SOBRE A MODELAGEM ESTATíSTICA DA ENVOLTÓRIA DO SINAL DE RÁDIO MÓVEL

N. K. Camiña† e R. C. Betini‡

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR
Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada - PPGIA
Av. Imaculada Conceição N^o 1155 Prado Velho
80215-901 Curitiba, Paraná, Brasil
†nelcy@ppgia.pucpr.br e ‡betini@ppgia.pucpr.br

ABSTRACT

A modelagem do sinal no ambiente de rádio móvel será estudada amplamente, no que diz respeito à variabilidade do sinal em torno da média do sinal recebido. A avaliação da variabilidade do sinal em torno da média da potência será feita por métodos estatísticos. Serão descritos diversos modelos estatísticos utilizados para caracterizar a variabilidade do sinal de rádio móvel. A modelagem estatística da envoltória do sinal será feita de forma a que as densidades da envoltória do sinal possam ser comparadas entre si. Além disso, para todas as modelagens apresentadas, a média de potência do sinal é relacionada à média da envoltória do sinal. Assim, torna-se possível obter as variâncias da envoltória do sinal e, portanto, os desvios padrão para todas as densidades apresentadas. Além disso, serão propostas novas modelagens estatísticas para a envoltória do sinal de rádio móvel para os ambientes Nakagami Sombreado e Rice Sombreado.

1. INTRODUÇÃO

Para caracterizar a variabilidade do sinal de rádio móvel são utilizados diversos modelos estatísticos. O modelo Rayleigh é utilizado para descrever ambientes com multipercusos. O modelo Rice é utilizado para descrever ambientes com propagação multipercurso e ambientes com propagação multipercurso associada à presença de linha de visada. O modelo Log-Normal é utilizado para descrever ambientes com sombreamento. O modelo Nakagami é mais versátil que os anteriores, pode ser utilizado para descrever ambientes com diferentes tipos de desvanecimento, faz uso de expressões mais simples, se ajusta melhor a resultados experimentais obtidos e descreve ambientes com sombreamento com valores pequenos de desvio padrão, ambientes com propagação multipercurso, e ambientes com propagação multipercurso associada à presença de linha de visada. O modelo Suzuki é a combinação dos modelos Rayleigh e Log-Normal e é utilizado para descrever ambientes com propagação multipercurso e sombreamento combinados. O modelo Rice Sombreado é a combinação dos modelos Rice e Log-Normal e é utilizado para descrever ambientes com propagação multipercurso e sombreamento combinados, ou ainda, ambientes com propagação multipercurso, sombreamento e presença de componente direta sombreada. O modelo Nakagami Sombreado é a combinação dos modelos Nakagami e Log-Normal e é utilizado para descrever ambientes com propagação multipercurso e sombreamento combinados, ou ainda, ambientes com propagação multipercurso, sombreamento e presença de componente direta sombreada.

A modelagem da variabilidade do sinal de rádio móvel em torno da média de potência, para cada um dos modelos citados, compreende a modelagem estatística da envoltória do sinal e é mostrada neste trabalho.

2. DENSIDADES DA ENVOLTÓRIA DO SINAL DE RÁDIO MÓVEL

2.1. Ambiente Rayleigh

A envoltória, $\boldsymbol{r}$, do sinal de rádio móvel pode ser modelada pela densidade de Rayleigh. O ambiente assim modelado é chamado de ambiente Rayleigh e a função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r)$, da envoltória é expressa por [1]

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \frac{r}{\overline{w}}\ exp\left(-\frac{r^2}{2\,\overline{w}}\right) \quad r \geq 0 \tag{1}$$

onde

$$\overline{w} = \frac{2}{\pi}\,(\overline{r})^2 \tag{2}$$

é a média da potência, $\boldsymbol{w}$ [1], e $\overline{r}$ é a média da envoltória.

2.2. Ambiente Nakagami

A envoltória, $\boldsymbol{r}$, do sinal de rádio móvel pode ser modelada pela densidade de Nakagami. O ambiente assim modelado é chamado de ambiente Nakagami e a função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r)$, da envoltória é expressa por [2]

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \frac{2\,m^m\,r^{2m-1}}{\Gamma(m)\,2^m\,(\overline{w})^m}\;exp\left(-\frac{m\,r^2}{2\,\overline{w}}\right) \quad r \geq 0 \qquad (3)$$

onde

$$m = \frac{(2\,\overline{w})^2}{var\,(\boldsymbol{r}^2)}\;\geq\;1/2 \qquad (4)$$

é o parâmetro de desvanecimento do sinal (ou grau de desvanecimento do sinal) [2];

$$\overline{w} = \frac{m}{2}\left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma\left(m+\frac{1}{2}\right)}\right]^2 (\overline{r})^2 \qquad (5)$$

é a média da potência [2]; $\overline{r}$ é a média da envoltória, e $\Gamma(\alpha)$ é a função Gama.

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade de Nakagami, dada pela Equação 3, degenera-se para a densidade dada pela Equação 1, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh. Para $m = 1/2$, tem-se a densidade Gaussiana unilateral.

2.3. Ambiente Rice

A envoltória, $\boldsymbol{r}$, do sinal de rádio móvel pode ser modelada pela densidade de Rice. O ambiente assim modelado é chamado de ambiente Rice e a função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r)$, da envoltória é expressa por [3]

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \frac{r\;(1+k)\;exp\,(-k)}{\overline{w}}\;exp\left(-\frac{r^2\;(1+k)}{2\,\overline{w}}\right) \times I_0\left[r\,\sqrt{\frac{2\,k\,(1+k)}{\overline{w}}}\right] \quad r \geq 0 \qquad (6)$$

onde

$$\overline{w} = \frac{2}{\pi}\,\frac{(1+k)\;exp\,(k)\,(\overline{r})^2}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right)(1+k)+I_1\left(\frac{k}{2}\right)k\right]^2} = \sigma^2+a^2/2 \qquad (7)$$

é a média de potência [3]; $I_0(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero; $I_1(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem um; k é a razão potência do sinal direto/potência dos sinais indiretos, também chamada de fator de Rice, é dada por [1]

$$k = \frac{a^2}{2\,\sigma_r^2} \qquad (8)$$

onde σ^2 é a média da potência da componente difusa [1]; $a^2/2$ é a média da potência da componente direta [1]. Para o caso particular em que se tem obstrução da linha de visada, isto é, para $a = 0$ tem-se $k = 0$ e $K = -\infty$ dB, onde $K = 10\,log\,k$ é o fator de Rice, dado em decibéis.

Para o caso particular em que se tem obstrução da linha de visada, a densidade dada pela Equação 6 degenera-se para a densidade dada pela Equação 1, ou seja, tem-se o ambiente Rayleigh.

2.4. Ambiente Log-Normal

A envoltória, $\boldsymbol{R}$, dada em decibéis, do sinal de rádio móvel pode ser modelada pela densidade Normal. O ambiente assim modelado é chamado de ambiente Log-Normal e a função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{R}}\,(R)$, da envoltória, dada em decibéis, é expressa por [4]

$$f_{\boldsymbol{R}}\,(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_R}\;exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{R-\widetilde{R}}{\sigma_R}\right)^2\right] \qquad (9)$$

onde $\widetilde{R}$ é a média, dada em decibéis, da envoltória, dada em decibéis [4], e $var(\boldsymbol{R}) = \sigma_R^2$ é a variância da envoltória, dada em decibéis [4], e portanto, σ_R é o desvio padrão, dado em decibéis, da envoltória, dada em decibéis.

É possível obter a função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r)$, da envoltória, $\boldsymbol{r}$, expressa em unidades naturais, dada por [3]

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \frac{2\,C}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_R\,r} \times exp\left[\frac{2\,C^2}{\sigma_R^2}\left[ln\left[\frac{r\;exp\left(\frac{\sigma_R^2}{4\,C^2}\right)}{\sqrt{2\,\overline{w}}}\right]\right]^2\right] \quad r \geq 0 \qquad (10)$$

onde

$$\overline{w} = \frac{(\overline{r})^2}{2}\;exp\left(\frac{\sigma_R^2}{4\,C^2}\right) \qquad (11)$$

é média da potência [5]; $\overline{r}$ é a média da envoltória; σ_R é o desvio padrão, dado em decibéis, da envoltória, dada em decibéis, e $C = 10/ln10$ é uma constante.

2.5. Ambiente Suzuki

A envoltória, $\boldsymbol{r}$, do sinal de rádio móvel pode ser modelada pela densidade composta de Rayleigh/Normal. O ambiente assim modelado é chamado de ambiente Suzuki e a função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r)$, da envoltória é expressa por [5]

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \sqrt{\frac{\pi}{8\,\sigma_{R'}^2}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{r}{10^{\frac{R'}{10}}}\;exp\left(-\frac{\pi}{4}\,\frac{r^2}{10^{\frac{R'}{10}}}\right) \times exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{R'-\overline{R}+\frac{\sigma_{R'}^2}{4\,C}}{\sigma_{R'}}\right)^2\right] dR' \quad r \geq 0 \qquad (12)$$

onde R' é a média local, dada em decibéis, da envoltória; $\overline{R}$ é a média na área, dada em decibéis, da envoltória [5], e $\sigma_{R'}$ é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, dada em decibéis.

A densidade composta de Rayleigh/Normal, dada pela Equação 12, é a combinação das densidades de Rayleigh e Normal e é obtida como delineado no Apêndice A.

Obtém-se, ainda, a função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r)$, da envoltória, dada pela densidade composta de Rayleigh/Log-Normal, ou seja, tem-se [5]

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \sqrt{\frac{\pi\, C^2}{2\,\sigma_{R'}^2}}\int_0^\infty \frac{r}{(r')^3}\;exp\left[-\frac{\pi}{4}\,\frac{r^2}{(r')^2}\right] \tag{13}$$
$$\times\; exp\left[-\frac{2\,C^2}{\sigma_{R'}^2}\left[ln\left[r'\frac{\sqrt{2}\,exp\left(\frac{\sigma_{R'}^2}{4\,C^2}\right)}{\sqrt{\overline{w}\,\pi}}\right]\right]^2\right] dr' \quad r \geq 0$$

onde $r' = 10^{\frac{R'}{20}}$ é a média local, expressa em unidades naturais, da envoltória;

$$\overline{w} = \frac{2}{\pi}\,(\overline{r})^2\; exp\left(\frac{\sigma_{R'}^2}{4\,C^2}\right) \tag{14}$$

é a média na área, expressa em unidades naturais, da potência [5]; e $\overline{r} = 10^{\frac{\overline{R}}{20}}$ é a média na área, expressa em unidades naturais, da envoltória.

A densidade composta de Rayleigh/Log-Normal, dada pela Equação 13, é a combinação das densidades de Rayleigh e Log-Normal e é obtida conforme delineado no Apêndice B.

2.6. Ambiente Nakagami Sombreado

A densidade composta de Nakagami/Normal é proposta como uma modelagem possível para a envoltória, do sinal de rádio móvel. A expressão proposta é a função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r)$, da envoltória, dada por [5]

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi\,\sigma_{R'}^2}}\;\frac{\left[\,\Gamma\left(m+\frac{1}{2}\right)\right]^{2m}}{\left[\,\Gamma(m)\,\right]^{2m+1}} \tag{15}$$
$$\times \int_{-\infty}^{\infty}\frac{r^{2m-1}}{10^{\frac{m\,R'}{10}}}\;exp\left[-\left[\frac{\Gamma\left(m+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma(m)}\right]^2 \frac{r^2}{10^{\frac{R'}{10}}}\right]$$
$$\times\; exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{R' - \overline{R} + \frac{\sigma_{R'}^2\, ln 10}{40}}{\sigma_{R'}}\right)^2\right] dR' \quad r \geq 0$$

onde R' é a média local, dada em decibéis, da envoltória; $\overline{R}$ é a média na área, dada em decibéis, da envoltória [5]; $\sigma_{R'}$ é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, dada em decibéis; m é o parâmetro de desvanecimento do sinal (ou grau de desvanecimento do sinal) e $\Gamma(\alpha)$ é a função Gama.

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade composta de Nakagami/Normal, dada pela Equação 16, degenera-se para a densidade composta de Rayleigh/Normal, dada pela Equação 12, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta de Nakagami/Normal, dada pela Equação 16, é a combinação das densidades de Nakagami e Normal e é obtida como delineado no Apêndice A.

A densidade composta de Nakagami/Log-Normal é proposta como uma modelagem possível para a envoltória, do sinal de rádio móvel. A expressão proposta é a função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r)$, da envoltória, $\boldsymbol{r}$, dada por [5]

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \sqrt{\frac{8\,C^2}{\pi\,\sigma_{R'}^2}}\;\frac{\left[\,\Gamma\left(m+\frac{1}{2}\right)\right]^{2m}}{\left[\,\Gamma(m)\,\right]^{2m+1}}\int_0^\infty \frac{r^{2m-1}}{(r')^{2m+1}} \tag{16}$$
$$\times\; exp\left[-\left[\frac{\Gamma\left(m+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma(m)}\right]^2\frac{r^2}{(r')^2}\right]\; exp\left[-\frac{2\,C^2}{\sigma_{R'}^2}\right.$$
$$\times\left.\left[ln\left[\frac{r'\,\Gamma(m)\,\sqrt{m}\,exp\left(\frac{\sigma_{R'}^2}{4\,C^2}\right)}{\Gamma\left(m+\frac{1}{2}\right)\,\sqrt{2\,\overline{w}}}\right]\right]^2\right] dr' \quad r \geq 0$$

onde $r' = 10^{\frac{R'}{20}}$ é a média local, expressa em unidades naturais, da envoltória;

$$\overline{w} = \frac{m}{2}\left[\frac{\Gamma(m)}{\Gamma\left(m+\frac{1}{2}\right)}\right]^2 (\overline{r})^2\; exp\left(\frac{\sigma_{R'}^2}{4\,C^2}\right) \tag{17}$$

a média na área, expressa em unidades naturais, da potência [5]; e $\overline{r} = 10^{\frac{\overline{R}}{20}}$ é a média na área, expressa em unidades naturais, da envoltória.

Para o caso particular em que $m = 1$, a densidade composta de Nakagami/Log-Normal, dada pela Equação 16, degenera-se para a densidade composta Rayleigh/Log-Normal, dada pela Equação 13, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta de Nakagami/Log-Normal, dada pela Equação 16, é a combinação das densidades de Rayleigh e Log-Normal e é obtida conforme delineado no Apêndice B.

2.7. Ambiente Rice Sombreado

A densidade composta de Rice/Normal é proposta como uma modelagem possível para a envoltória do sinal de rádio móvel. A expressão proposta é a função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r)$, da envoltória, dada por [5]

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \sqrt{\frac{\pi}{8\,\sigma_{R'}^2}}\;exp\,(-2\,k) \tag{18}$$
$$\times\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right)(1+k)+I_1\left(\frac{k}{2}\right)k\right]^2$$
$$\times\int_{-\infty}^{\infty}\frac{r}{10^{\frac{R'}{10}}}\;exp\left[-\frac{\pi}{4}\,exp\,(-k)\right.$$
$$\times\left.\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right)(1+k)+I_1\left(\frac{k}{2}\right)k\right]^2\frac{r^2}{10^{\frac{R'}{10}}}\right]$$
$$\times\; I_0\left[\sqrt{\frac{\pi}{2}}\,exp\left(-\frac{k}{2}\right)\right.$$

$$\times \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right)(1+k)+I_1\left(\frac{k}{2}\right)k\right]\frac{r\sqrt{2\,k}}{10^{\frac{R'}{20}}}\Bigg]$$

$$\times\; exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{R'-\overline{R}+\frac{\sigma_{R'}^2\,ln10}{40}}{\sigma_{R'}}\right)^2\right] dR' \quad r\geq 0$$

onde R' é a média local, dada em decibéis, da envoltória; $\overline{R}$ é a média na área, dada em decibéis, da envoltória [5]; $\sigma_{R'}$ é o desvio padrão, dado em decibéis, da média local, dada em decibéis; k é o fator de Rice; $I_0(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero e $I_1(\alpha)$ é a função de Bessel modificada de ordem um.

Para o caso particular em que $k=0$, a densidade composta de Rice/Normal, dada pela Equação 18, degenera-se para a densidade composta de Rayleigh/Normal, dada pela Equação 12, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta de Rice/Normal, dada pela Equação 18, é a combinação das densidades de Rice e Normal e é obtida como delineado no Apêndice A.

A densidade composta de Rice/Log-Normal é proposta como uma modelagem possível para a envoltória do sinal de rádio móvel. A expressão proposta é a função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r)$, da envoltória, dada por [5]

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \sqrt{\frac{\pi\,C^2}{2\,\sigma_{R'}^2}}\;exp\,(-2\,k) \tag{19}$$

$$\times \left[I_0\left(\frac{k}{2}\right)(1+k)+I_1\left(\frac{k}{2}\right)k\right]^2$$

$$\times \int_0^\infty \frac{r}{(r')^3}\;exp\left[-\frac{\pi}{4}\,exp\,(-k)\right.$$

$$\times \left.\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right)(1+k)+I_1\left(\frac{k}{2}\right)k\right]^2\frac{r^2}{(r')^2}\right]$$

$$\times\; I_0\left[\sqrt{\frac{\pi}{2}}\,exp\left(-\frac{k}{2}\right)\right.$$

$$\times \left.\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right)(1+k)+I_1\left(\frac{k}{2}\right)k\right]\frac{r\sqrt{2\,k}}{r'}\right]$$

$$\times\; exp\left[-\frac{2\,C^2}{\sigma_{R'}^2}\left[ln\left[\frac{\sqrt{2\,(1+k)}exp\left(\frac{k}{2}\right)}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right)(1+k)+I_1\left(\frac{k}{2}\right)k\right]}\right.\right.\right.$$

$$\times \left.\left.\left.\frac{r'\,exp\left(\frac{\sigma_{R'}^2}{4\,C^2}\right)}{\sqrt{\overline{w}\,\pi}}\right]\right]^2\right]\; dr' \quad r\geq 0$$

onde $r' = 10^{\frac{R'}{20}}$ é média local, expressa em unidades naturais, da envoltória;

$$\overline{w} = \frac{2}{\pi}\frac{(1+k)\;exp\,(k)\,(\overline{r})^2}{\left[I_0\left(\frac{k}{2}\right)(1+k)+I_1\left(\frac{k}{2}\right)k\right]^2}\;exp\left(\frac{\sigma_{R'}^2}{2\,C^2}\right) \tag{20}$$

é a média na área, expressa em unidades naturais, da potência [5]; e $\overline{r} = 10^{\frac{\overline{R}}{20}}$ é a média na área, expressa em unidades naturais, da envoltória [5].

Para o caso particular em que $k=0$, a densidade composta Rice/Log-Normal, dada pela Equação 19, degenera-se para a densidade composta Rayleigh/Log-Normal, dada pela Equação 13, ou seja, tem-se o ambiente Suzuki.

A densidade composta de Rice/Log-Normal, dada pela Equação 19, é a combinação das densidades de Rice e Log-Normal e é obtida conforme delineado no Apêndice B.

2.8. Comparação entre o modelo Nakagami Sombreado e os modelos Nakagami e Log-Normal

As densidades que caracterizam o ambiente Nakagami Sombreado são uma combinação das densidades que caracterizam os ambientes Nakagami e Log-Normal. Portanto, o modelo Nakagami Sombreado é a combinação dos modelos Nakagami e Log-Normal. Assim, o modelo Nakagami Sombreado será comparado aos modelos que o compõem, ou seja, aos modelos Nakagami e Log-Normal.

A Figura 1 mostra a comparação entre o modelo Nakagami Sombreado e os modelos Nakagami e Log-Normal para a densidade da envoltória do sinal de rádio móvel, para $m = 3$. O modelo Log-Normal é caracterizado pela densidade dada pela Equação 10, tendo como parâmetro o desvio padrão de sombreamento, $\sigma_{R'}$, dado em decibéis.

Da Figura 1, observa-se que, para valores grandes do desvio padrão de sombreamento ($\sigma_{R'} \sim 52$ dB), o modelo Nakagami Sombreado aproxima o modelo Log-Normal, isto é, o desvanecimento Log-Normal é crítico em relação ao desvanecimento Nakagami.

Da Figura 1, observa-se que, para valores pequenos do desvio padrão de sombreamento ($\sigma_{R'} \sim 3$ dB), o modelo Nakagami Sombreado não aproxima o modelo Nakagami, isto é, o desvio padrão de sombreamento não pode ser desprezado, ou seja, tem importância relevante.

2.9. Comparação entre o modelo Rice Sombreado e os modelos Rice e Log-Normal

As densidades que caracterizam o ambiente Rice Sombreado são uma combinação das densidades que caracterizam os ambientes Rice e Log-Normal. Portanto, o modelo Rice Sombreado é a combinação dos modelos Rice e Log-Normal. Assim, o modelo Rice Sombreado será comparado aos modelos que o compõem, ou seja, aos modelos Rice e Log-Normal.

A Figura 2 mostra a comparação entre o modelo Rice Sombreado e os modelos Rice e Log-Normal para a densidade da envoltória do sinal de rádio móvel, para $K = 5$ dB.

Da Figura 2, observa-se que, para valores grandes do desvio padrão de sombreamento ($\sigma_{R'} \sim 52$ dB), o modelo Rice Sombreado aproxima o modelo Log-Normal, isto é, o desvanecimento Log-Normal é crítico em relação ao desvanecimento Rice.

Da Figura 2, observa-se que, para valores pequenos do desvio padrão de sombreamento ($\sigma_{R'} \sim 3$ dB), o modelo Rice Sombreado não aproxima o modelo Rice, isto é, o desvio padrão de sombreamento de envoltória não pode ser desprezado, ou seja, tem importância relevante.

3. CONCLUSÃO

O ambiente de rádio móvel foi amplamente modelado, no que diz respeito à variabilidade do sinal em torno desta média do sinal recebido. A avaliação da variabilidade do sinal em torno da média da potência necessita ser feita por métodos estatísticos. Foram descritos os diversos modelos estatísticos utilizados para caracterizar a variabilidade do sinal de rádio móvel.

A modelagem estatística da envoltória do sinal foi feita de forma a que as densidades fossem colocadas em função da média da potência do sinal. Assim, as densidades da envoltória do sinal poduderam ser comparadas entre si. Além disso, para todas as modelagens apresentadas, a média de potência do sinal foi relacionada àmédia da envoltória do sinal. Assim, também é possível obter as variâncias da envoltória do sinal e, portanto, os desvios padrão para todas as densidades apresentadas.

Além disso, foram proposta as modelagens estatísticas da envoltória do sinal de rádio móvel para os ambientes Nakagami Sombreado e Rice Sombreado, a saber: a densidade composta Nakagami/Normal, a densidade composta Nakagami/Log-Normal, a densidade composta Rice/Normal, e a densidade composta Rice/Log-Normal.

Ainda, diversos modelos estatísticos para a envoltória do sinal de rádio móvel foram comparados entre si com o objetivo de validar os modelos propostos.

4. REFERENCES

[1] Yacoub, M.D., *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press (1993).

[2] Nakagami, M., “The m-Distribution - A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading”, *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, W. G. Hoffman Ed., 3-36, Oxford (1960).

[3] Hess, G. C., *Land-Mobile Radio System Engineering*, Artech House, Boston-London (1993).

[4] Muammar, R. and Gupta, S.C., “Cochannel Interference in High-Capacity Radio Systems,” *IEEE Trans. Comm. vol. COM-30*, **8**, 1973-1978 (1982).

[5] Camiña, N.K., *Interferência Cocanal e Técnicas de encaminhamentto Alternativo*, Tese de Doutorado, FEE-UNICAMP (1997).

APÊNDICE A

As densidades compostas de Rayleigh/Normal, de Nakagami/Normal e de Rice/Normal são obtidas pela composição das densidades de Rayleigh, de Nakagami e de Rice, respectivamente, com a densidade Normal, utilizando a expressão a seguir

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\boldsymbol{r}}\left(r \mid \boldsymbol{R'} = R'\right)\; f_{\boldsymbol{R'}}\left(R'\right)\; dR' \qquad (21)$$

onde $f_{\boldsymbol{r}}\,(r \mid \boldsymbol{R'} = R')$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, condicional à média local, dada em decibéis, e $f_{\boldsymbol{R'}}\,(R')$ é a função densidade de probabilidade da média local, dada em decibéis.

As funções densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r \mid \boldsymbol{R'} = R')$, da envoltória, condicional à média local, dada em decibéis, são obtidas, para o modelo Rayleigh, das Equações 1 e 2; para o modelo Nakagami, das Equações 3 e 5, e para o modelo Rice, das Equações 6 e 7. Deve-se ainda considerar que a média na área destas densidades de probabilidade é na verdade a média local dos modelos sombreados.

A função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{R'}}\,(R')$, da média local, dada em decibéis, é obtida, para o modelo Log-Normal, da Equação 9.

Ainda, deve-se considerar que a média na área da envoltória para densidade composta de Rayleigh/Normal, de Nakagami/Normal e de Rice/Normal é dada por [5]

$$\overline{r} = 10^{\frac{\widetilde{R'}}{20}}\, exp\left(\frac{\sigma_{R'}^2}{8\,C^2}\right) \qquad (22)$$

ou ainda, que a média na área, $\overline{R} = 20\, log\,\overline{r}$,é dada em decibéis, da envoltória, para estas densidades é dada por [5]

$$\overline{R} = \widetilde{R'} + \frac{\sigma_{R'}^2}{4\,C} \qquad (23)$$

onde

APÊNDICE B

As densidades compostas de Rayleigh/Log-Normal, de Nakagami/Log-Normal e de Rice/Log-Normal são obtidas pela composição das densidades de Rayleigh, de Nakagami e de Rice, respectivamente, e da densidade Log-Normal, utilizando a expressão a seguir

$$f_{\boldsymbol{r}}\,(r) = \int_{0}^{\infty} f_{\boldsymbol{r}}\left(r \mid \boldsymbol{r'} = r'\right)\; f_{\boldsymbol{r'}}\left(r'\right)\; dr' \qquad (24)$$

onde $f_{\boldsymbol{r}}\,(r \mid \boldsymbol{r'} = r')$ é a função densidade de probabilidade da envoltória, condicional à média local, expressa em unidades naturais, e $f_{\boldsymbol{r'}}\,(r')$ é a função densidade de probabilidade da média local, expressa em unidades naturais.

As funções densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{r}}\,(r \mid \boldsymbol{r'} = r')$, da envoltória, condicional à média local, expressa em unidades naturais, são obtidas, para o modelo Rayleigh, das Equações 1 e 2; para o modelo Nakagami, das Equações 3 e 5, e para o modelo Rice, das Equações 6 e 7.

A função densidade de probabilidade, $f_{\boldsymbol{R'}}\,(R')$, da média local, expressa em unidades naturais, é obtida, para o modelo Log-Normal, das Equações 10 e 11.

Ainda, deve-se considerar que a média da densidade composta de Rayleigh/Log-Normal, da densidade composta de Nakagami/Log-Normal e da densidade composta de Rice/Log-Normal, é dada por [5] $\overline{r} = E\,[\boldsymbol{r'}] = \overline{r'}$

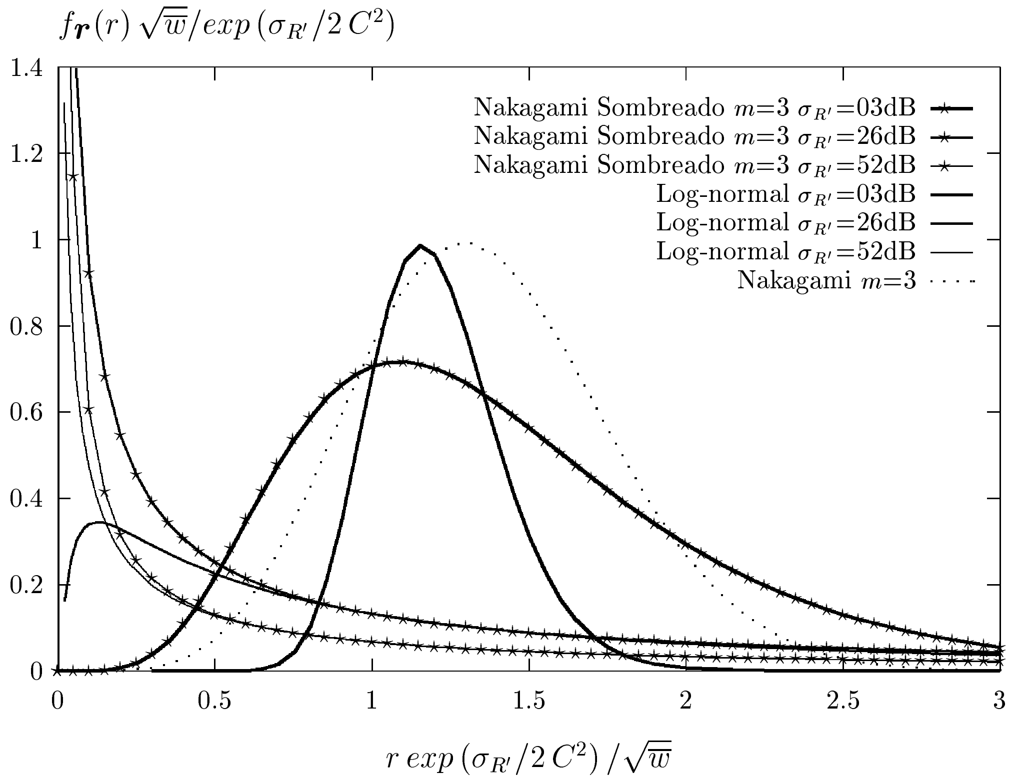

Figure 1: Comparação entre o modelo Nakagami Sombreado e os modelos Nakagami e Log-Normal para a densidade da envoltória, para $m = 3$.

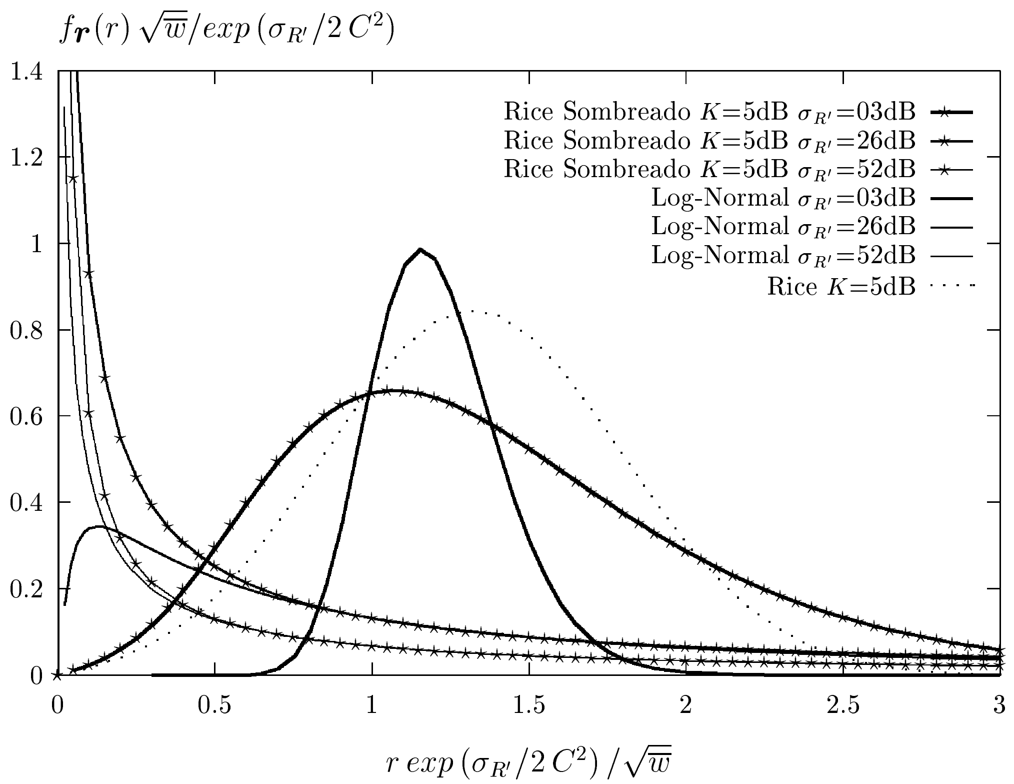

Figure 2: Comparação entre o modelo Rice Sombreado e os modelos Rice e Log-Normal para a densidade da envoltória, para $K = 5$ dB.