Caracterização Estatística de Canais Sem Fio com Aplicação em Redes Celulares LTE 450 MHz

Carolina Azevedo Guedes Ferreira e Ugo Silva Dias

Resumo— Este artigo apresenta uma investigação prática da modelagem estatística de canais sem fio utilizando a faixa de frequência de 450 MHz com aplicação em futuras redes celulares LTE. Estatísticas de primeira e de segunda ordens, tais como PDF, CDF e função de autocorrelação dos modelos de desvanecimento α - μ , Nakagami-m, Rice e Rayleigh, são confrontadas entre si e com os dados experimentais exaustivamente coletados em ambientes rurais e suburbanos. Os resultados mostram um excelente desempenho da distribuição generalizada α - μ , na qual apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, tanto nas estatísticas de primeira quanto nas de segunda ordens.

Palavras-Chave— Canal sem fio, Caracterização estatística, Medições de campo, LTE 450.

Abstract— This paper presents a practical investigation of the statistical modeling of wireless channels using the frequency range 450 MHz with application in future LTE cellular networks. First and high orders statistics, such as PDF, CDF and autocorrelation function of α - μ , Nakagami-m, Rice and Rayleigh fading models, are confronted against each other and with the experimental data, exhaustively collected in rural and suburban environments. The results show an excellent performance of the α - μ distribution, which presented the best fit to experimental data, for both first and second orders statistics.

Keywords—Wireless channel, Statistical characterization, Field measurements, LTE 450.

I. INTRODUÇÃO

Historicamente, o Brasil alocou espectro de frequência abaixo de 1 GHz para comunicações ponto-a-ponto e serviços de voz ponto-multiponto ou ponto-área, áudio e transmissão de vídeo e outros serviços especializados. A mudança de paradigma nas políticas de regulamentação do espectro começou em maio de 2010, quando o Plano Nacional de Banda Larga (Plano Nacional de Banda Larga) promoveu a banda 225-470 MHz como uma alternativa para acomodar os serviços e aplicações de redes de altas taxas de dados no país. Logo após, ainda nesse mesmo ano, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) iniciou esforços para criar regras de implantação de serviços de altas taxas na faixa de 450MHz. Na Resolução 558/2010 [1], a ANATEL especifica os requisitos técnicos para usar a banda 450-470 MHz, em conformidade com as recomendações da União Internacional de Telecomunicações (UIT) para a região das Américas [2].

Na sequência desse movimento, em Junho de 2012, a ANATEL leiloou licenças para as bandas de 450 MHz e 2,5 GHz para sistemas celulares de quarta geração (4G). Como consequência direta, a banda de 450 MHz foi dividida em quatro áreas geográficas, cada uma atribuída a uma operadora principal que já opera no mercado brasileiro. Por meio dessa iniciativa, o governo brasileiro espera criar condições para aumentar o acesso a serviços de internet em todo o território brasileiro, em particular, para os 30 milhões de pessoas que vivem em regiões rurais, onde é provável que os titulares das licenças devam adotar a banda de 450 MHz, de modo a usufruir de suas vantagens na propagação de rádio, minimizando assim os custos com infraestrutura [3].

Apesar do LTE 450 ser uma proposta interessante, tanto sua especificação quanto sua implementação apresentam uma série de desafios práticos que poderão prejudicar seriamente o planejamento das futuras redes. De fato, o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio nesta faixa é penalizado pela natureza estocástica do canal rádio móvel. No percurso entre transmissor e receptor, além da perda de propagação, o sinal rádio móvel pode ser bloqueado por obstruções físicas - o sombreamento – e sofrer múltiplas reflexões, espalhamentos e difrações - o multipercurso. Vários modelos estatísticos caracterizam este fenômeno, como Rayleigh [4], Rice [5], [6], Nakagami-*m* [7], α - μ [8], entre outros. Neste contexto, se faz extremamente necessário realizar estudos de caracterização estatística na faixa de 450 MHz que possam investigar e sugerir modelos de desvanecimento a serem utilizados no planejamento das redes LTE 450 com suas implicações práticas.

Este trabalho propõe investigar estatísticas de primeira e de segunda ordens do canal sem fio em ambientes abertos na faixa de frequência de 450 MHz, tais como funções densidades de probabilidades (PDF), função de distribuição acumulada (CDF) e funções de autocorrelação para os modelos de desvanecimento α - μ , Nakagami-m, Rice e Rayleigh. Para este fim, um sistema de medição foi especificamente montado e os dados experimentais são exaustivamente coletados com a finalidade de se obter, na prática, as estatísticas em análise. Comparações são realizadas entre os modelos investigados e os dados experimentais. Por fim, os desvios médios são obtidos com a finalidade de sugerir o modelo que obteve o melhor desempenho de caracterização estatística na faixa de 450 MHz considerando os ambientes medidos.

O artigo está organizado como segue. Na Seção II, as distribuições de desvanecimento α - μ , Nakagami-m, Rice e Rayleigh são apresentadas. Na Seção III, o sistema de medição para obtenção dos dados práticos é apresentado, e caracterização estatística é investigada na prática. Comparações entre os dados práticos e os obtidos por meio dos modelos teóricos são também apresentados na Seção III. Finalmente, a Seção IV mostra as conclusões deste trabalho.

Os autores pertencem ao Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, e-mails: c.ferreira@ppgee.unb.br, udias@unb.br.

II. MODELOS DE DESVANECIMENTO DE CURTO PRAZO

Esta seção apresenta as distribuições investigadas neste trabalho. A distribuição generalizada α - μ contém os modelos de Nakagami-*m* e Rayleigh como casos particulares. Em seguida, a distribuição de Rice será exibida.

A. Distribuição α - μ

A distribuição α - μ considera um sinal composto de *clusters* de ondas de multipercurso propagando-se em um meio ambiente não-homogêneo. Ela pode ser utilizada para caracterizar as variações de pequena escala do sinal sem fio em desvanecimento em cenários que podem não apresentar linha de visada [8]. Como seu nome sugere, a distribuição α - μ é escrita em função de dois parâmetros físicos. O parâmetro de potência $\alpha > 0$ é relacionado com as não linearidades do meio de propagação, enquanto que o parâmetro $\mu > 0$ está associado ao número de *clusters* de multipercurso.

Para um sinal em desvanecimento generalizado α - μ com envoltória R, um parâmetro arbitrário $\alpha > 0$, com $\hat{r} = \sqrt[\alpha]{E(R^{\alpha})}$, em que $E(\cdot)$ é o operador esperança, a PDF da envoltória α - μ , $f_R(r)$, é escrita como [8]

$$f_R(r) = \frac{\alpha \mu^{\mu} r^{\alpha \mu - 1}}{\hat{r}^{\alpha \mu} \Gamma(\mu)} \exp\left(-\mu \frac{r^{\alpha}}{\hat{r}^{\alpha}}\right), \qquad (1)$$

em que $\mu > 0$ é o inverso da variância normalizada de R^{α} ,

$$\mu = \frac{E^2(R^\alpha)}{V(R^\alpha)},\tag{2}$$

em que $\Gamma(\cdot)$ é a função Gamma [9, Eq. 6.1.1] e $V(\cdot)$ denota o operador variância.

A CDF da envoltória α - μ , $F_R(r)$, é dada por [8]

$$F_R(r) = 1 - \frac{\Gamma(\mu, \mu r^{\alpha}/\hat{r}^{\alpha})}{\Gamma(\mu)},$$
(3)

em que $\Gamma(\cdot, \cdot)$ é a função Gamma incompleta [9, Eq. 6.5.1].

Os momentos da envoltória α - μ são descritos em [8] como $E(R^k) = \frac{\hat{r}^k \Gamma(\mu + k/\alpha)}{\mu^{k/\alpha} \Gamma(\mu)}$. A partir deles, uma igualdade pode ser definida e que é útil para a estimação de parâmetros práticos da distribuição α - μ . Essencialmente [8],

$$\frac{E^2(R^\beta)}{E(R^{2\beta}) - E^2(R^\beta)} = \frac{\Gamma^2(\mu + \beta/\alpha)}{\Gamma(\mu)\Gamma(\mu + 2\beta/\alpha) - \Gamma^2(\mu + \beta/\alpha)}$$

em que β pode ser escolhido arbitrariamente. Para dois valores distintos de β , duas equações são obtidas tais que os parâmetros físicos α e μ são encontrados. Para o caso particular em que $\beta = 1$ e $\beta = 2$, (4) fornece um estimador em termos de primeiro e segundo momentos. Obviamente, a partir de (4), outros estimadores baseado em momentos podem ser obtidos.

A função de autocorrelação, $A_r(d)$, da envoltória α - μ pode ser obtida a partir de seus momentos conjuntos generalizados [10], como

$$A_R(d) = \frac{\hat{r}^2 \Gamma^2 \left(\mu + \frac{1}{\alpha}\right) {}_2 F_1 \left(-\frac{1}{\alpha}, -\frac{1}{\alpha}; \mu; \rho(d)\right)}{\mu^{\frac{2}{\alpha}} \Gamma^2(\mu)}, \quad (5)$$

em que ${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$ é a função hipergeométrica [9, Eq. 15.1.1] e $\rho(d)$ é o coeficiente de autocorrelação espacial. Neste trabalho, o caso geral de cenários em desvanecimento sob efeito de anisotropia/isotropia é investigado, tal que a distribuição do ângulo de chegada (AoA) das ondas de multipercurso são não-uniforme/uniforme. Um modelo amplamente utilizado para AoA é a distribuição paramétrica de Von Mises (Tikhunov) [11]. Para este modelo, o coeficiente de autocorrelação espacial pode ser obtido como na Eq. (6), mostrada no topo da próxima página, em que $0 \le \zeta \le 1$ indica a diretividade no receptor, $I_0(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem zero [9, Eq. 9.6.16], $\varphi \in$ $[-\pi, \pi)$ representa a direção média de AoA, e $b \ge 0$ controla a largura do feixe. Em particular, para $\zeta = 0$, o modelo composto anisotrópico/isotrópico reduz-se cenário isotrópico com AoA uniforme, tal que $\rho(d) = J_0^2 (2\pi d/\lambda)$.

B. Distribuições de Nakagami-m e Rayleigh

Os modelos tradicionais de desvanecimento de Nakagami-*m* [7] e de Rayleigh [4] apresentam-se como casos particulares da distribuição α - μ . Para se obter as suas estatísticas, basta admitir, nas Eqs. de (1) a (6), $\alpha = 2$ e $\mu = m$ para reduzi-las à Nakagami-*m*, e $\alpha = 2$ e $\mu = 1$ para reduzi-las à Rayleigh. Nota-se que Rayleigh considera um ambiente composto por apenas um *cluster* de multipercurso.

C. Distribuições de Rice

O modelo de Rice pode ser usado para representar a variação em pequena escala do sinal em desvanecimento imerso em condições de linha de visada. A distribuição de Rice é escrita em função do parâmetro k que consiste na razão entre a potência das componentes dominantes e a potência das ondas espalhadas [5], [6].

A PDF do modelo de Rice é escrita como

$$f_R(r) = \frac{2(k+1)r}{\Omega} \exp\left[-k - \frac{(k+1)r^2}{\Omega}\right] I_0\left(2\sqrt{\frac{k(k+1)}{\Omega}}r\right)$$
(7)

em que Ω é a potência média do sinal. O parâmetro de desvanecimento k de Rice [12] pode ser estimado por

$$k = \frac{\sqrt{1-\gamma}}{1-\sqrt{1-\gamma}},\tag{8}$$

em que $\gamma = V(R^2)/E^2[R^2]$.

A CDF da envoltória de Rice é definida por

$$F_R(r) = Q_1\left(\sqrt{2k}, \sqrt{\frac{2(k+1)}{\Omega}}r\right),\tag{9}$$

em que $Q_1(\cdot, \cdot)$ é a função Marcum-Q de ordem unitária [9].

III. MEDIÇÕES DE CAMPO E CARACTERIZAÇÃO Estatística

Uma série de medições de campo foi realizada na Universidade de Brasília (UnB), Brasil, com o objetivo de se obter, na prática, a caracterização estatística de funções de primeira e de segunda ordens do canal sem fio na frequência de 450 MHz, tais como PDF, CDF e função de autocorrelação, assim como investigar os modelos teóricos de desvanecimento α - μ , Nakagami-*m*, Rice e Rayleigh quanto os seus respectivos

$$\rho(d) = \left| \frac{\zeta I_0 \left(\sqrt{b^2 - (2\pi d/\lambda)^2 + j4\pi bd \cos(\varphi)/\lambda} \right) + (1 - \zeta) J_0 (2\pi d/\lambda) I_0(b)}{I_0(b)} \right|^2 \tag{6}$$



Fig. 1. Prédio SG-11 UnB. Transmissor instalado no terraço.



A autocorrelação empírica normalizada foi computada de acordo com

$$\widehat{A}_{R}\left(\Delta\right) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\Delta} r_{i}r_{i+\Delta}}{\sum_{i=1}^{N-\Delta} r_{i}^{2}},\tag{10}$$

em que r_i é a *i*-ésima amostra da sequência de amplitude sample, N é o número total de amostras, Δ é a diferença relativa à distância, e $\hat{A}_R(.)$ denota um estimador empírico de $A_R(.)$. O coeficiente de autocorrelação empírico foi computado como

$$\widehat{\rho}\left(\Delta\right) = \frac{\widehat{A}_R\left(\Delta\right) - \widehat{E}^2(R)}{\widehat{V}(R^2)},\tag{11}$$



2

Fig. 2. Vista aérea de um dos ambientes medidos.



Fig. 3. Via L3.



Fig. 4. Diagrama de equipamentos na recepção.

em que $\widehat{E}(\cdot)$ e $\widehat{V}(\cdot)$ denotam os estimadores de média e de variância, respectivamente. Finalmente, os parâmetros anisotrópicos puderam ser estimados para todas as medições.

Todas as estatísticas obtidas empiricamente foram confrontadas com suas correspondentes formulações teóricas, com os mesmos parâmetros estimados em campo. Ademais, o erro



Fig. 5. PDFs teóricas vs. experimental em ambiente LOS rural.

médio ¹, ϵ , foi calculado para cada caso.

A. Resultados e Discussões

As Figuras 5 a 12 mostram os resultados de algumas das diversas medições realizadas em ambientes típicos suburbanos e rurais da Universidade de Brasília. A Tabela I apresenta os parâmetros de desvanecimento estimados para cada modelo insvestigado, assim como os erros médios calculados para cada medição. A caracterização estatística de primeira ordem, dada por PDFs e CDFs estão apresentadas nas Figuras 5 a 7 e 8 a 10, respectivamente. Notadamente, a distribuição α - μ apresentou excelentes ajustes em todos as rotas e cenários medidos, obtendo erros médios sempre menores do que qualquer outro modelo investigado, tanto em ambientes mais determinísticos, representados nas Figuras 5, 7, 8 e 10, quanto em ambientes mais aleatórios das Figuras 6 e 9. Sabe-se que a flexibilidade da distribuição generalizada α - μ é maior do que os modelos tradicionais devido a α - μ possuir um grau de liberdade a mais. Entretanto, é interessante ressaltar que, apesar de todos os cenários possuírem condições LOS, que é a situação contemplada na concepção do modelo físico de Rice, o modelo α - μ superou este último principalmente por estimar as não-linearidade do meio de propagação. As Figuras 11 e 12 apresentam a função de autocorrelação α - μ confrontada com a autocorrelação empírica obtida em campo. Observe, novamente, o excelente ajuste da distribuição α - μ e como as curvas teóricas tendem a acompanhar as mudanças da concavidade dos dados empíricos.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo, os resultados de medições de campo foram reportados visando investigar e caracterizar estatísticas de primeira e de segunda ordens na frequência de 450 MHz com aplicação em redes celulares LTE 450. As estatísticas aqui exploradas foram PDF, CDF e função de autocorrelação



Fig. 6. PDFs teóricas vs. experimental em ambiente LOS suburbano.



Fig. 7. PDFs teóricas vs. experimental em ambiente LOS com predominância de vegetações baixas.

TABELA I Parâmetros de Desvanecimento Estimados e Desvio Médio entre PDFs Teóricas e Experimentais

Fig.	$\hat{\alpha}$	$\hat{\mu}$	\hat{m}	\hat{k}	ϵ_{Ray}	ϵ_{Rice}	ϵ_{Nak}	$\epsilon_{\alpha-\mu}$
5	1,88	3,97	3,15	4,76	26,64%	6,51%	3,49%	2,47%
6	1,08	4,97	1,16	0,59	10,25%	9,02%	7,67%	3,75%
7	1,27	9,01	3,44	5,35	27,71%	6,33%	3,77%	2,92%



Fig. 8. CDFs teóricas vs. experimental em ambiente LOS rural.

¹O desvio médio entre os dados medidos x_i e os valores teóricos y_i é definido como $\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{|y_i - x_i|}{x_i}$, em que N é o número total de pontos. Para os cálculos aqui apresentados, os erros foram estimados para pontos no intervalo $[0, 1.4\lambda]$, onde os maiores desvios ocorrem.



Fig. 9. CDFs teóricas vs. experimental em ambiente LOS suburbano.



Fig. 10. CDFs teóricas vs. experimental em ambiente LOS com predominância de vegetações baixas.



Fig. 11. Funções de autocorrelação teóricas vs. experimental em ambiente LOS suburbano.



Fig. 12. Funções de autocorrelação teóricas vs. experimental em ambiente LOS rural.

dos modelos de desvanecimento α - μ , Nakagami-m, Rice e Rayleigh. Excelentes ajustes foram encontrados entre os dados empíricos e teóricos da distribuição α - μ , considerando todas as rotas e cenários medidos em ambientes LOS típicos das aplicações esperadas para LTE 450. Desta forma, recomendase a utilização do modelo generalizado α - μ no planejamento de futuras redes sem fio operando na faixa de 450 MHz.

REFERÊNCIAS

- Resolucao n^o 558/2010, "Regulamento sobre Canalizacao e Condicoes de Uso de Radiofrequencias na Faixa de 450 MHz a 470 MHz," ANATEL, Tech. Rep., Dezembro 2010.
- [2] ITU, "Final acts," in World Radiocommunication Conference (WRC-07), Geneva, 2007.
- [3] ITU Radio Communication Study Groups, "Contribution to technical requirements for IMT-Advanced systems D7," ITU, Tech. Rep., 2007.
- [4] R. H. Clarke, "A statistical theory of mobile-radio reception," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 47, pp. 957–1000, Jul.–Aug. 1968.
- [5] S. O. Rice, "Mathematical analysis of random noise," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 23, no. 3, pp. 282–332, Jul. 1944.
- [6] —, "Mathematical analysis of random noise," Bell Syst. Tech. J., vol. 24, no. 1, pp. 46–156, Jan. 1945.
- [7] M. Nakagami, *The m-Distribution A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading*, ser. Statistical Methods in Radio Wave Propagation. W. C. Hoffman, Ed. Elmsford, NY: Pergamon, 1960, pp. 3–36.
- [8] 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.
- [9] M. Abramowitz and I. A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. New York: Dover, 1972.
- [10] U. S. Dias and M. D. Yacoub, "On the α-μ Autocorrelation and Power Spectrum Functions: Field Trials and Validation," in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Honolulu, USA, Nov.-Dec. 2009.
- [11] R. Von Mises, "Uber die 'Ganzzahligkeit' der Atomgewicht und verwandte Fragen," Phys. Z., vol. 19, pp. 490–500, 1918.
- [12] A. Abdi, C. Tepedelenlioglu, M. Kaveh, and G. Giannakis, "On the estimation of the k parameter for the rice fading distribution," *IEEE Communications Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 92–94, March 2001.
- [13] B. Davis and R. Bogner, "Propagation at 500 MHz for mobile radio," *IEE Proc.*, vol. 132, pp. 307–320, Aug. 1985.
- [14] 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.