

Simulação e Caracterização Estatística de Canais de Desvanecimento do Tipo Fluctuating Two-Ray

Eduardo Gonçalves Gomes, Daniel de Paiva Mucin e Edgar Eduardo Benitez Olivo

Resumo—Neste trabalho, uma caracterização estatística do modelo de canal de desvanecimento *Fluctuating Two-Ray* (FTR) é realizada em termos da função densidade de probabilidade (PDF), e o desempenho de um sistema de comunicação sem fio ponto-a-ponto sujeito a esse tipo de desvanecimento é avaliado em termos da probabilidade de *outage*. O modelo FTR, proposto recentemente na literatura, é uma distribuição generalizada que tem recebido especial atenção, já que apresenta um excelente ajuste a medições de campo em uma ampla faixa de frequências, incluindo a faixa das ondas milimétricas. Por meio de rotinas de simulação, histogramas para o coeficiente de canal FTR são gerados, os quais são confrontados com a expressão analítica da PDF. O efeito do desvanecimento sobre a probabilidade de *outage* do sistema é avaliado por meio de simulações exaustivas de Monte Carlo em função dos parâmetros do modelo FTR.

Palavras-Chave—Canal de desvanecimento, comunicações mmWave, *Fluctuating Two-Ray*, probabilidade de *outage*.

Abstract—In this work, a statistical characterization of the *Fluctuating Two-Ray* (FTR) fading channel model is performed in terms of the probability density function (PDF), and the performance of a point-to-point wireless communication system subject to this kind of fading is assessed in terms of the outage probability. The FTR model, recently proposed in the literature, is a generalized distribution that has received special attention, since it presents an excellent fitting to field measurements in a wide range of frequencies, including that of the millimeter waves. Through simulation routines, histograms for the FTR channel coefficient are generated, which are compared to the analytical expression of the PDF. The effect of fading on the system outage probability is evaluated through exhaustive Monte Carlo simulations as a function of the FTR model parameters.

Keywords—Fading channel, *Fluctuating Two-Ray*, mmWave communications, outage probability.

I. INTRODUÇÃO

A demanda crescente por taxas de dados mais elevadas impõe a necessidade de uma maior largura de banda em sistemas de comunicação sem fio. Em virtude disso, a faixa de frequências de 24,25 a 52,60 GHz, correspondente às ondas milimétricas, referida como FR2 (*frequency range 2*), está sendo considerada no projeto e desenvolvimento das redes de quinta geração (5G), devido à ampla largura de banda disponível nessa faixa de frequência [1]. Por outro lado, devido às condições severas de propagação na referida faixa, o desvanecimento do canal é um dos principais fenômenos que afetam o desempenho de uma rede sem fio. Nesse contexto, o modelo de canal de desvanecimento de pequena escala *Fluctuating Two-Ray* (FTR), recentemente proposto em [1], tem mostrado

Eduardo Gonçalves Gomes, Daniel de Paiva Mucin e Edgar Eduardo Benitez Olivo, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista-SP, Brasil. E-mails: {eduardo.g.gomes, daniel.mucin, edgar.olivo}@unesp.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Proc. N° 2019/19935-6.

oferecer um melhor ajuste às flutuações experimentadas pelo canal na faixa das ondas milimétricas, em cenários com e sem linha de visada [2]. Neste trabalho, a caracterização estatística do modelo de desvanecimento FTR é realizada por meio da função densidade de probabilidade (PDF). Além disso, o desempenho de um sistema de comunicação sem fio ponto-a-ponto sujeito a esse tipo de desvanecimento é avaliado em termos da probabilidade de *outage*.

II. MODELO DE CANAL E PROBABILIDADE DE OUTAGE

De acordo com o modelo de desvanecimento FTR, o coeficiente complexo de canal é dado por [1]

$$h = \sqrt{\zeta}V_1\exp(j\phi_1) + \sqrt{\zeta}V_2\exp(j\phi_2) + X + jY, \quad (1)$$

em que V_1 e V_2 são as amplitudes das componentes especulares; ζ é uma variável aleatória com distribuição Gamma de média unitária e parâmetro m [1, eq. (3)], que caracteriza a flutuação dessas componentes; ϕ_1 e ϕ_2 são as fases das componentes especulares, com distribuição uniforme, tal que $\phi_1, \phi_2 \sim \mathcal{U}[0, 2\pi)$; e X e Y são variáveis aleatórias Gaussianas de média zero e variância σ^2 , isto é, $X, Y \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$, sendo que $X + jY$ caracteriza a componente difusa do desvanecimento FTR. O modelo FTR é expresso em função dos parâmetros K e Δ , em que $K = (V_1^2 + V_2^2)/2\sigma^2$ é a razão entre a potência média das componentes especulares e a potência média da componente difusa de multipercurso e $\Delta = 2V_1V_2/(V_1^2 + V_2^2)$ representa a similaridade entre as potências médias recebidas das componentes especulares. Ainda, o ganho médio do canal para o modelo FTR é dado por $\Omega = E[|h|^2] = 2\sigma^2(1 + K)$.

Em vista da complexidade do modelo em (1), uma aproximação para a PDF do coeficiente de canal do tipo FTR é dada por [1]

$$f_{|h|}(x) \approx 2x \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i}{2} [\mathcal{G}_m(x^2; \beta_1, K(1 - \delta_i)) + \mathcal{G}_m(x^2; \beta_1, K(1 + \delta_i))], \quad (2)$$

em que $\beta_1 = \frac{K+1}{\Omega}$; α_i e δ_i são coeficientes definidos em [1, eqs. (63) e (64)], respectivamente; e \mathcal{G}_m é dado por

$$\mathcal{G}_m(x; \beta_1, K) = \left(\frac{m}{K+m}\right)^m \beta_1 \exp\left(\frac{-\beta_1 m x}{K+m}\right) \times \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m-1}{n} \left(\frac{K\beta_1 x}{K+m}\right)^n \frac{1}{n!}. \quad (3)$$

A probabilidade de *outage*, definida como a probabilidade da SNR recebida do sistema, γ , estar abaixo de um dado limiar γ_{th} , é dada por $P_{out} = \Pr(\gamma < \gamma_{th})$, em que $\gamma = \Gamma|h|^2$, sendo Γ a SNR transmitida e $|h|^2$ o ganho instantâneo do canal. A partir da função distribuição acumulada (CDF) correspondente [1], uma aproximação para a probabilidade de

outage de um sistema sob desvanecimento do tipo FTR pode ser expressa como [1]

$$P_{\text{out}}(\gamma_{\text{th}}) \approx 1 - \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i}{2} [\mathcal{H}_m(\gamma_{\text{th}}; \beta_2, K(1 - \delta_i)) + \mathcal{H}_m(\gamma_{\text{th}}; \beta_2, K(1 + \delta_i))], \quad (4)$$

em que $\beta_2 = \frac{K+1}{\bar{\gamma}}$, sendo $\bar{\gamma} = E[\gamma]$; e \mathcal{H}_m é dado por

$$\mathcal{H}_m = \sum_{n=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-n-1} \frac{m^{m-n-1} K^{n+j}}{(m+K)^{m-1+j}} \beta_2^j \times \frac{(m-n-j)^n + j}{(n+j)!} \exp\left(\frac{-\beta_2 m \gamma_{\text{th}}}{m+K}\right) \gamma_{\text{th}}^j. \quad (5)$$

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma rotina de simulação foi implementada em Matlab para gerar instâncias aleatórias do coeficiente de canal do tipo FTR, de acordo com (1), a fim de caracterizar o histograma da PDF. Já o desempenho do sistema em termos da probabilidade de *outage* foi avaliado por meio de simulações, usando o método de Monte Carlo, e confrontado com a expressão em (4). A Fig. 1(a) apresenta o histograma para a PDF do coeficiente de canal do tipo FTR, enquanto que a Fig. 1(b) apresenta o desempenho de *outage* do sistema versus a SNR transmitida, para $m=2$ e 30. Assume-se que $K=30$ e $\Delta=0,9$. Na Fig. 1(a), note que, para $m=2$, a PDF apresenta unimodalidade, sendo composta por apenas um ponto de máximo. No entanto, para $m=30$ a PDF apresenta bimodalidade, ou seja, dois máximos, aproximadamente em $|h| \approx 0,5$ e $|h| \approx 1,25$. Logo, para $\Delta \rightarrow 1$ e valores elevados de K , quanto maior for o valor de m , mais prominente será a bimodalidade. Na Fig. 1(b), observe que conforme o valor de m aumenta, o desempenho do sistema melhora, devido ao fato de que m está atrelado ao grau de flutuação das componentes especulares, ao passo que quanto maior o valor de m , menos acentuadas são essas flutuações.

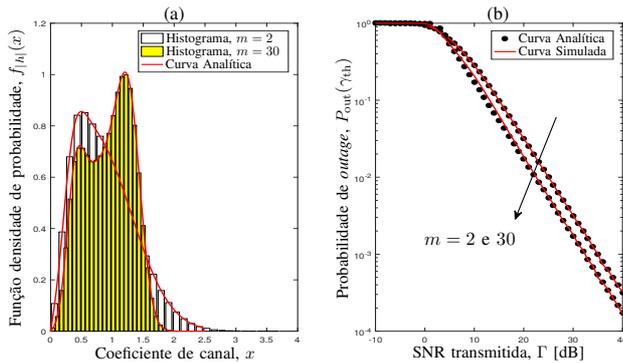


Fig. 1. (a) PDF do coeficiente de canal do tipo FTR e (b) probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, considerando $m=2$ e 30; $K=30$; $\Delta=0,9$.

Na Fig. 2(a), considera-se $K=10$ e 30, para $m=20$ e $\Delta=0,9$. Note que a variação de K também está atrelada à prominência da bimodalidade da PDF, sendo que, para $K=30$, é possível observar uma bimodalidade mais acentuada. Já na Fig. 2(b), observe que conforme o valor de K aumenta, o desempenho do sistema melhora.

As Figs. 3(a) e 3(b) ilustram o efeito do parâmetro Δ sobre a PDF e sobre o desempenho de *outage* do sistema, respectivamente, considerando $\Delta=0,1$ e $0,9$, para $m=10$ e $K=30$. Na Fig. 3(a), note que, para $\Delta=0,1$, a PDF apresenta

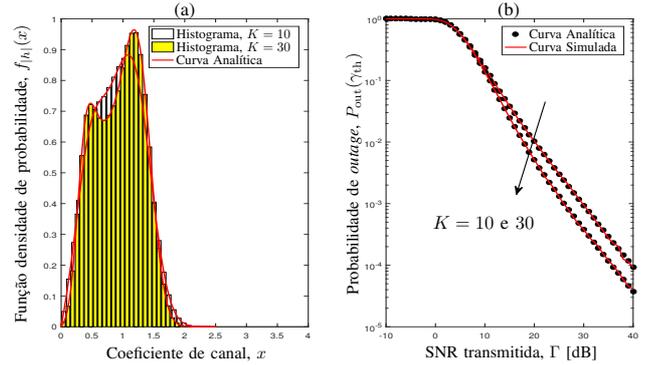


Fig. 2. (a) PDF do coeficiente de canal do tipo FTR e (b) probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, considerando $K=10$ e 30; $m=20$; $\Delta=0,9$. um comportamento unimodal e, para $\Delta=0,9$, apresenta um comportamento bimodal. Na Fig. 3(b), note que conforme o valor de Δ aumenta, o desempenho do sistema é deteriorado. Neste caso, uma vez que as componentes especulares apresentam potência similar ($\Delta \rightarrow 1$) e dominam o efeito de desvanecimento sobre a componente difusa ($K=30$), tem-se um efeito destrutivo similar àquele visto no modelo clássico de dois raios quando transmissor e receptor estão suficientemente afastados. Note que, para todos os cenários, existe perfeita correspondência entre os histogramas e as expressões analíticas.

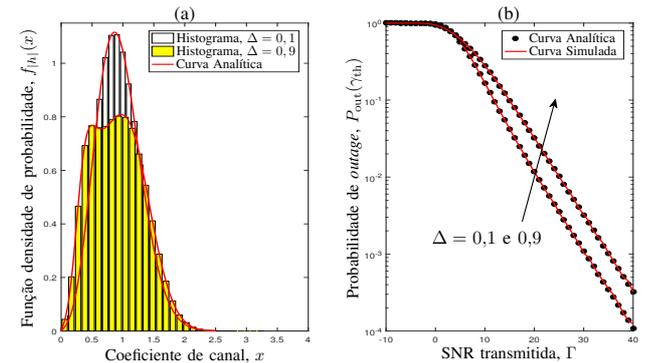


Fig. 3. (a) PDF do coeficiente de canal de tipo FTR e (b) probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, considerando $\Delta=0,1$ e $0,9$; $m=10$; $K=30$.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho, o modelo de canal de desvanecimento FTR foi caracterizado em termos de sua PDF, bem como o desempenho de um sistema de comunicação sem fio ponto-a-ponto sujeito a esse tipo de desvanecimento foi avaliado em termos da probabilidade de *outage*. Ao variar os parâmetros do modelo FTR, conclui-se que para $\Delta \rightarrow 1$ e valores elevados de K , a bimodalidade do modelo é acentuada, sendo que esse efeito é atenuado ao se diminuir o valor do parâmetro m . Em termos do desempenho de *outage* de um sistema ponto-a-ponto, constatou-se que quanto maiores os valores dos parâmetros m e K , melhor é o desempenho do sistema. Por outro lado, quanto maior o valor do parâmetro Δ , o desempenho do sistema é degradado.

REFERÊNCIAS

- [1] J. M. Romero-Jerez *et al.*, “The fluctuating two-ray fading model: Statistical characterization and performance analysis,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 7, pp. 4420-4432, Jul. 2017.
- [2] H. Hashemi *et al.*, “Analysis of equal gain combining over fluctuating two-ray channels with applications to millimeter-wave communications,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 2, pp. 1751-1765, Feb. 2020.