocando multipercursos, singular ou em *clusters*, com ou sem a presença de componente dominante, linear ou não, ou com fenômenos combinados pode ser descrito pelas estatísticas Rayleigh, Rice, Hoyt, Weibull, Nakagami- m , α - μ , η - μ , κ - μ , α - η - κ - μ , dentre as principais.

Embora a modelagem clássica dos canais considere um cenário estacionário, essa suposição raramente se sustenta em contextos reais. Ainda assim, ela é amplamente utilizada por facilitar o projeto e a análise de desempenho dos sistemas. Em ambientes não estacionários, os parâmetros que caracterizam o desvanecimento flutuam com o espaço e o tempo, o que impacta diretamente a validade das análises teóricas.

Diversos estudos já documentaram a variabilidade dos parâmetros de desvanecimento. Em [1], foi relatado que o parâmetro κ da distribuição de Rice apresenta uma distribuição lognormal. Da mesma forma, [2] analisou a variabilidade do parâmetro m no modelo de Nakagami, utilizando medidas estatísticas como média, variância e histogramas. Em outra abordagem, [3] investigou a instabilidade dos parâmetros da distribuição α - μ , concluindo que esses também podem seguir uma distribuição do mesmo tipo.

Análises mais recentes passaram a investigar os efeitos de perturbações diretamente nos parâmetros das distribuições. Em [4], foi considerada uma perturbação exponencial no parâmetro κ da distribuição de Rice, Já [5] explorou a influência de uma perturbação uniforme no parâmetro η do modelo Hoyt, associado à correlação entre as componentes em fase e quadratura. Além disso em [6], explorou-se o efeito da flutuação dos parâmetros seguindo uma distribuição Gama.

Neste artigo, investiga-se o impacto da flutuação dos parâmetros κ (Rice) e η (Hoyt), quando estes seguem uma distribuição derivada do quadrado da razão entre variáveis independentes e uniformemente distribuídas. Essa distribuição é obtida, supondo-se que a amplitude da componente dominante (Rice) e das componentes espalhadas (Rice e Hoyt) seguem uma uniforme. Note-se que os parâmetros κ de Rice e η de Hoyt são dados pela razão de potências de componentes dominante-espalhada (Rice) e espalhada-fase_espalhada-quadratura (Hoyt). Além disso, esses parâmetros, na prática, flutuam em uma faixa limitada. Até onde se tem conhecimento, a utilização da distribuição uniforme para modelar efeitos de somreamento ainda foi pouco explorada na literatura. Por

outro lado, aplicações da distribuição uniforme em diferentes contextos de comunicação sem fio já foram investigadas em [7]–[10]. Além disso, a distribuição uniforme já foi proposta como uma alternativa para representar dados com caudas pesadas [11]. Em canais de comunicação sem fio, os efeitos de somreamento podem provocar flutuações significativas na intensidade do sinal, e distribuições com caudas pesadas têm se mostrado mais adequadas para capturar essa variabilidade.

Neste trabalho, serão conduzidas análises teóricas da função densidade de probabilidade (PDF - *probability density function*) da envoltória e da fase, da função distribuição de probabilidade (CDF - *cumulative distribution function*) da envoltória, bem como da figura de desvanecimento (AF - *amount of fading*) e da taxa de erro de bit (BER - *bit error ratio*). As principais contribuições deste estudo incluem:

- Derivação do comportamento em alta relação sinal ruído (SNR - *signal to noise ratio*) média da PDF e CDF da envoltória para Rice e Hoyt.
- Derivação da PDF da fase para Hoyt em formulação fechada;
- Derivação da AF para os dois modelos;
- Comportamento em regime de alta SNR média para BER;

II. PRELIMINARES

A. Modelo de Desvanecimento Rice

Seja $Z = R \exp(j\Theta)$ um sinal que segue o modelo de desvanecimento Rice, em que $R > 0$ é a envoltória de Z , $-\pi < \Theta < \pi$ é a sua fase, e $j = \sqrt{-1}$. A PDF da envoltória R é dada por

$$f_{R|\kappa}(r|\kappa) = \frac{2(1+\kappa)}{\exp(\kappa)} \frac{r}{\hat{r}^2} e^{-\frac{(1+\kappa)r^2}{\hat{r}^2}} I_0 \left(\frac{2\sqrt{\kappa(1+\kappa)}r}{\hat{r}} \right), \quad (1)$$

em que $\hat{r}^2 = \mathbb{E}[R^2]$ é o valor médio quadrático (rms - *root mean square*), $\kappa > 0$ é a razão entre a potência da componente dominante pela potência da componente espalhada, e $I_\nu(x)$ é a função Bessel modificada do primeiro tipo e ordem ν [12, Eq. (9.6.10)]. A PDF da fase Θ é dada por

$$f_{\Theta|\kappa}(\theta|\kappa) = \frac{\exp(-\kappa)}{2\pi} + \frac{\sqrt{\kappa} \cos(\theta - \phi)}{2\sqrt{\pi}} \times e^{-\kappa \sin^2(\theta - \phi)} \operatorname{erfc}(-\sqrt{\kappa} \cos(\theta - \phi)), \quad (2)$$

em que ϕ é um parâmetro de fase que depende do desbalanceamento das componentes dominantes. O AF é definido como a razão entre a variância da potência ($\mathbb{E}[R^4] - \mathbb{E}[R^2]^2$) pelo quadrado da potência ($\mathbb{E}[R^2]^2$), ou seja, a variância normalizada da potência. Assim,

$$\text{AF}_\kappa = \frac{2\kappa + 1}{(\kappa + 1)^2}. \quad (3)$$

B. Modelo de Desvanecimento Hoyt

Seja $Z = R \exp(j\Theta)$ um sinal que segue o modelo de desvanecimento Hoyt com envoltória $R > 0$ e fase $-\pi < \Theta < \pi$. A PDF da envoltória é dada por

$$f_{R|\eta}(r|\eta) = \frac{1+\eta}{\sqrt{\eta}} \frac{r}{\hat{r}^2} e^{-\frac{(\eta+1)r^2}{4\eta\hat{r}^2}} I_0 \left(\frac{r^2(1-\eta^2)}{4\eta\hat{r}^2} \right), \quad (4)$$

em que \hat{r} é o valor rms, e η é a razão entre a potência da componente em fase pela potência da componente em quadratura. A PDF da fase é dada por

$$f_{\Theta|\eta}(\theta|\eta) = \frac{\sqrt{\eta}}{\pi(1+\eta+(1-\eta)\cos(2\theta))}. \quad (5)$$

A AF é obtida como

$$\text{AF}_\eta = \frac{2(1+\eta^2)}{(1+\eta)^2}. \quad (6)$$

III. MODELO DE FLUTUAÇÃO DOS PARÂMETROS

Como justificado anteriormente, embora, em geral, os parâmetros dos modelos de desvanecimento sejam considerados constantes para efeito de estudos de desempenho de sistemas, na prática, eles sofrem flutuações aleatórias causadas primordialmente pela não-estacionariedade do meio de propagação. Assim, investigar os efeitos dessas flutuações torna-se um tema de interesse. No concernente a parametrização, os modelos de desvanecimento podem apresentar-se representados de várias formas, de acordo com a necessária conveniência. Por exemplo, as formulações ora aparecem escritas em função de parâmetros que deram origem ao modelo físico, ora em função de parâmetros introduzidos que melhor expressam o entendimento dos fenômenos resultantes. Este último é o caso aqui explorado. Observa-se, no entanto, que, para se definir o modelo estocástico apropriado para tal, levar-se-á em conta a relação entre os parâmetros que dão origem ao referido modelo de desvanecimento. Tanto em Rice quanto em Hoyt, os parâmetros são definidos como a razão entre dois outros, considerados aleatórios. Em ambos, também, a razão é expressa em termos de potências. A fim de se investigarem situações críticas, considera-se que as amplitudes dos parâmetros individuais compondo a respectiva razão de potências seguem distribuições uniformes.

Sejam X e Y duas variáveis independentes e uniformemente distribuídas no intervalo $[a, b]$, com $b > a > 0$ e $T = \sqrt{c}X/Y$, em que c é um fator de escala para controle do valor médio. Assim, a PDF de T é dada por

$$f_T(t) = \begin{cases} \frac{u^2c-t^2}{2(u-1)^2\sqrt{ct^2}} & \sqrt{c} < t < u\sqrt{c} \\ \frac{u^2t^2-c}{2(u-1)^2\sqrt{ct^2}} & \frac{\sqrt{c}}{u} < t \leq \sqrt{c} \end{cases} \quad (7)$$

em que $u = b/a$. A CDF dessa razão é obtida diretamente da definição como

$$F_T(t) = \begin{cases} 0 & t < \frac{\sqrt{c}}{u} \\ \frac{(\sqrt{c}-tu)^2}{2\sqrt{ct}(u-1)^2} & \frac{\sqrt{c}}{u} < t \leq \sqrt{c} \\ \frac{2\sqrt{ct}(1+u^2)-(t+u\sqrt{c})^2}{2\sqrt{ct}(u-1)^2} & \sqrt{c} < t \leq u\sqrt{c} \\ 1 & t > u\sqrt{c} \end{cases} \quad (8)$$

Por fim, os momentos de ordem superior são obtidos como

$$\mathbb{E}[T^n] = \frac{c^{n/2}(u^n - u)(u - u^{-n})}{(n^2 - 1)(u - 1)^2} \quad (9)$$

Agora, os parâmetros desvanecimento podem ser modelados como a razão das potências de X e Y . Seja $Z = T^2$. Então a

PDF de Z é obtida como

$$f_Z(z) = \begin{cases} \frac{u^2 c - z}{4(u-1)^2 \sqrt{cz^{3/2}}} & c < z < u^2 c \\ \frac{u^2 z - c}{4(u-1)^2 \sqrt{cz^{3/2}}} & \frac{c}{u^2} < z < c \end{cases} \quad (10)$$

Novamente, pode-se obter a CDF da definição como

$$F_Z(z) = \begin{cases} 0 & z \leq \frac{c}{u^2} \\ \frac{(\sqrt{c} - u\sqrt{z})^2}{2(u-1)^2 \sqrt{cz}} & \frac{c}{u^2} < z \leq c \\ \frac{2\sqrt{zc}(1+u^2) - (u\sqrt{c} + \sqrt{z})^2}{2(u-1)^2 \sqrt{cz}} & c < z \leq cu^2 \\ 1 & z > cu^2 \end{cases} \quad (11)$$

Os momentos de Z são dados como

$$\mathbb{E}[Z^n] = \frac{c^n (1 - u^{1-2n}) (u^{2n+1} - 1)}{(4n^2 - 1) (u - 1)^2} \quad (12)$$

IV. MÉTRICAS ESTATÍSTICAS DESCONDICIONADAS

Seja uma métrica estatística parametrizada, $(M_{Z|\Delta}(z|\delta))$, com um parâmetro Δ de modo que tal parâmetro flutue seguindo alguma distribuição de probabilidade com PDF $f_\Delta(\delta)$, $p \leq \delta \leq q$. A métrica descondicionada é obtida como $M_Z(z) = \int_p^q M_{Z|\Delta}(z|\delta) f_\Delta(\delta) d\delta$. Ressalte-se que as estatísticas de Rice e Hoyt aqui apresentadas, i.e., PDF, CDF, e AF estão condicionadas aos respectivos parâmetros de desvanecimento κ e η , considerados, portanto, variáveis aleatórias. Nas respectivas estatísticas essas variáveis são substituídas por Δ e descondicionadas com $f_\Delta(\delta)$ para produzir uma estatística média. A fim de se investigar essas estatísticas em termos dos parâmetros de desvanecimento dos modelos, definem-se $\bar{\kappa}$ e $\bar{\eta}$ como a média da distribuição descondicionante, i.e., $\mathbb{E}[Z]$. Dessa forma, o parâmetro de deslocamento de $f_\Delta(\delta)$ pode ser colocado em termos desses parâmetros de desvanecimento médios.

A. Desvanecimento Rice

Dadas as considerações anteriores

$$c = \frac{3u\bar{\kappa}}{u^2 + u + 1}, \quad (13)$$

1) *PDF da Envoltória*: Seja a PDF da envoltória em (1) uma métrica condicionada ao parâmetro κ que flutua seguindo a PDF (10), com c dado em (13). A PDF média da envoltória Rice é, assim, obtida em termos dos parâmetros de desvanecimento $\bar{\kappa}$ e do formato da descondicionante u . Infelizmente, não há uma forma alternativa conveniente para expressar essa integral. Contudo, é possível obter o comportamento assintótico dessa PDF média como

$$\tilde{f}_R(r) = \Upsilon \frac{r}{\hat{r}^2}, \quad (14)$$

em que Υ é uma constante que depende de u e $\bar{\kappa}$ dada em (15) no topo da próxima página em que c é definido em (13).

2) *CDF da Envoltória*: Da mesma forma que a PDF, não há uma forma conveniente de expressar a integral de descondicionamento, mas o comportamento assintótico é alcançado como $\tilde{F}_R(r) = \tilde{f}_R(r^2)/2$ com $\tilde{f}_R(r)$ dado em (14).

3) *PDF da Fase*: A PDF média da fase é obtida de forma similar com as formulações pertinentes, mas, antes não há uma representação alternativa conveniente para ela.

4) *Figura de Desvanecimento*: A AF média é obtida em fórmula fechada como a seguir

$$\text{AF} = \frac{1}{4} - \frac{(3+c)(1+u^2)\cot^{-1}(\sqrt{c})}{4(u-1)^2\sqrt{c}} + \frac{(3+u^2c)\cot^{-1}(u\sqrt{c})}{4(u-1)^2\sqrt{c}} + \frac{(c+3u^2)\tan^{-1}\left(\frac{u}{\sqrt{c}}\right)}{4(u-1)^2\sqrt{c}} \quad (16)$$

Ressalte-se que o parâmetro c nessa fórmula, de fato, é escrito por conveniência de representação, mas a AF deve ser entendida como sendo dada em função de $\bar{\kappa}$ e u .

5) *BER*: A BER média P em um canal de desvanecimento é obtida como $P = \int_0^\infty P(\gamma) f_\Gamma(\gamma) d\gamma$, em que $P(\gamma)$ é a BER no canal Gaussiano e $\gamma = \bar{\gamma}R^2/\mathbb{E}[R^2]$ em que R é a envoltória, γ e $\bar{\gamma}$ são as SNR instantânea e média respectivamente. Para modulações binárias, $P(\gamma) = \Gamma(q, w\gamma)/(2\Gamma(q))$ em que q e w variam com a modulação e método de detecção. Aqui também, não é possível obterem-se formulações alternativas. Contudo o comportamento em alta SNR média é factível através da PDF assintótica da SNR (14) o que leva a uma formulação simples. Assim, $\tilde{P} = \tilde{f}_R(\hat{r}^2/\bar{\gamma})q/(4w)$ com $\tilde{f}_R(r)$ dado em (14).

B. Desvanecimento Hoyt

Dadas as considerações anteriores

$$c = \frac{3u\bar{\eta}}{u^2 + u + 1} \quad (17)$$

Para o modelo de Hoyt, PDF e CDF da envoltória e BER médias também aparecem na forma assintótica apenas. Já a PDF da fase e AF médias são obtidas em fórmulas fechadas. Seguindo como anteriormente para Rice, os resultados seguintes se aplicam.

1) *PDF da Envoltória*: A PDF assintótica é dada por:

$$\tilde{f}_R(r) = \frac{(1+c)(1+u)\log(u)}{2(u-1)\sqrt{c}} \frac{r}{\hat{r}^2}. \quad (18)$$

2) *CDF da Envoltória*: O comportamento assintótico da CDF é obtido como $\tilde{F}_R(r) = \tilde{f}_R(r^2)/2$, em que $\tilde{f}_R(r)$ é dado em (18)

3) *PDF da Fase*: A PDF média da fase Hoyt é dada como em (19) no topo da próxima página.

4) *Figura de Desvanecimento*: A AF média de Hoyt é obtida como

$$\text{AF} = 3 - \frac{(c-1)(1+u^2)\cot^{-1}(\sqrt{c})}{(u-1)^2\sqrt{c}} + \frac{(u^2c-1)\cot^{-1}(u\sqrt{c})}{(u-1)^2\sqrt{c}} + \frac{(c-u^2)\tan^{-1}\left(\frac{u}{\sqrt{c}}\right)}{(u-1)^2\sqrt{c}} \quad (20)$$

5) *BER*: Em regime de SNR média alta, o comportamento da BER é dado por $\tilde{P} = \tilde{f}(\hat{r}^2/\bar{\gamma})q/(4w)$

$$\Upsilon = \frac{3\sqrt{\pi}}{4(u-1)^2\sqrt{c}} \left(\operatorname{erf}(\sqrt{c})(1+u^2) \left(1 + \frac{2c}{3}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{c}}{u}\right) \left(u^2 + \frac{2c}{3}\right) - \operatorname{erf}(u\sqrt{c}) \left(1 + \frac{2u^2c}{3}\right) + \frac{2\sqrt{c}}{3\sqrt{\pi}} \left(e^{-c}(1+u^2) - u \left(e^{-u^2c} + e^{-\frac{c}{u^2}} \right) \right) \right) \quad (15)$$

$$f_{\theta}(\theta) = \frac{\csc^2(\theta)}{8\pi(u-1)^2\sqrt{c}} \left(u^2 \log \left(\frac{u^2(1+c\tan^2(\theta))}{u^2+c\tan^2(\theta)} \right) + \log \left(\frac{1+c\tan^2(\theta)}{1+u^2c\tan^2(\theta)} \right) - c\tan^2(\theta) \left(\log \left(\frac{u^2+c\tan^2(\theta)}{1+c\tan^2(\theta)} \right) + u^2 \log \left(\frac{1+u^2c\tan^2(\theta)}{u^2(1+c\tan^2(\theta))} \right) \right) \right) \quad (19)$$

V. RESULTADOS

As Figuras 1, 2, 3, e 4 mostram as estatísticas médias normalizadas de Rice, i.e., PDF da envoltória, a PDF da fase, a AF, e a BER (BPSK e detecção coerente - $q = 1/2$, $w = 1$) $\bar{\kappa} = 10$, e $u = \{1.5, 5, 100, 1000\}$.

Nas Figuras 2 e 3, o pontilhado denota a curva da Rice condicional. Observa-se que as curvas para o mesmo κ , as curvas da Rice descondicionada vão de Rice condicional (u tendendo a 1) a Rayleigh (u tendendo a infinito). De particular interesse é a condição de desvanecimento (AF) que pode ir de muito favorável (κ grande para $u > 1$) a pouco favorável (u muito grande para qualquer κ).

As Figuras 5, 6, 7, e 8 mostram as estatísticas médias normalizadas de Hoyt, i.e., PDF da envoltória, a PDF da fase, a AF, e a BER (BPSK e detecção coerente - $q = 1/2$, $w = 1$) $\bar{\eta} = 2$, e $u = \{1.5, 5, 100, 1000\}$. Na Figura 6, o pontilhado denota a curva da Hoyt condicional. Observa-se que as curvas para o mesmo η , as curvas da Hoyt descondicionada vão de Hoyt condicional (u tendendo a 1) a Semi-Gaussiana (u tendendo a infinito). De particular interesse é a condição de desvanecimento (AF) que pode ir de muito desfavorável (u tendendo a infinito para qualquer valor de η) a pouco favorável ($u = 1$ para qualquer η).

VI. CONCLUSÕES

O efeito da flutuação dos parâmetros de desvanecimento, como consequência principalmente da não-estacionaridade do meio de propagação, dos ambientes Rice (κ) e Hoyt (η) foram analisados. Postulou-se que essas flutuações seguem uma distribuição dada pela razão de duas variáveis uniformes, para a qual algumas justificativas foram apresentadas. Para o caso Rice, observa-se que as estatísticas resultantes variam da Rice original para a Rayleigh. Para o caso Hoyt, observa-se que as estatísticas resultantes variam da Hoyt original para a Semi-Gaussiana. Conclui-se, assim, que um mesmo κ leva a estatísticas que divergem daquelas das de Rice com mesmo κ . Da mesma forma, para um mesmo η , as estatísticas resultantes podem divergir daquelas das de Hoyt com o mesmo η .

REFERÊNCIAS

- [1] L. J. Greenstein, S. S. Ghassemzadeh, V. Erceg, and D. G. Michelson, "Ricean k -factors in narrow-band fixed wireless channels: Theory, experiments, and statistical models," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 4000–4012, 2009.
- [2] L. Rubio, J. Reig, and N. Cardona, "Evaluation of nakagami fading behaviour based on measurements in urban scenarios," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 61, no. 2, pp. 135–138, 2007. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841106000537>
- [3] A. Krishnan, C. L. Selvati, U. S. Dias, and M. D. Yacoub, "On the statistics of the fading parameters of the α - μ distribution: Field trials and validation," in *2012 National Conference on Communications (NCC)*, 2012, pp. 1–5.

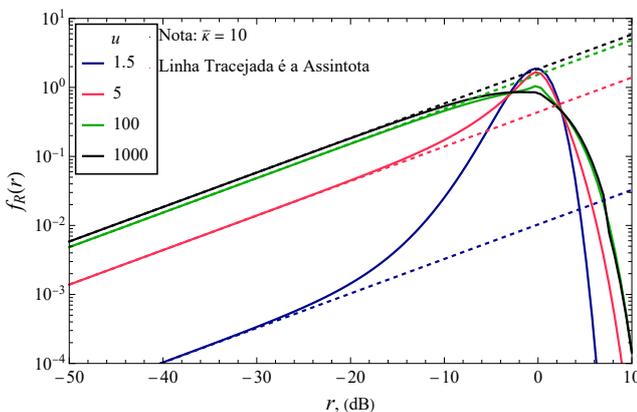


Fig. 1. PDF da envoltória Rice para $\bar{\kappa} = 10$.

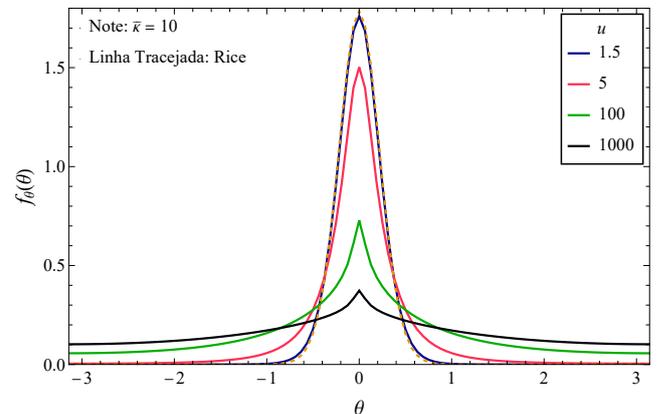


Fig. 2. PDF da fase de Rice para $\bar{\kappa} = 10$.

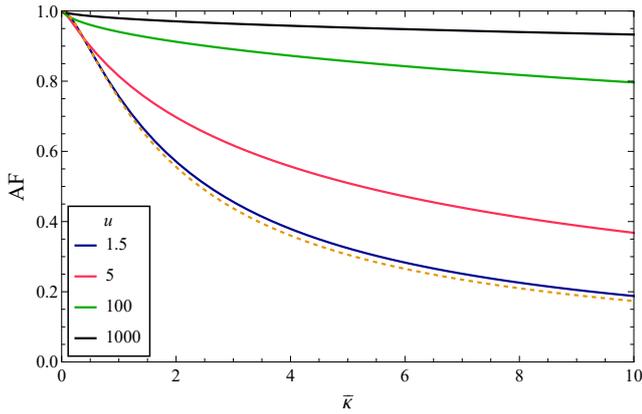


Fig. 3. Figura de desvanecimento para alguns valores de u .

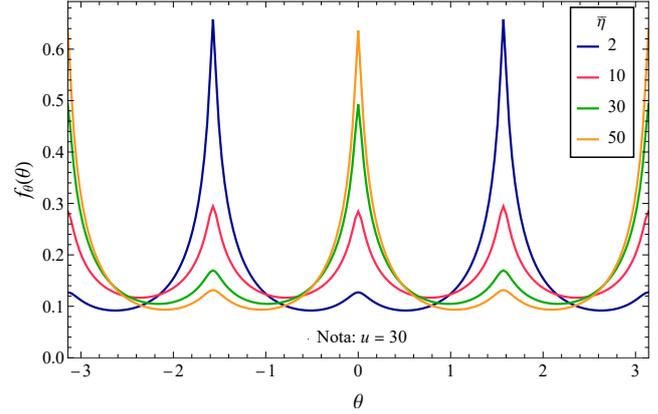


Fig. 6. PDF da fase Hoyt descondicionada com $\bar{\eta} = 2$.

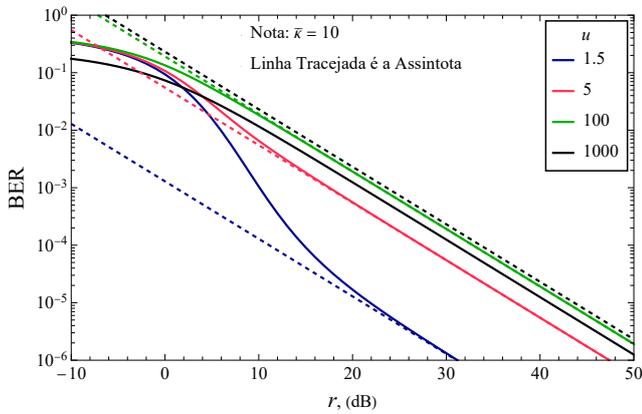


Fig. 4. BER para alguns valores de u e $\bar{\kappa} = 10$.

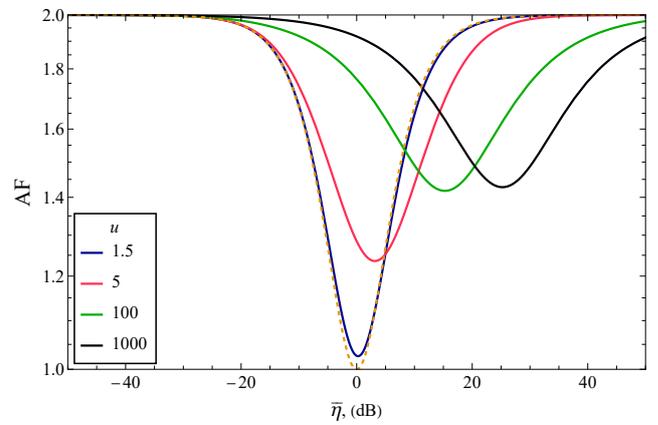


Fig. 7. Figura de desvanecimento da Hoyt para alguns valores e u

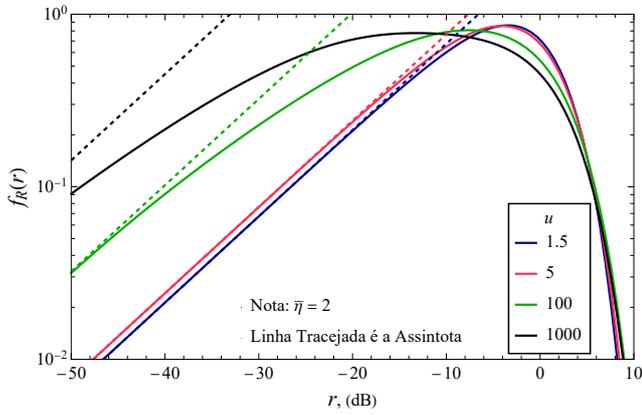


Fig. 5. PDF da envoltória Hoyt descondicionada com $\bar{\eta} = 2$.

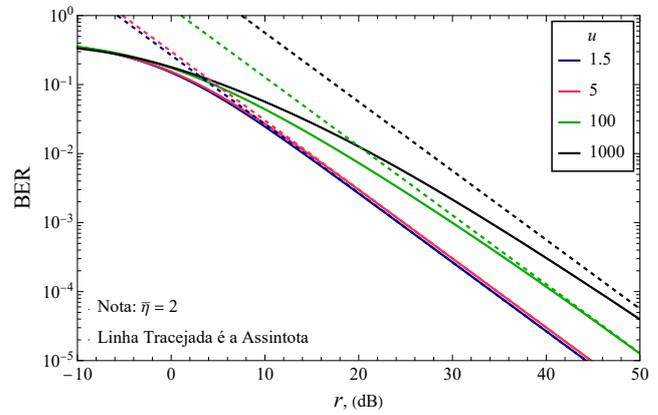


Fig. 8. BER para BPSK com detecção coerente em um canal Hoyt modulado.

[4] A. Melo, M. D. Yacoub, and C. R. N. da Silva, "Sobre a perturbação do parâmetro κ de rice," *XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2023.

[5] —, "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.

[6] —, "Flutuação dos parâmetros de desvanecimento de rice e hoyt," *XLIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2024.

[7] O. S. Badarneh and D. B. d. Costa, "Fluctuating nakagami-m fading distribution," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 13, no. 4, pp. 959–963, 2024.

[8] A. Maaref and R. Annavajjala, "The gamma variate with random shape parameter and some applications," *IEEE Communications Letters*,

vol. 14, no. 12, pp. 1146–1148, 2010.

[9] O. Kaya and M. İşleyen, "Power control in the cognitive cooperative multiple access channel," in *2012 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, 2012, pp. 1–5.

[10] G. J. Anaya-Lopez, G. Gomez, and F. J. Lopez-Martinez, "A product channel attack to wireless physical layer security," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 5, pp. 943–947, 2021.

[11] W. H. Rogers and J. W. Tukey, "Understanding some long-tailed symmetrical distributions," *Statistica Neerlandica*, vol. 26, no. 3, pp. 211–226, 1972.

[12] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*. Washington, DC: US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1972.