

# Metodologia de Caracterização de Canais com Desvanecimento Rápido

Deyvid L. Leite<sup>1</sup>, Millena M. de M. Campos<sup>1</sup>, Wellerson V. de Oliveira<sup>1</sup>,  
Pablo J. Alsina<sup>1</sup>, Alvaro A. M. de Medeiros<sup>2</sup>, Vicente A. de Sousa Jr.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC)  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) – Natal – RN – Brasil

{deyvidlucas,millenacampos,wellerson,pablo,vicente.sousa}@ufrn.edu.br

<sup>2</sup>Lab. de Telecomunicações Aplicadas - LTA  
Univ. Federal de Juiz de Fora (UFJF) – Juiz de Fora – MG – Brasil

alvaro@engenharia.ufjf.br

**Abstract.** *The second-order statistical features provide a dynamic expression of the fading channel and represent an important metric in the design analysis of wireless communication systems. This work presents an analytical framework for the evaluation of important second order statistical parameters, such as Level Crossing Rate (LCR) and the Average Fade Duration (AFD) of the Rayleigh-distributed mobile channel. A didactic experiment was carried out to determine the variation of Doppler scattering by second-order statistics in a Clarker-Rayleigh type mobile channel, and a survey of some second-order statistical distributions for classical models.*

**keywords:** *LCR, AFD, Doppler, Small Scale Fading.*

**Resumo.** *Recursos estatísticos de segunda ordem aplicados ao um canal com desvanecimento Doppler disponibilizam importantes métricas na análise de projetos dos sistemas de comunicação sem fio. Este trabalho apresenta um arcabouço analítico para a avaliação de parâmetros estatísticos de segunda ordem, como o Level Crossing Rate (LCR) e a Average Fade Duration (AFD) de canal móvel com distribuição Rayleigh. Adicionalmente, uma metodologia de caracterização do canal por meio de estatísticas de segunda ordem é apresentada, bem como um mapeamento das formulações analíticas para canais com outras distribuições além da Rayleigh. Tal metodologia se materializou em uma ferramenta de simulação, a qual foi usada para montar um experimento didático com objetivo de determinar a variação do espalhamento Doppler em um canal móvel com desvanecimento plano e rápido seguindo o modelo de Clarke. Os resultados evidenciam a adequação da formulação analítica para a caracterização do canal móvel.*

**Palavras-chave:** *LCR, AFD, Doppler, Desvanecimento de pequena escala.*

## 1. Introdução

Em canais móveis com desvanecimento de pequena escala, a comunicação pode ser interrompida devido à degradação repentina do sinal, sendo importante caracterizar o comportamento do desvanecimento para prever possíveis problemas e tomar ações preventivas

---

\*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

e corretivas. O desvanecimento de pequena escala descreve as variações de amplitude, fase e atraso causadas por múltiplos caminhos que o sinal percorre até o receptor [Rappaport 2009]. Adicionalmente, a mobilidade, seja das partes que se comunicam ou dos espalhadores ao seu redor, impõe o efeito *Doppler*, influenciando diretamente as variações rápidas de amplitude do sinal, quanto visto no domínio do tempo. Esse tipo de efeito passa a ser muito importante nas redes modernas de comunicação, principalmente para suprir o desejo de que veículos (terrestres e aéreos) possam se comunicar não só com outros veículos (V2V), mas também com infraestruturas próximas (V2I), com redes baseadas em internet (V2N), com pedestres (V2P), com ambientes em nuvem (V2C), com a estrada (V2R), com dispositivos (V2D) e até com a malha (elétrica) (V2G) [5G Americas 2018, Wang et al. 2019]. O conceito de V2X (do inglês, *Vehicle-to-Everything*) nasce devido à imensa diversidade de conexões que podem ser feitas com um veículo, as quais envolvem o efeito *Doppler* como uma barreira de confiabilidade da comunicação.

Para avaliações que envolvam caracterização de canal, à potência do sinal recebido é modelada incluindo a *perda de percurso* (em função da frequência da portadora e da distância entre transmissor e receptor), o *sombreamento log-normal* (para modelar os efeitos da difração do sinal em objetos grandes comparados ao comprimento de onda) e o efeito da variação rápida do canal por meio de modelos como o de Jakes [Jakes 1974] ou o de Clarke [Clarke 1968]. Já no processo de caracterização do canal, a série temporal que modela o sinal recebido é processada com objetivo de separar os efeitos do desvanecimento de larga (perda de percurso e sombreamento) e pequena escalas. Assim, os efeitos que envolvem a variação temporal devido à mobilidade podem ser caracterizados. A mesma metodologia pode ser aplicada a uma série temporal resultante de uma medição em campo, pela qual os parâmetros de um canal real podem ser extraídos.

Existem duas importantes estatísticas de segunda ordem usadas para caracterizar canais móveis: o *Level Crossing Rate* (LCR) e a *Average Fade Duration* (AFD). O LCR corresponde à frequência em que a intensidade da envoltória do sinal cruza um determinado limiar no sentido positivo e a AFD é o tempo médio que a envoltória fica abaixo de um limite predefinido [Parsons 1992]. Tais estatísticas destacam aspectos da variação temporal do sinal, os quais, como mencionado anteriormente, estão vinculados ao efeito *Doppler*. A análise destas estatísticas possibilita a caracterização do canal, bem como uma análise qualitativa do desempenho do sistema de comunicação. Por exemplo, a análise do AFD influencia na taxa de erro em canais com desvanecimento. Com AFD alto, pacotes de dados maiores estão mais propensos a serem recebidos com erro. Essa informação pode ajudar na especificação de codificadores de canal, taxa de transmissão, e esquemas de modulação [Abdi et al. 2000].

Simuladores de sistemas de comunicação são comumente usados em laboratórios, seja no momento de concepção de novos dispositivos ou em atividades didáticas voltadas a treinamentos técnicos ou ensino na academia. Eles tornam os testes de desempenho e escalabilidade menos custosos e mais reproduzíveis do que os ensaios de campo [Xiao et al. 2003]. Este trabalho apresenta uma ferramenta computacional para gerar e caracterizar canais móveis com desvanecimento plano e rápido.

Diversos métodos têm sido propostos para adquirir informações do *Doppler* por meio de processamento do sinal recebido. Por exemplo, em [Tsai and Yang 2009], é apresentado um estimador de máxima verossimilhança. Já em [Cao et al. 2007], um estimador baseado na transformada de Fourier da autocorrelação do canal é proposto. Já neste trabalho, similar ao apresentado em [Tepedelenlioglu et al. 2001], o modelo de Clarke é usado para caracterizar o *Doppler*, e o sinal recebido é processado para a obtenção dos parâmetros do canal baseada em

LCR e AFD.

O trabalho está organizado como a seguir. A Seção 2 aborda a modelagem do sistema, a geração do canal sintético e a metodologia de estimação do canal, contribuindo com um levantamento das formulações analíticas do LCR e AFD para algumas distribuições clássicas usadas em modelagem de canal. A Seção 3 apresenta os resultados de validação da metodologia e da ferramenta adotada. Por fim, a Seção 4 traz os comentários finais do trabalho.

## 2. Modelagem do sistema

O procedimento apresentado neste artigo é composto de duas partes. A primeira, conforme pode ser visualizado na Figura 1a, corresponde à geração do desvanecimento de pequena escala<sup>1</sup>. Já a segunda parte, conforme pode ser visualizado na Figura 1b, é responsável pelo cálculo das estatísticas de segunda ordem e a caracterização do canal. A ideia do experimento é entrar com parâmetros conhecidos para o canal, e estimá-los (segunda parte) usando a série temporal de potência recebida gerada na primeira parte.

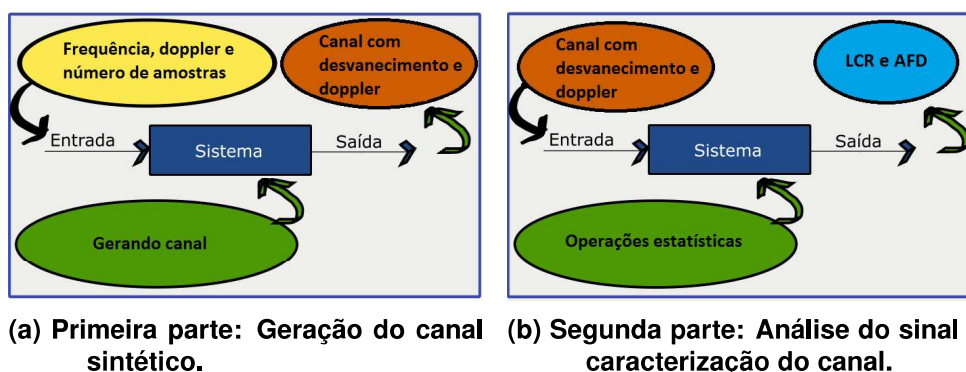


Figura 1: Sistema modelado.

### 2.1. Geração do canal sintético

O modelo de canal móvel utilizado neste trabalho foi proposto por Clarke [Clarke 1968], e representa um ambiente de propagação sem linha-de-visada, comumente conhecido como NLOS (do inglês, *Non-Line-of-Sight*). A implementação escolhida foi a *Filtered White Gaussian Noise* (FWGN), pois é a mais popular para canais *outdoor* [Cho et al. 2010]. A Figura 2 mostra um diagrama de blocos do modelo de Clarke. A ideia é gerar amostras de ruído Gaussiano complexo e filtrá-las por um filtro passa-baixa com frequência de corte igual ao *Doppler* máximo (Filtro *Doppler*). Amostras independentes de ruído são geradas para as partes real e imaginária, as quais são combinadas ao final para gerar um canal com distribuição Rayleigh. Inicialmente, as amostras do ruído são geradas no domínio da frequência, em seguida são filtradas (por multiplicação ao invés de convolução), e finalmente são transformadas de volta para o domínio do tempo via IFFT.

A frequência *Doppler* máxima ( $f_d$ ) é dada por

$$f_d = \frac{v}{\lambda}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Isso já modela a segunda fase de tratamento do sinal, em que o desvanecimento de larga escala foi separado do desvanecimento de pequena escala. Esse procedimento de separação, ocultado aqui para simplificar a modelagem, conforme pode ser visualizado com mais detalhes em [de M. Campos et al. 2018]

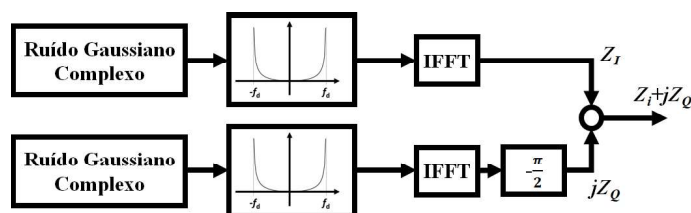


Figura 2: Diagrama de blocos do modelo de Clark (adaptado de [Cho et al. 2010]).

sendo  $v$  a velocidade relativa entre o transmissor, e  $\lambda$  comprimento da onda da portadora do sinal modulado.

A resposta em frequência do filtro *Doppler* é igual a Densidade Espectral de Potência do canal com desvanecimento, definida por Clarke [Clarke 1968] como

$$S(\nu) = \frac{1}{\pi f_d \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{f_d}\right)^2}}, \quad (2)$$

sendo  $\nu$  o desvio de frequência relativo a portadora do sinal modulado. Com esse modelo é possível gerar a resposta ao impulso do canal e a sua envoltória complexa.

## 2.2. Avaliação das estatísticas de segunda ordem

Os mínimos presentes em um sinal com desvanecimento são chamados de *deep fades* (desvanecimentos profundos), podendo chegar à profundidade de 40 dB ou mais [Jakes 1974]. Conhecendo a função de distribuição de probabilidade do desvanecimento, é possível escrever fórmulas fechadas para a ocorrência de *deep fades*, para o LCR e para a AFD. Essas funções são escritas em função de  $f_d$  e de métricas possíveis de se calcular com amostras do sinal. Por outro lado, inspecionando o sinal é possível contabilizar o LCR e o AFD. Assim, com os valores gerados do LCR (ou AFD) e sua formulação teórica, é possível estimar o  $f_d$ . A estratégia utilizada nesse trabalho é a seguinte: Utilizar as fórmulas fechadas deduzidas em [Abdi et al. 2000] para chegar ao valor da LCR e da AFD normalizadas pelo desvio de frequência. Após isso, utilizando um algoritmo como o mostrado em [Alotaibi and Ali 2007], calcular as duas estatísticas de maneira empírica. Por fim, utilizar os dois valores para chegar a um valor estimado para o desvio de frequência.

Para estimar  $f_d$ , pode-se utilizar tanto o LCR quanto a AFD. Utilizando a LCR, pode-se escrever  $\hat{f}_d$ , uma estimativa do desvio de frequência máximo, como

$$\hat{f}_d = \frac{LCR_{Empirica}}{LCR_{Teorica\_normalizada}}, \quad (3)$$

com  $LCR_{Teorica\_normalizada} = LCR_{Teorica}/f_d$ .

De forma análoga, pode-se estimar  $f_d$  escrevendo as equações acima com AFD.

A envoltória do sinal com desvanecimento de Clarke tem PDF Rayleigh, e o LCR pode ser calculado como em [Abdi et al. 2000]. Assim, a LCR que a envoltória cruza um nível específico  $R$  é

$$LCR_{Teorico}(\rho) = \sqrt{2\pi} \cdot f_d \cdot \rho \cdot e^{-\rho^2}, \quad (4)$$

em que  $\rho$  é a envoltória normalizada, definida como  $\rho = r/\sqrt{\Omega}$ , com  $\Omega$  sendo o valor RMS (*Root Mean Square*) do sinal. Já a AFD pode ser calculada como

$$AFD_{Teorico}(\rho) = \frac{\exp(\rho^2) - 1}{\sqrt{2\pi}f_d\rho}. \quad (5)$$

Então, a velocidade relativa entre transmissor e receptor pode ser estimada como  $\hat{v} = \lambda \cdot \hat{f}_d$ .

É importante deixar claro que essas equações referem-se ao cálculo das estatísticas de segunda ordem para um determinado nível de potência. Assim, para cada nível calculado haverá um valor para  $\hat{f}_d$ . Devido ao caráter aleatório das amostras, não é possível chegar a um valor único para o desvio de frequência para todo nível de referência  $R$ .

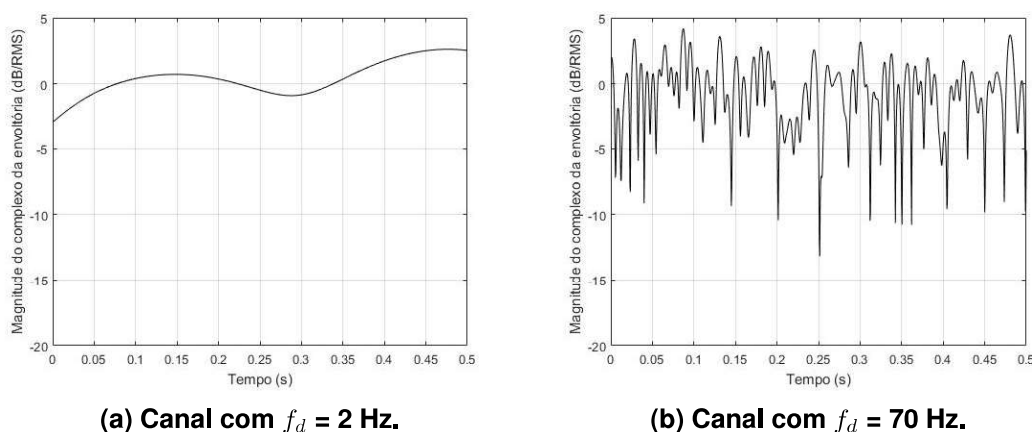
A Tabela 1 mostra uma coleção de trabalhos que disponibilizam as formulações para o LCR e a AFD para algumas distribuições clássicas. O objetivo é reunir informações para facilitar a busca e a extensão deste trabalho para outros canais.

**Tabela 1: Mapeamento das formulações analíticas do LCR e da AFD para PDFs clássicas.**

Distribuição	Referências para formulações do LCR e da AFD
Rayleigh	[Jakes 1974] [Abdi et al. 2000]
Rice	[Abdi et al. 2000]
Nakagami	[Abdi et al. 2000] [Youssef et al. 1996]
Weibull	[Fadnis et al. 2014] [Sagias et al. 2004]
Gamma	[Stefanović et al. 2011]
Lognormal	[Cotton and Scanlon 2007]
Inverse Gaussian	[Trigui et al. 2012]

### 3. Resultados

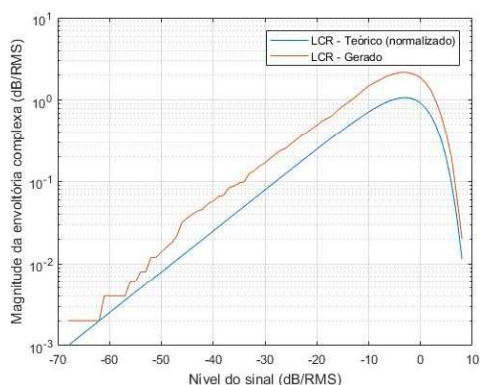
Para validar a metodologia apresentada na Seção anterior, foram geradas amostras de dois canais usando o software *MATLAB*: (i) Canal com *Doppler* máximo de 2 Hz; e (ii) Canal com *Doppler* máximo de 70 Hz. Cada canal possui  $10^6$  de amostras, tempo de amostragem de 0,5 ms, com portadora em 900 MHz. A Figura 3 mostra a magnitude da envoltória complexa para os dois canais em função do tempo.



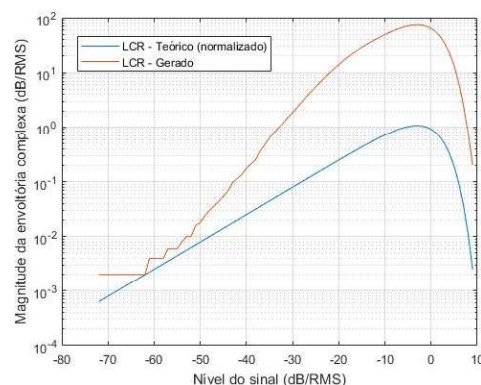
**Figura 3: Magnitude da envoltória complexa para os dois canais gerados.**

É possível notar a maior variabilidade temporal do canal com maior *Doppler*. A seguir, o LCR e a AFD são utilizados para estimar a máxima frequência *Doppler* de cada canal.

A Figura 4 mostra as curvas do LCR normalizado e dos valores gerados no simulador com a observação do sinal no tempo (número de vezes em que o sinal cruza no sentido positivo um valor de referência). O valor de referência  $R$  é variado e compõe o eixo da abcissas dos gráficos. A curva geradas possuem valores maiores que os valores normalizados, pois apresentam velocidades relativa entre os terminais que ocasiona um espalhamento *Doppler*.



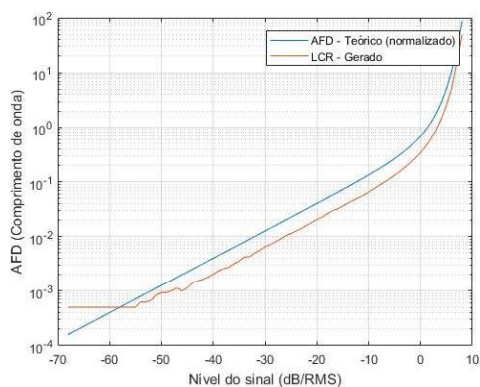
(a) LCR teórico e gerado para 2 Hz.



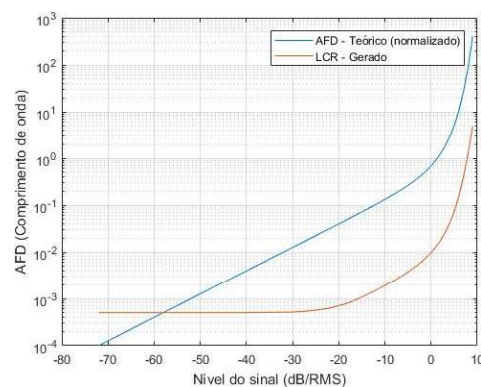
(b) LCR teórico e gerado para 70 Hz.

Figura 4: *Level Crossing Rate* (LCR).

Já a Figura 5 mostra os resultados para a AFD. O resultado gerado corresponde ao tempo que o sinal ficou abaixo do limiar de referência  $R$ , e o resultado normalizado está multiplicado pelo valor de  $f_d$ , como descrito em [Abdi et al. 2000]. Comparando os resultados para 2 e 70 Hz (Figuras 5a e 5b), é possível notar que quanto maior o valor da frequência *Doppler*, menor é o tempo médio que o sinal fica abaixo do valor  $R$ , isso ocorre pela maior variabilidade temporal do sinal com *Doppler* mais alto.



(a) AFD teórico e gerado para 2 Hz.



(b) AFD teórico e gerado para 70 Hz.

Figura 5: *Average Fade Duration* (AFD).

Com essas curvas, e usando a Equação 3, é possível calcular  $\hat{f}_d$  para toda faixa de variação de  $R$ , conforme pode ser visualizado na Figura 6. É possível observar a exata estimação dos valores de  $f_d$  em 2 Hz (Figura 6a) e em 70 Hz (Figura 6b), como esperado, para uma faixa de valores de  $R$ . Observa-se que para valores pequenos de  $R$ , a estimação não corresponde ao valor esperado. Isso ocorre por que, para este desvanecimento gerado, há muito poucas amostras com desvanecimentos abaixo destes limiares  $R$  [Fernando et al. 2008].



Contudo, a convergência ocorre dentro de uma faixa de valores práticos de  $R$ . Para o caso de 2 Hz a escala da figura é maior do que para o caso de 70 Hz, por esse motivo é possível observar mais detalhes na Figura 6a.

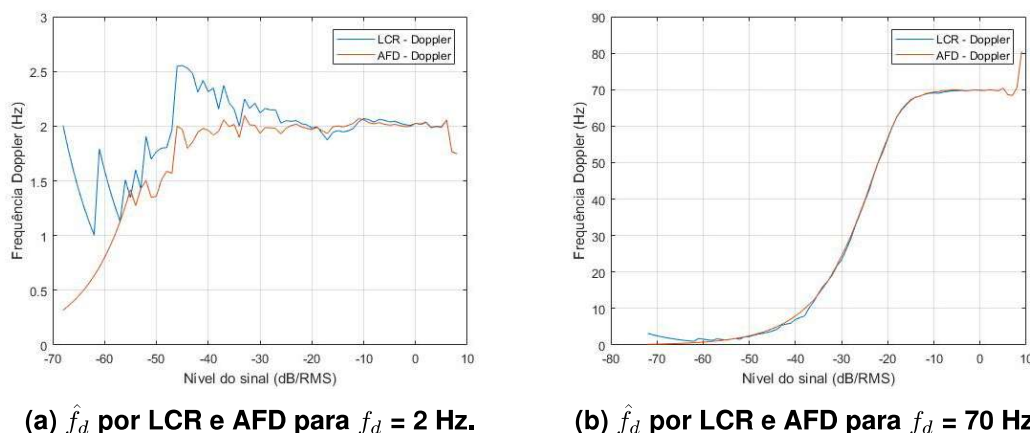


Figura 6: Estimação da frequência *Doppler* máxima.

#### 4. Conclusões

Esse artigo apresenta e testa uma metodologia de estimação de parâmetros de um canal com desvanecimento plano e rápido. Amostras do sinal recebido foram geradas usando o modelo de Clarke. O sinal foi analisado no tempo e medidas de LCR e AFD foram realizadas. Formulações teóricas para tais métricas foram pesquisadas na literatura e usadas, em conjunto com as estimativas de LCR e AFD, para estimar a frequência *Doppler* máxima do canal. Experimentos para dois canais com frequência *Doppler* máxima de 2 e 70 Hz (e desvanecimento com distribuição Rayleigh) validaram a metodologia e a ferramenta construída.

O trabalho também contribui com um levantamento de diferentes artigos relacionados à modelagem e caracterização de canais com estatísticas de segunda ordem, os quais disponibilizam a formulação teórica do LCR e da AFD para PDFs clássicas.

Este trabalho pode ser estendido para canais com outras PDFs bem como para a caracterização de canal baseada em medidas reais.

#### Referências

- 5G Americas (2018). 5G Americas White Paper: Cellular V2X Communications Towards 5G. Technical report. [http://www.5gamericas.org/files/9615/2096/4441/2018\\_5G\\_Americas\\_White\\_Paper\\_Cellular\\_V2X\\_Communications\\_Towards\\_5G\\_Final\\_for\\_Distribution.pdf](http://www.5gamericas.org/files/9615/2096/4441/2018_5G_Americas_White_Paper_Cellular_V2X_Communications_Towards_5G_Final_for_Distribution.pdf).
- Abdi, A., Wills, K., Barger, H. A., Alouini, M.-S., and Kaveh, M. (2000). Comparison of the level crossing rate and average fade duration of rayleigh, rice and nakagami fading models with mobile channel data. In *Vehicular Technology Conference Fall 2000. IEEE VTS Fall VTC2000. 52nd Vehicular Technology Conference (Cat. No. 00CH37152)*, volume 4, pages 1850–1857. IEEE.
- Alotaibi, F. D. and Ali, A. A. (2007). Level crossing rate and average fade duration calculation schemes based on tetra recent measurement. *International Conference on Communication, Computer & Power*, pages 19–21.

- Cao, M., Ge, H., Zhang, H., and Abdi, A. (2007). Parametric doppler spread estimation in mobile fading channels. In *Military Communications Conference, 2007. MILCOM 2007. IEEE*, pages 1–5. IEEE.
- Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., and Kang, C. G. (2010). *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*. John Wiley & Sons.
- Clarke, R. H. (1968). A statistical theory of mobile-radio reception. *Bell system technical journal*, 47(6):957–1000.
- Cotton, S. L. and Scanlon, W. G. (2007). Higher order statistics for lognormal small-scale fading in mobile radio channels. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 6:540–543.
- de M. Campos, M. M., de Oliveira, W. V., de Sousa Jr., V. A., Alves, W. S., D’Assunção, A. G., de O. e Mattos, M., Álvaro A. M. de Medeiros, and Scher, T. A. (2018). Medição de baixo custo para caracterização de canal 5G mMTC no cenário Dual-stripe. *SBrT’2018*.
- Fadnis, C., Jain, A., and Charhate, S. (2014). Higher order statistics for discrete weibull fading channel: An alternate formulation. In *2014 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, pages 1–4. IEEE.
- Fernando, P., Mari, P., et al. (2008). *Modelling the wireless propagation channel: a simulation approach with Matlab*, volume 5. John Wiley & Sons.
- Jakes, W. C. (1974). Multipath interference. *Microwave mobile communications*, pages 11–78.
- Parsons, J. D. (1992). The mobile radio propagation channel.
- Rappaport, T. S. (2009). *Comunicações sem fio: princípios e práticas*. Pearson Prentice Hall.
- Sagias, N. C., Zogas, D. A., Karagiannidis, G. K., and Tombras, G. S. (2004). Channel capacity and second-order statistics in weibull fading. *IEEE Communications Letters*, 8(6):377–379.
- Stefanović, D. M., Panić, S. R., and Spalević, P. Č. (2011). Second-order statistics of sc macrodiversity system operating over gamma shadowed nakagami-m fading channels. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 65(5):413–418.
- Tepedelenlioğlu, C., Abdi, A., Giannakis, G. B., and Kaveh, M. (2001). Estimation of doppler spread and signal strength in mobile communications with applications to handoff and adaptive transmission. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 1(2):221–242.
- Trigui, I., Laourine, A., Affes, S., and Stéphenne, A. (2012). The inverse gaussian distribution in wireless channels: Second-order statistics and channel capacity. *IEEE Transactions on Communications*, 60(11):3167–3173.
- Tsai, Y.-R. and Yang, K.-J. (2009). Approximate ml doppler spread estimation over flat rayleigh fading channels. *IEEE Signal Processing Letters*, 16(11):1007–1010.
- Wang, J., Shao, Y., Ge, Y., and Yu, R. (2019). A Survey of Vehicle to Everything (V2X) Testing. *Sensors (Basel)*.
- Xiao, C., Zheng, Y. R., and Beaulieu, N. C. (2003). Statistical simulation models for rayleigh and rician fading. In *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC’03.*, volume 5, pages 3524–3529. IEEE.
- Youssef, N., Munakata, T., and Takeda, M. (1996). Fade statistics in nakagami fading environments. In *Proceedings of ISSSTA’95 International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, volume 3, pages 1244–1247. IEEE.