

Medida da Largura de Banda de Coerência para Ambiente Suburbano em 900MHz

Antonio Marcelo O. Ribeiro, José Boris A. Butron e Evandro Conforti, *Senior Member, IEEE*

Resumo—Uma técnica para a caracterização experimental da largura de banda de coerência é introduzida. Dois analisadores de espectro com varreduras sincronizadas são usados para medir simultaneamente as envoltórias de duas portadoras separadas em frequência. As medidas foram feitas em 900MHz, calculando-se os coeficientes de correlação de amplitude para várias separações de frequência. A largura de banda de coerência foi estimada a partir das funções de distribuição cumulativa dos coeficientes calculados em 500kHz para um nível de correlação de 0,5.

Palavras-Chave—Rádio-móvel, coeficiente de correlação de amplitude, desvanecimento Rayleigh, largura de banda de coerência.

Abstract—A technique for experimental characterization of the coherence bandwidth is presented. Two spectrum analyzers are used to acquire simultaneously the envelopes of two RF signals separated in frequency. Measurements were done at 900 MHz, evaluating the correlation coefficients for several frequency separations. Coherence bandwidth was found to be 500 kHz when 0.5 correlation level is considered.

Index Terms—mobile radio, amplitude correlation coefficient, Rayleigh fading, coherence bandwidth.

I. INTRODUÇÃO

A INTERNET e os crescentes serviços de comunicação sem fio (voz e dados) vêm aumentando a demanda por maior capacidade de tráfego e serviços multimídia. Serviços móveis sem fio de Terceira Geração (3G) foram propostos como uma evolução para as redes atuais. A princípio, um único padrão internacional era o objetivo. Contudo, dois dos principais sistemas propostos para 3G foram reconhecidos pela *International Telecommunication Union (ITU)* [1]:

- *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)* - Conhecido como *Wideband Code-Division Multiple Access (WCDMA)*. Diferentes portadoras de 5 MHz de largura de banda são usadas para enlace direto e reverso, respectivamente, com taxas de dados de até 384 kb/s (2 Mb/s por portadora).
- *cdma2000* - CDMA multi-portadora, que é uma evolução do *cdmaOne (IS-95A e IS-95B)*. Usa portadoras de 1.25 MHz de largura de banda. Representa uma família de tecnologias que inclui: (a) *cdma2000 1xRadio Transmission Technology (1xRTT)*

que fornece serviços de dados por pacote a taxas de 144kb/s; (b) *cdma2000 1xEvolution Data Only (1xEV-DO)* que requer uma portadora CDMA separada apenas para dados, fornece taxas de dados de até 2.4 Mb/s por setor no enlace direto, mas apenas 153 kb/s no enlace reverso; (c) *Cdma2000 1xEvolution Data and Voice (1xEV-DV)* fornece serviços de voz e serviços de dados por pacote de alta velocidade simultâneos a taxas de até 3Mb/s. *1xEV-DV* está em estágio de desenvolvimento; seu padrão foi submetido em Julho de 2002 ao *ITU* para aprovação.

As condições de propagação no ambiente rádio-móvel têm demandado a investigação dos efeitos dispersivos da propagação em múltiplo percurso. Modernamente, as pesquisas priorizam os efeitos dispersivos sobre a transmissão de sinais de banda larga (tecnologias 3G) assim como as técnicas de diversidade e equalização visando a mitigar esses efeitos. Um parâmetro importante que caracteriza o canal de propagação é a *largura de banda de coerência, B_c* . A *largura de banda de coerência* é a faixa de frequência sobre a qual duas componentes de frequência têm forte probabilidade para correlação de amplitude. O valor de B_c pode ser estimado a partir de medidas da *função correlação de frequência*.

A caracterização da *função de correlação de frequência* pode ser feita através da medida simultânea das envoltórias de duas portadoras separadas em frequência [2]. Isto é normalmente feito com receptores especialmente desenvolvidos para esta finalidade. Entretanto esta abordagem é custosa e específica para cada banda de frequência. Neste trabalho é introduzida uma técnica utilizando dois analisadores de espectro comerciais, cujas varreduras são sincronizadas e controladas através de uma interface GPIB (*IEEE 488.2*). Esta técnica não necessita de receptores especiais, sua implementação é rápida e seu custo é baixo, caso haja analisadores disponíveis. A partir das medidas aqui apresentadas, pode-se estimar a *largura de banda de coerência, B_c* , para diferentes valores de correlação. Mostra-se, ainda, que o *coeficiente de correlação* e a *largura de banda de coerência* são variáveis com a posição do móvel. Um valor de B_c para *coeficiente de correlação* igual a 0.5 foi estimado e está de acordo com a análise teórica reportada em [3].

II. O AMBIENTE RÁDIO-MÓVEL

O movimento do receptor torna complexo o fenômeno de propagação das ondas de rádio. Em áreas urbanas, a presença de objetos refletores e espalhadores dispersa o

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, FAPESP e CNPq.

A. M. O. Ribeiro, J. B. A. Butron e E. Conforti, Departamento de Microonda e Óptica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Unicamp, São Paulo, Brasil. E-mail: aribeiro@dmo.fee.unicamp.br.

sinal transmitido em amplitude, fase e tempo. O sinal pode se propagar do transmissor para o receptor sobre múltiplos caminhos, deslocados entre si no tempo e na orientação espacial. O sinal recebido pelo móvel em qualquer ponto no espaço pode consistir de um grande número de ondas planas tendo amplitudes, fases e ângulos de chegada distribuídos aleatoriamente. Estas ondas, chamadas de *ondas de múltiplo percurso*, combinam-se na antena do receptor resultando em um sinal recebido que pode sofrer grandes variações em amplitude e fase. Diz-se que o sinal sofre *desvanecimento rápido* (*Fast Fading*), devido às rápidas flutuações que ocorrem na intensidade do sinal. Mesmo quando o receptor móvel está parado, o sinal recebido pode sofrer *desvanecimento rápido* devido ao movimento dos obstáculos ao longo do caminho de propagação [4].

O *desvanecimento rápido* está diretamente relacionado com a resposta ao impulso do canal. Para um impulso simples transmitido através do canal, o *perfil de atraso de potência*, $S(\tau)$, como função do *atraso em excesso*, τ , é obtido no receptor móvel. O *atraso em excesso* representa o atraso de propagação do sinal que excede o tempo de chegada da primeira componente de múltiplo percurso. Para um canal de rádio-móvel típico, os valores de $S(\tau)$ geralmente consistem em componentes discretos de múltiplo percurso (como impulsos ocorrendo em valores específicos de τ ao longo do perfil de potência). Na prática, encontra-se $S(\tau)$ tomando uma média espacial de muitos perfis de potência medidos em diferentes posições sobre uma área local [5].

A partir dos valores de $S(\tau)$, pode-se definir o parâmetro *atraso em excesso máximo*, T_m , que corresponde ao tempo entre a primeira e a última componente de múltiplo percurso recebida a qual excede algum nível de limiar. O nível de limiar pode ser escolhido a 10 ou 20 dB abaixo do nível da componente mais forte [6]. O valor de T_m está relacionado ao *tempo de símbolo*, T_s , transmitido através do canal. Um canal é dito exibir *desvanecimento seletivo em frequência* se $T_m > T_s$. Quando esta condição ocorre, componentes de múltiplo percurso de um símbolo são recebidas em instantes após a ocorrência do próprio símbolo, portanto, durante a recepção dos símbolos subsequentes. Diz-se, neste caso, que a seqüência de símbolos sofre *Interferência Inter-Simbólica* (*IIS*) e o uso de um equalizador no receptor é necessário para resolver as componentes de múltiplo percurso.

Uma caracterização análoga de $S(\tau)$ no domínio do tempo pode ser realizada no domínio da frequência. A *função de correlação de frequência*, $R(\Delta f)$, é definida como a transformada de Fourier de $S(\tau)$. O parâmetro $R(\Delta f)$ representa a correlação entre as respostas do canal para dois sinais como função da diferença de frequência entre os mesmos, e pode ser medida transmitindo duas portadoras com uma separação de frequência $\Delta f = f_2 - f_1$, calculando a correlação cruzada entre os dois sinais recebidos separadamente e repetindo o processo muitas vezes com separação Δf cada vez maior [6]. A *largura de banda de coerência*, B_c , é uma medida estatística da faixa de frequência sobre a qual o canal passa todas as componentes espectrais do sinal com aproximadamente igual ganho e fase linear. Em outras palavras, B_c é a faixa de frequências em

que duas componentes de frequências têm uma alta correlação de amplitude, isto é, são afetadas pelo canal de uma forma similar. No domínio da frequência, um canal é dito exibir *desvanecimento seletivo em frequência* se a largura de banda do sinal, B_w , transmitida pelo canal é maior que a *largura de banda de coerência* do canal. Desde que $B_w > B_c$, as componentes de frequência no espectro do sinal espaçadas por um valor maior que B_c terão baixa correlação de amplitude, ou seja, sofrerão desvanecimentos decorrelacionados. A *largura de banda de coerência* é um parâmetro relevante porque limita a taxa de dados que pode ser transmitida através do canal sem a necessidade de um equalizador para resolver as componentes de múltiplo percurso. Ela é também importante para a avaliação de sistemas de diversidade em frequência, pois define uma separação de frequência na qual os sinais são suficientemente decorrelacionados tal que a probabilidade de ocorrer desvanecimentos simultâneos é baixa.

III. TÉCNICA DE MEDIDAS

A. Montagem Experimental

Um diagrama bloco do sistema de medidas é mostrado na Fig. 1. Dois geradores de RF foram usados para gerar as duas portadoras CW na faixa de 900MHz. Os dois sinais são combinados e amplificados a um nível de 20 dBm. O sinal combinado alimenta uma antena *Yagi* com 12Bi de ganho, polarizada verticalmente.

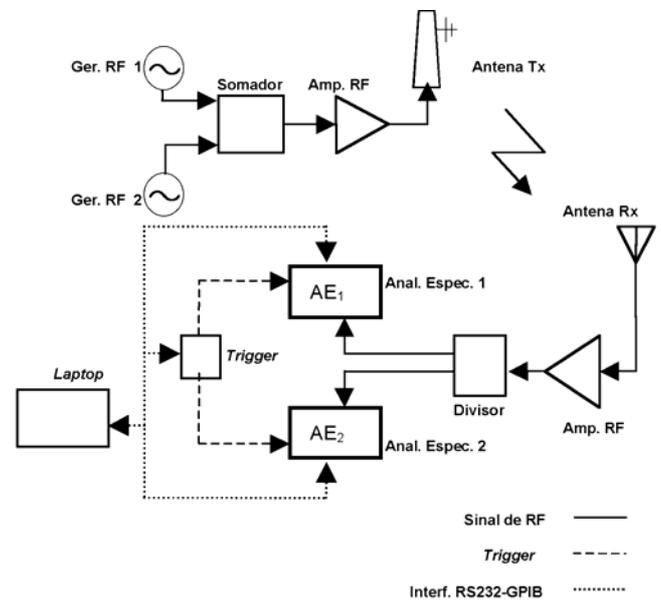


Fig. 1. Diagrama bloco do sistema de medidas.

O sistema de recepção foi embarcado em um veículo. Uma antena monopolo polarizada verticalmente, posicionada no topo do veículo, foi usada para receber o sinal de rádio-móvel. Um divisor de potência recebe o sinal amplificado da antena e o divide em duas saídas, cada uma conectada à entrada de RF de um analisador de espectro. Os analisadores são usados para gravar simultaneamente as envoltórias das duas portadoras separadas em frequência por $\Delta f = f_2 - f_1$. Cada analisador tem a sua frequência central ajustada para f_2 e f_1 , respectivamente. Com a função zero

span ativada, a envoltória de cada portadora é gravada no respectivo analisador.

Para garantir que as duas envoltórias sejam gravadas simultaneamente e as amostras de cada curva estejam respectivamente sincronizadas no tempo, as varreduras de cada analisador são disparadas no mesmo instante por um sinal de *trigger* externo. Ainda, o tempo de varredura, $S=2s$, foi ajustado para os dois analisadores. A cada varredura, uma curva de $N=401$ pontos é gravada na memória de cada analisador. Os dois analisadores de espectro e o gerador de *trigger* são controlados por um *Notebook* através de uma interface conversor *RS232-GPIB (National Instruments™)*. Um programa desenvolvido em *LabView™* controla a seqüência de medidas, adquire as curvas gravadas pelos analisadores e salva os resultados em arquivos *ASCII*. Um sistema *No-Break*, não indicado na Fig. 1, foi usado para fornecer alimentação *AC* senoidal aos instrumentos embarcados.

B. Ambiente das medidas realizadas

A Fig. 2 apresenta um mapa do ambiente onde as medidas foram realizadas. O ambiente localiza-se no campus da Universidade em um ambiente suburbano típico, com vários prédios baixos (no máximo dois andares), ruas e uma densidade moderada de árvores no caminho de propagação. A distância entre a antena de transmissão, TX, e a área local das medidas, RX, foi estimada em 250m. A antena de transmissão foi posicionada no topo de um prédio a aproximadamente 10m do solo.

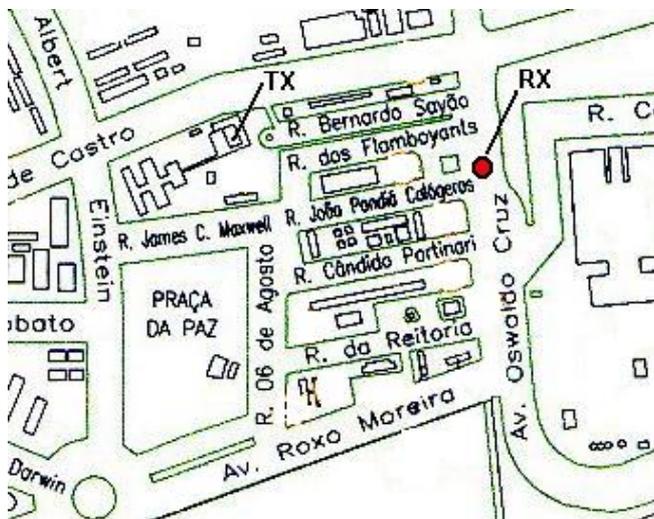


Fig. 2. Ambiente das medidas e localização das antenas de TX e de RX.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o sistema de recepção embarcado em um veículo, cinco conjuntos de medidas foram feitos gravando simultaneamente duas envoltórias de sinais separados em frequência por 50, 200, 500, 1000 e 2000 kHz. Cada conjunto de medidas foi formado por várias passagens com o veículo pela área local. Durante as medidas, a velocidade do veículo foi mantida aproximadamente constante em 30 km/h (8,3 m/s).

Para atender o critério de *Nyquist*, a taxa de amostragem

mínima deve ser tal que a distância entre duas amostras consecutivas, L_s , seja menor que $\lambda/4$ [7]. Ainda, $L_s=vT_s$, onde v representa a velocidade do veículo e T_s é o tempo de amostragem. A cada varredura foi gravada uma curva de $N=401$ pontos. Assim, $T_s=S/400$, e S é o tempo de varredura do analisador. Então a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\begin{aligned} v(S/400) &< \lambda/4 \\ S &< \frac{(\lambda/4)400}{v}. \end{aligned} \quad (1)$$

Para a frequência de 900 MHz tem-se $\lambda/4=8,3cm$. Substituindo este valor e $v=8,3m/s$ em (1), tem-se $S<4s$. Já foi mencionado que $S=2s$ foi ajustado para ambos os analisadores, garantindo assim que o sinal foi amostrado com o dobro da taxa mínima necessária. Portanto, o valor T_s é igual a 5ms, o que corresponde a uma taxa de amostragem $F_s=200$ amostras/s.

Durante o tempo $S=2s$ de uma varredura, o veículo percorre uma distância $L=Sv=16,7m$. Esta distância equivale aproximadamente a $40\lambda=13,3m$, onde a média local do sinal de rádio-móvel é considerada não variar significativamente, considerando que o sinal sofre desvanecimento *Rayleigh* [8]. Isto evita o aparecimento de qualquer tendência nas amostras provocada por variações na média local (o sinal é considerado estacionário quanto a sua média).

O coeficiente de correlação normalizado ρ_{xy} pode ser estimado de N pares de valores observados por [9]

$$r_{xy} = \frac{(\sum_{i=1}^N \frac{x_i y_i}{N}) - (\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N})(\sum_{i=1}^N \frac{y_i}{N})}{[(\sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{N}) - (\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N})^2]^{1/2} [(\sum_{i=1}^N \frac{y_i^2}{N}) - (\sum_{i=1}^N \frac{y_i}{N})^2]^{1/2}} \quad (2)$$

onde: x_i e y_i são, respectivamente, as amostras do par de valores observados e N é o número de amostras.

O estimador r_{xy} , contudo, é uma variável aleatória distribuída de alguma forma ao redor do valor real do coeficiente de correlação ρ_{xy} , e incorrer-se-ia em erro ao considerar $\rho_{xy}=r_{xy}$. O método geralmente aceito é definir um intervalo que inclua o parâmetro sendo estimado com algum grau de confiança, que é conhecido como *intervalo de confiança*. Para definir um *intervalo de confiança* para r_{xy} , é conveniente trabalhar com a variável aleatória ϕ dada por

$$\phi = (1/2) \ln[(1+r_{xy})/(1-r_{xy})], \quad (3)$$

que tem uma distribuição aproximadamente gaussiana com média e variância de

$$\begin{aligned} \mu_\phi &= (1/2) \ln[(1+\rho_{xy})/(1-\rho_{xy})] \\ \sigma_\phi^2 &= 1/(N-3). \end{aligned} \quad (4)$$

De (3) e (4), um *intervalo de confiança* para r_{xy} pode ser definido como [9]

$$P[-z_{\alpha/2} < (\varphi - \mu_\varphi)\sqrt{N-3} \leq z_{\alpha/2}] = 1 - \alpha, \quad (5)$$

onde z é uma variável Gaussiana normalizada e $z_{\alpha/2}$ é um valor de z que corresponde a um valor de probabilidade dado por

$$P(z_{\alpha/2}) = \int_{-\infty}^{z_{\alpha/2}} p(z)dz = P[z \leq z_{\alpha}] = 1 - \alpha / 2. \quad (6)$$

Rearranjando os termos de (5), o intervalo de confiança para ρ_{xy} em função de φ e N é dado por

$$P\left[\frac{e^{2b} - 1}{e^{2b} + 1} < \rho_{xy} \leq \frac{e^{2a} - 1}{e^{2a} + 1}\right] = 1 - \alpha, \quad (7)$$

com

$$\begin{aligned} a &= \varphi + z_{\alpha/2} / (N - 3)^{1/2} \\ b &= \varphi - z_{\alpha/2} / (N - 3)^{1/2}. \end{aligned} \quad (8)$$

O intervalo de confiança em (7) equivale a dizer: “o valor de ρ_{xy} está dentro do intervalo com um grau de confiança de $100(1-\alpha)\%$ ”. Na tabela I, intervalos de confiança de 90% para ρ_{xy} foram calculados como função de r_{xy} e $N=401$ amostras.

TABELA I
INTERVALO DE CONFIANÇA DE 90% CALCULADOS PARA ρ_{xy}

r_{xy}	Limite Superior	Limite Inferior
0,990	0,991	0,988
0,900	0,914	0,883
0,800	0,827	0,768
0,700	0,739	0,655
0,600	0,650	0,544
0,500	0,559	0,436
0,400	0,466	0,328
0,300	0,372	0,223
0,200	0,277	0,120
0,100	0,180	0,018
0,010	0,092	-0,072
0	0,082	-0,082

A Tabela I mostra que o intervalo de confiança de 90% para ρ_{xy} cresce quando o valor do estimador tende para zero. Para $0 < r_{xy} < 0,5$, o desvio máximo, δ , do estimador está no intervalo $0,064 < \delta < 0,082$. Isto corresponde a um desvio máximo de 8,2% na escala de r_{xy} de 0 a 1. Ainda, para valores de $r_{xy} > 0,5$ o desvio máximo do estimador é menor que 6% da escala total. Portanto, $N=401$ amostras é suficiente para o cálculo de estimador de correlação com pequeno erro de desvio.

Como ilustração, uma curva medida de 401 amostras com duas envoltórias de sinais separados por 50 kHz é apresentada na Fig. 3. Nesta figura, a área selecionada é ampliada e mostrada na Fig. 4 para melhor visualização das duas envoltórias separadamente. Das Fig. 3 e 4, pode-se observar alta correlação entre as duas envoltórias, o que indica que a separação $\Delta f = 50 \text{ kHz}$ provavelmente é menor que a largura de banda de coerência do canal, B_c .

O mesmo não ocorre para sinais separados de $\Delta f = 1000 \text{ kHz}$. Como mostrado na Fig. 5, é possível notar

uma des correlação evidente entre as envoltórias dos dois sinais para este valor de Δf .

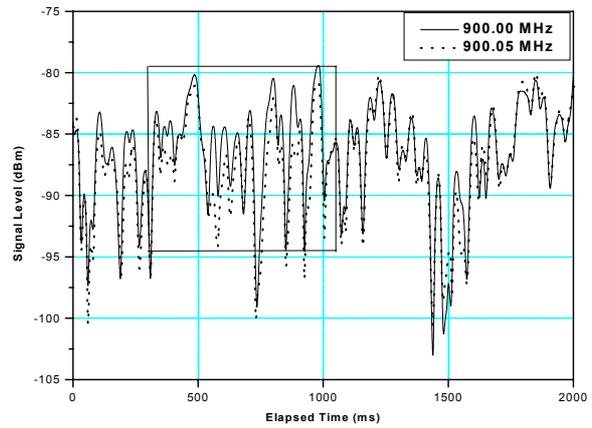


Fig. 3. Envoltórias medidas de sinais com separação $\Delta f = 50 \text{ kHz}$.

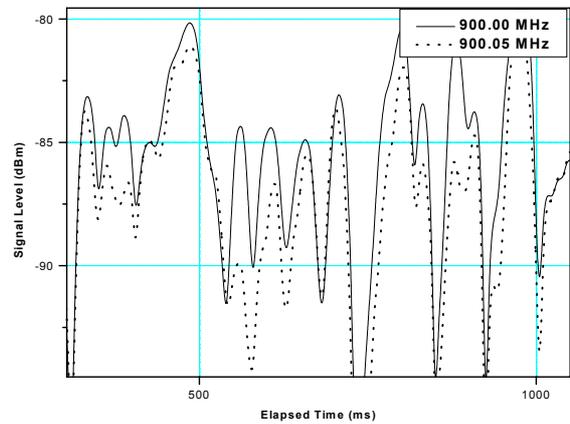


Fig. 4. Área selecionada na Fig.3 está ampliada aqui.

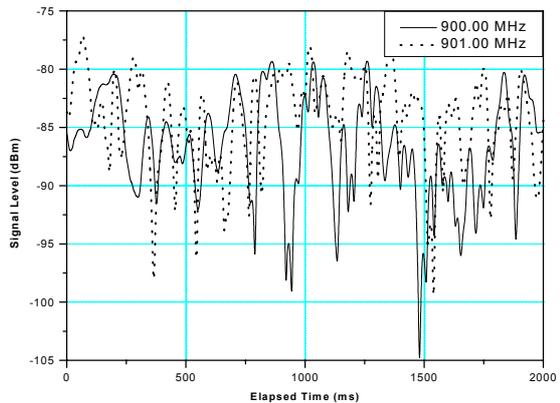


Fig. 5. Envoltórias medidas de sinais com separação $\Delta f = 1000 \text{ kHz}$.

Coefficientes de correlação estimados, r_{xy} , foram calculados entre as curvas de 401 amostras para os cinco valores de $\Delta f = f_2 - f_1$. Com o objetivo de interpretar os resultados, funções de distribuição cumulativa dos valores de r_{xy} foram calculadas para cada separação de frequência

[2] e são mostrados na Fig. 6. Dentro do conjunto de medidas de r_{xy} para cada espaçamento de frequência, foi calculada a probabilidade de que o valor de r_{xy} esteja abaixo um certo nível entre 0 e 1. Desta figura, está claro que as distribuições cumulativas para $\Delta f=50kHz$ e $\Delta f=200kHz$ são praticamente idênticas. Também é evidente que a faixa sobre a qual r_{xy} varia fica mais ampla à medida que o espaçamento de frequência aumenta. Por último, os valores de correlação diminuem com o aumento do espaçamento de frequência.

O coeficiente de correlação como função do espaçamento de frequência é estimado destas distribuições cumulativas calculando-se o nível abaixo do qual r_{xy} permanece por 10% do tempo para cada Δf . É o mesmo que dizer que para um dado Δf , 90% das medidas de r_{xy} estão acima de um certo nível, definindo, portanto, um valor mínimo para r_{xy} . Estes valores estão apresentados na Tabela II e Fig. 7. Nesta figura é mostrada em linha tracejada a curva do coeficiente de correlação teórico reportado em [3]. Neste modelo, ρ_{xy} , para o atraso relativo nulo entre as duas envoltórias, $\tau_e=0$, é dado por $\rho_{xy} = 1/[1+(\Delta\omega)^2\sigma^2]$, onde $\Delta\omega=\omega_2-\omega_1$ é a separação de frequência entre as envoltórias e σ_τ é o rms delay spread, definido como a raiz quadrada do segundo momento central do perfil de atraso de potência τ , $\sigma_\tau = (\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2)^{1/2}$.

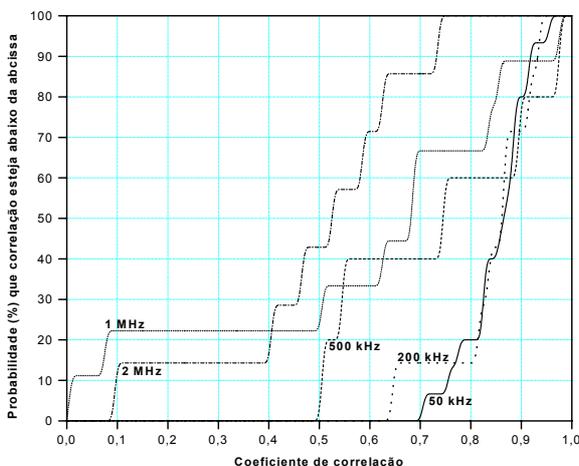


Fig. 6. Funções de distribuição cumulativa dos coeficientes de correlação das envoltórias medidas para as separações de frequência de: 50, 200, 500, 1000 e 2000kHz.

Valores típicos de σ_τ para ambiente suburbano foram medidos por Cox [10] na frequência de 910MHz, onde foi reportado um valor médio de $\sigma_\tau=310ns$, que é usado aqui para o cálculo de ρ_{xy} teórico.

Se a largura de banda de coerência, B_c , é definida como a largura de banda, sobre a qual o coeficiente de correlação, ρ_{xy} , está acima de 0,5, então da Fig. 7 um espaçamento de frequência menor ou igual a 500kHz garantirá um nível de correlação abaixo de 0,5 para 10% do tempo. Portanto, obteve-se para o ambiente suburbano das medidas o valor aproximado de $B_c=500kHz$.

Uma aproximação de B_c correspondendo a largura de

banda tendo uma correlação de no mínimo 0,5 é [4]

$$B_c = 1/(5\sigma_\tau) \quad (9)$$

O valor de $\sigma_\tau=310ns$ parece apropriado para o ambiente das medidas, correspondendo a um valor de $B_c \cong 645kHz$. Este valor de B_c está próximo da largura de banda de coerência estimada neste trabalho pelo método de medida direta da função de correlação. É importante notar que não existe uma relação analítica entre rms delay spread e B_c , e (9) é apenas uma primeira aproximação. Na prática, é necessário medir o perfil de atraso de potência médio $S(\tau)$ do ambiente de interesse para determinar como o canal vai responder a um sinal transmitido particular.

TABELA II
NÍVEL DE CORRELAÇÃO ACIMA DO QUAL R_{xy}
PERMANECE POR 90% DO TEMPO PARA CADA ΔF

$\Delta F(kHz)$	Nível de correlação
50	0,75
200	0,65
500	0,51
1000	0,08
2000	0,10

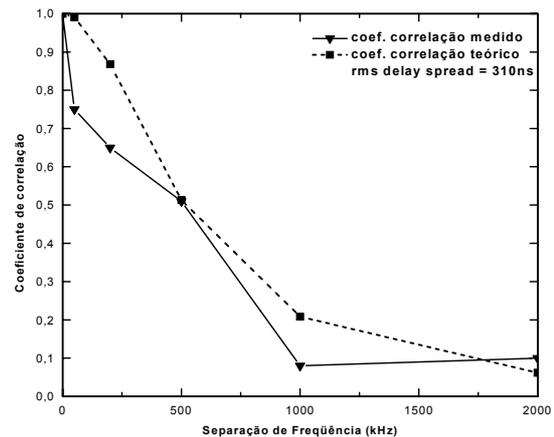


Fig. 7. Valores mínimos de coeficiente de correlação para 90% do tempo como função do espaçamento de frequência.

V. CONCLUSÕES

Funções de correlação de frequência foram medidas e analisadas e o valor de largura de banda de coerência foi estimado para um ambiente suburbano na faixa de 900MHz.

Foi verificado que o coeficiente de correlação varia com a posição do receptor móvel e que esta variação se torna mais ampla com o aumento da separação de frequência. Assim, é necessário medir as envoltórias de sinal em um grande número de posições de uma área local para obter dados estatísticos confiáveis. Um número apropriado de amostras N que serão usadas para calcular a função de correlação deve ser definido. N deve ser grande o suficiente tal que r_{xy} introduza pequeno erro ao estimar a função de correlação de frequência. Ainda, um comprimento do sinal de 40λ deve ser usado no cálculo dos coeficientes de correlação de forma que erros não sejam introduzidos por variações na média

local do sinal.

As funções de distribuição cumulativa dos coeficientes de correlação mostraram que estes diminuem com o aumento da separação de frequência. Foi encontrado que um valor de $\Delta f \leq 500 \text{ kHz}$ garantirá um nível de correlação acima de 0,5 para 90% do tempo no ambiente suburbano onde as medidas foram feitas.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Vriendt, P. Lain, and C. Lerouge, "Mobile Network Evolution: A Revolution on the Move," *IEEE Commun. Mag.*, abril 2002, pp. 104-111.
- [2] M. G. Sánchez, A. M. Hammoudeh, E. Grindrod, and J.-P. Kermaol, "Coherence bandwidth characterization in an urban microcell at 62.4 GHz," *IEEE Trans. Vehic. Technology*, vol. 49, No. 2, março. 2000, pp. 607-613.
- [3] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. Piscataway, NJ: IEEE PRESS, 1994 (reimpressão), pp.45-52.
- [4] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*. Upper Saddle River, NY: Prentice Hall PRT, 1996, cap. 4.
- [5] T. S. Rappaport, et. al., "Statistical channel impulse response models for factory and open plan building radio communication system design," *IEEE Trans. on Communications*, vol. COM-39, No. 5, pp. 794-806, maio 1991.
- [6] B. Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communications Systems Part I: Characterization," *IEEE Commun. Mag.*, julho 1997, pp. 90-100.
- [7] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993, pp. 151-155.
- [8] W. C. Lee, "Estimate of local average power of a mobile radio signal," *IEEE Trans. Vehic. Technology*, vol. VT-34, No. 1, pp. 22-27, fevereiro. 1985.
- [9] J. S. Bendat, A. G. Piersol, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. New York: Wiley-Interscience, 1971, cap. 4.
- [10] D. C. Cox, "Delay doppler characteristics of multipath delay spread and average excess delay for 910 MHz urban mobile radio paths," *IEEE Trans. Vehic. Technology*, vol. AP-20, No. 5, pp. 625-635, setembro. 1972.