

Caracterização do Tempo de Coerência em um Ambiente Suburbano em 836 MHz

Antonio Marcelo O. Ribeiro e Evandro Conforti, *Senior Member, IEEE*

Resumo—Uma técnica para a caracterização experimental do tempo de coerência é introduzida. Envoltórias de sinal de rádio-móvel, em 836,37 MHz, são adquiridas utilizando um analisador de espectro. Coeficientes de autocorrelação de amplitude são calculados para as envoltórias adquiridas. O tempo de coerência foi estimado a partir das funções de distribuição cumulativa dos coeficientes calculados, para um nível de correlação de 0,5.

Palavras-Chave—coeficiente de autocorrelação, desvanecimento, envoltória, rádio-móvel, tempo de coerência.

Abstract—An experimental technique for characterization of coherence time is presented. A spectrum analyzer acquires radio mobile envelopes, at 836.37 MHz. Autocorrelation coefficients are calculated for the acquired envelopes. The coherence time is estimated from the cumulative probability distribution function of the calculated coefficients, for a 0.5 correlation level.

Index Terms—Autocorrelation coefficient, coherence time, fading, envelope, radio mobile.

I. INTRODUÇÃO

No ambiente de comunicações rádio-móvel, há instantes em que a unidade móvel estará em movimento, e outras vezes nas quais o móvel estará estacionário. Quando em movimento, o móvel percorre diferentes trajetórias em várias velocidades. Ao percorrer seu caminho, o móvel passa por muitos tipos de espalhadores locais, incluindo outros numerosos veículos que estão também em movimento.

O canal de rádio-móvel é, portanto, variante no tempo devido ao movimento relativo entre transmissor e receptor, assim como ao movimento dos espalhadores, os quais provocam mudanças no caminho de propagação. Assim, se um sinal senoidal CW (*continuous wave*) é transmitido, como resultado de variações do canal no tempo, o receptor vê variações de amplitude e fase do sinal recebido. Se todos os espalhadores estiverem estacionários, quando o movimento do receptor cessa, a amplitude e fase do sinal recebido ficam constantes, isto é, o canal permanece invariante no tempo. Se o receptor começar a se movimentar novamente, o canal mais

uma vez se torna variante no tempo. Como as características do canal são dependentes da posição do transmissor e receptor, variação no tempo é equivalente, neste caso, à variação espacial [1].

Para se caracterizar experimentalmente as propriedades da variação no tempo do canal de rádio-móvel, uma portadora senoidal é transmitida através do canal e medidas de campo são realizadas para adquirir envoltórias de campo elétrico. Com os dados de envoltória, o *coeficiente de autocorrelação* temporal, ρ_e , do sinal recebido, pode ser calculado e o *tempo de coerência* do canal, T_0 , pode ser estimado. O tempo de coerência, T_0 , é uma medida do intervalo de tempo sobre o qual a resposta do canal é essencialmente invariante. O coeficiente de autocorrelação, ρ_e , e o parâmetro T_0 dão um conhecimento de quão rápido o canal sofre desvanecimento [1].

A natureza variante no tempo do canal pode ser vista em dois aspectos: *desvanecimento rápido* e *desvanecimento lento*. O termo desvanecimento rápido é usado para descrever canais em que $T_0 < T_b$, onde T_b é o tempo de duração de um símbolo de transmissão [1]. Desta forma, desvanecimento rápido descreve uma condição na qual o tempo em que o canal se comporta de maneira correlacionada é curto, comparado com o tempo de duração de um símbolo. Assim, espera-se que a característica de desvanecimento do canal mude diversas vezes enquanto o símbolo está se propagando, levando a uma distorção no formato do pulso de banda-base. Portanto, desvanecimento rápido provoca deformação no pulso de banda-base, resultando em uma perda de *relação sinal-ruído* (*SNR*), que, freqüentemente, pode levar a uma taxa de erro de bit irrecuperável. Tais pulsos distorcidos causam problemas de sincronização (falhas de *PLL* – *phase-locked-loop* – em receptores) como, também, dificuldades em definir apropriadamente um filtro casado no receptor [1].

Um canal é dito introduzir desvanecimento lento se $T_0 > T_b$. Neste caso, o tempo em que o canal se comporta de maneira correlacionada é longo, quando comparado com o tempo do símbolo transmitido. Assim, o estado do canal permanece inalterado durante o tempo em que o símbolo é transmitido. Os símbolos de transmissão têm menor probabilidade de sofrerem as distorções de pulso descritas acima. De qualquer forma, a degradação primária em um canal com desvanecimento lento é a perda de *SNR* [1].

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

A. M. O. Ribeiro 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.

II. TEMPO DE COERÊNCIA DO CANAL

A. Análise no Domínio do Tempo

Jakes mostrou que o *coeficiente de correlação cruzada*, ρ_e , entre as envoltórias de dois sinais, como função da separação de frequência, $\Delta\omega$, e do atraso de tempo relativo entre os dois sinais, τ_e , é dado por [2]:

$$\rho_e(\Delta\omega, \tau_e) = \frac{J_0^2(\omega_m \tau_e)}{1 + (\Delta\omega)^2 \sigma_\tau^2}, \quad (1)$$

onde ω_m é o *desvio Doppler máximo* da frequência recebida pelo móvel, $\omega_m = 2\pi(V/\lambda)$, sendo V a velocidade do móvel (m/s) e λ , o comprimento de onda do sinal recebido (m); $\Delta\omega = 2\pi(f_2 - f_1)$, a separação de frequência entre os dois sinais; τ_e , o atraso de tempo relativo entre os dois sinais; J_0 , a função de Bessel de ordem zero e de primeiro tipo e σ_τ , o *rms delay spread*, um parâmetro que mede o espalhamento temporal das componentes de múltiplo percurso no canal de rádio.

Como o interesse é caracterizar a correlação temporal do sinal recebido, o valor de $\Delta\omega$ é feito igual a zero em (1). Isto posto, obtém-se o *coeficiente de autocorrelação temporal*, ρ_e , relativo à envoltória do sinal, como função do atraso de tempo relativo em que ele é recebido, τ_e , ou seja, do sinal recebido nos instantes t_0 e $t_0 + \tau_e$:

$$\rho_e(0, \tau_e) = J_0^2(\omega_m \tau_e). \quad (2)$$

Definindo $\beta = 2\pi/\lambda$ como *número de onda*, o coeficiente de autocorrelação temporal pode ser dado como:

$$\rho_e(0, \tau_e) = J_0^2(\beta V \tau_e). \quad (3)$$

Esta função, mostrada na Fig. 1, representa a autocorrelação da resposta do canal a uma senóide transmitida, isto é, especifica o valor de correlação entre a resposta do canal a uma senóide transmitida no instante t_0 e a resposta a uma senóide similar enviada no instante $t_0 + \tau_e$.

B. Análise no Domínio da Frequência

A natureza variante no tempo do canal também pode ser vista no domínio da frequência. Devido ao movimento relativo entre receptor móvel e transmissor e ao movimento dos obstáculos no caminho de propagação, cada onda de múltiplo percurso experimenta um desvio aparente de frequência. O deslocamento na frequência do sinal recebido é chamado *desvio Doppler*, e depende da velocidade do móvel, V , do comprimento de onda do sinal, λ , e do ângulo, θ , entre a direção de movimento do móvel e a direção de chegada da onda de múltiplo percurso recebida. A expressão do desvio *Doppler* é dada por [3]:

$$f_d = \frac{V}{\lambda} \cos\theta. \quad (4)$$

Como o sinal recebido é formado a partir de um grande número de frentes de ondas, com ângulos de chegada distribuídos aleatoriamente, o espectro de potência da componente de campo recebida fica espalhado em frequência,

ocupando uma banda estreita ao redor da frequência de portadora. Caso seja assumida a polarização vertical para o sinal transmitido, o campo elétrico só tem componente na direção z (vertical). Neste caso, considerando uma distribuição uniforme dos ângulos de chegada das frentes de ondas no intervalo $[0, 2\pi]$, o sinal recebido nos terminais de uma antena monopolo vertical, com ganho azimutal constante, terá como coeficiente de autocorrelação temporal da componente de campo elétrico E_z [4]:

$$\rho_{E_z}(\tau_e) = J_0(\beta V \tau_e). \quad (5)$$

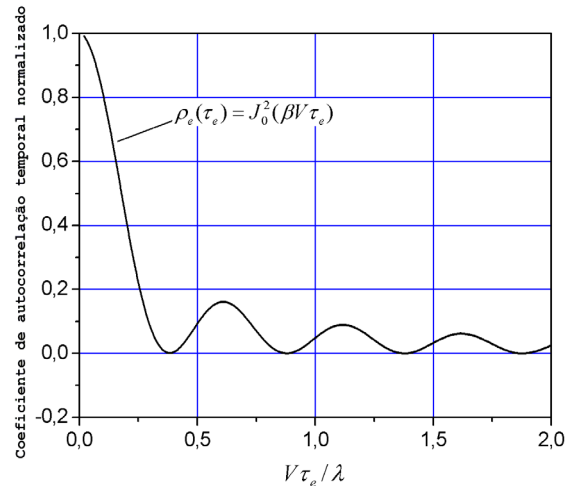


Fig. 1. Coeficiente de autocorrelação de envoltória como função de τ_e .

O *espectro de potência Doppler* da componente de campo E_z nos terminais da antena é dado por [4]:

$$S_{E_z}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{E_z}(\tau_e) \exp(-j\omega\tau_e) d\tau_e \\ = \frac{1}{\pi f_m} \left[1 - \left(\frac{f - f_c}{f_m} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad |f - f_c| \leq f_m. \quad (6)$$

Este espectro está centrado na frequência de portadora, f_c , e é zero fora do intervalo $|f - f_c| \leq f_m$, onde:

$$f_m = \frac{V}{\lambda} \quad (7)$$

é o desvio *Doppler* máximo, como mostrado na Fig. 2.

O espectro de potência *Doppler* do canal é uma medida do espalhamento espectral de uma senóide transmitida, causado pela taxa de variação temporal do canal de rádio-móvel. A largura do espectro de potência *Doppler* é referida como *espalhamento Doppler*. Em um ambiente de múltiplo percurso típico, o sinal chega de diversos caminhos com diferentes distâncias percorridas e diferentes ângulos de chegada, e o desvio *Doppler* de cada caminho é geralmente diferente um do outro. O efeito sobre o sinal recebido é visto como um espalhamento espectral da frequência do sinal transmitido, ao invés de um desvio. Note que o desvio *Doppler* é inversamente proporcional ao tempo de coerência do canal (a menos de uma constante multiplicativa). Portanto, uma relação entre estes dois parâmetros pode ser aproximada

por [1]:

$$T_0 \approx \frac{1}{f_m}. \quad (8)$$

Assim, o desvio *Doppler* máximo, f_m , pode ser considerado como a *taxa de desvanecimento* do canal. Anteriormente, T_0 foi descrito como o intervalo de tempo sobre o qual a resposta do canal a uma senóide é essencialmente invariante. Quando T_0 é mais precisamente definido como a duração de tempo em que a resposta do canal tem uma correlação maior que 0,5, a relação entre T_0 e f_m é dada por [5]:

$$T_0 \approx \frac{9}{16\pi f_m}. \quad (9)$$

Uma regra muito usada é definir T_0 como a média geométrica entre (8) e (9). Isto dá [6]:

$$T_0 = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_m^2}} = \frac{0,423}{f_m}. \quad (10)$$

A definição do tempo de coerência implica que dois sinais, chegando com uma separação maior que T_0 , serão afetados diferentemente pelo canal. Por exemplo, para um veículo viajando a uma velocidade $V = 60 \text{ km/h}$ e frequência de portadora $f_c = 900 \text{ MHz}$, um valor conservador de T_0 pode ser calculado em $3,5 \text{ ms}$, a partir de (9).

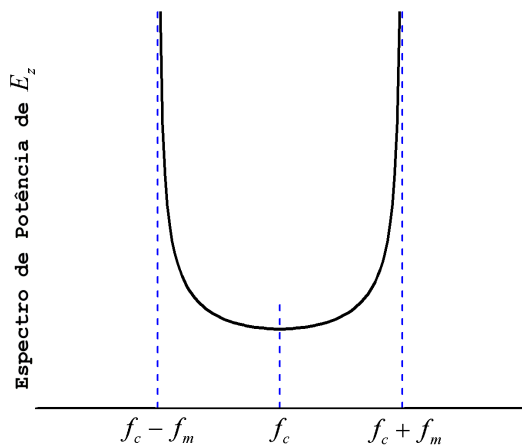


Fig. 2. Espectro de potência da componente E_z do sinal recebido.

III. TÉCNICA DE MEDIÇÃO

A. Montagem Experimental

A Fig. 3 mostra o diagrama em blocos dos sistemas de transmissão e recepção usados para adquirir as medidas de envoltória de sinal no campo. Um gerador de RF gera uma portadora CW na frequência de $836,37 \text{ MHz}$. Este sinal é amplificado a um nível de potência de 20 dBm e aplicado a uma antena Yagi de 12 dBi de ganho, com polarização vertical. O sistema de transmissão foi montado no alto de uma torre de aproximadamente 30 m . O sistema de recepção, embarcado em um veículo, é composto de uma antena monopolo polarizada verticalmente, posicionada no topo do

veículo, usada para receber o sinal de rádio-móvel; um pré-amplificador de RF, usado para amplificar o sinal de recepção, e um analisador de espectro, que tem a função de gravar as envoltórias de sinal. O analisador de espectro tem sua frequência central ajustada para $836,37 \text{ MHz}$ e, com a função *zero span* ativada, uma seção de sinal de 401 amostras é gravada na memória do analisador a cada varredura. O analisador é controlado por um computador *laptop* através de uma interface conversora RS232-GPIB. Foi desenvolvido um programa, usando a linguagem visual *LabVIEW™*, para controlar a seqüência de medições, transferir as curvas gravadas na memória do analisador para o *laptop* e salvar os dados como arquivos *ASCII*. Um sistema *No-break* de 1 kVA foi usado para fornecer alimentação *AC* ao analisador de espectro, pré-amplificador de RF, conversor RS232-GPIB e *laptop*.

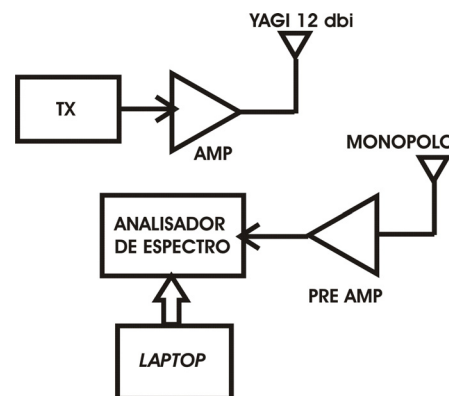


Fig. 3. Diagrama em blocos do sistema de medição. Equipamentos utilizados: TX – Wavetek RF Generator 100 kHz - 1300 MHz, AMP – HP 8347A RF Amplifier 100 kHz - 3 GHz, PRE AMP – HP 8447E Amplifier 100 kHz - 1300 MHz, ANALISADOR DE ESPECTRO – HP 8593E e CONVERSOR RS232-GPIB – National Instruments GPIB-232CT-A.

B. Ambiente das Medidas

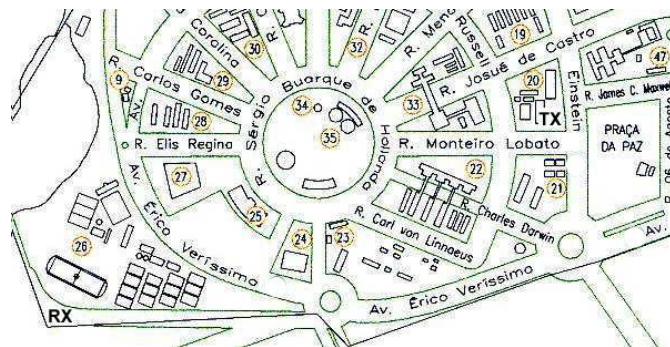


Fig. 4. Ambiente das medições e localização das antenas de transmissão (TX) e de recepção (RX), no Campus da Unicamp.

As medições foram realizadas em ambiente suburbano típico, com prédios baixos (no máximo dois andares) e uma densidade moderada de árvores entre antena de transmissão e o móvel, como mostrado na Fig. 4. A distância entre antena de transmissão e a área local das medições foi estimada em

1250 m. A avenida onde as medições foram realizadas era de duas pistas separadas por um canteiro com árvores. Ao longo da avenida, havia casas e sobrados com muros altos nos dois lados. As medições foram feitas nos dois sentidos da avenida, para velocidades de 70 km/h (19,4 m/s) e de 35 km/h (9,7 m/s), mantidas aproximadamente constantes durante a aquisição das medidas.

C. Aquisição das Medidas de Campo

O sistema de recepção embarcado no veículo adquiriu medidas de campo nas velocidades de 35 km/h e 70 km/h. Com o veículo a uma velocidade constante, o analisador gravou um conjunto de seções de envoltória de sinal para cada passagem pela área local. Para $V = 35 \text{ km/h}$, o móvel fez várias passagens pela área local e 94 seções de sinal foram gravadas ao todo. Com $V = 70 \text{ km/h}$, foram gravadas 54 seções de sinal. O coeficiente de autocorrelação temporal foi calculado para cada seção de sinal, nas duas velocidades de aquisição.

Para atender ao critério de *Nyquist*, a taxa de amostragem mínima do sinal de rádio-móvel deve ser tal que [7]:

$$L_s \leq \lambda/4, \quad (11)$$

onde L_s é a distância entre amostras consecutivas e λ , o comprimento de onda do sinal recebido. Mas $L_s = VT_s$, onde V é a velocidade do móvel e T_s , o tempo entre amostras. Como cada seção de sinal, adquirida pelo analisador de espectro, é composta de 401 amostras e assumindo-se que S representa o tempo de varredura do analisador, então $T_s = S/400$. Portanto, de (11), a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$V\left(\frac{S}{400}\right) \leq \frac{\lambda}{4}. \quad (12)$$

Para a frequência de portadora $f_c = 836,37 \text{ MHz}$, $\lambda/4 = 0,09 \text{ m}$. Substituindo $V = 35 \text{ km/h} = 9,7 \text{ m/s}$ e $\lambda/4 = 0,09 \text{ m}$ em (12), então $S < 3,71 \text{ s}$. Durante a aquisição das medidas para $V = 35 \text{ km/h}$, o tempo de varredura do analisador foi ajustado em $S = 400 \text{ ms}$, o que corresponde a um valor de $\gamma = 3,71/0,4 = 9,3$ vezes a taxa de *Nyquist*.

Para $V = 70 \text{ km/h}$, pode ser mostrado de (12) que $S < 1,85 \text{ s}$. Como, para esta velocidade, o tempo de varredura do analisador foi ajustado para $S = 200 \text{ ms}$, o sinal foi amostrado com uma taxa $\gamma = 1,85/0,2 = 9,3$ vezes a taxa de *Nyquist*.

Pode-se mostrar que para as duas velocidades, $V = 35 \text{ km/h}$ e $V = 70 \text{ km/h}$, o móvel percorre uma distância $L = SV = 3,9 \text{ m}$ ao gravar uma seção de sinal. Yacoub mostrou que a distância, L , em que a média local do sinal de rádio-móvel é, aproximadamente, constante é [7]:

$$L = \frac{\lambda}{\alpha}, \quad (13)$$

onde α é o fator de frequência de corte do filtro digital passa-baixa, que extrai a componente de média local. Assumindo $\alpha = 0,04$ (valor típico para a frequência de corte

do filtro, correspondendo a 4% do desvio *Doppler* máximo [7]), a distância, L , onde a média local é considerada constante vale $L = 0,36/0,04 = 9 \text{ m}$. Como, para as duas velocidades, o espaço percorrido pelo móvel ao gravar uma seção de sinal é menor que a distância na qual a média local do sinal é considerada constante, as seções de sinal são estatisticamente estacionárias quanto à média local. Esta condição deve ser satisfeita para assegurar que não haja quaisquer tendências na envoltória do sinal, provocadas por variações na sua média local.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A. Cálculo do Coeficiente de Autocorrelação Temporal

Para calcular o coeficiente de autocorrelação temporal, ρ_e , das seções de envoltórias medidas, foi usado um estimador de ρ_e . Para uma seção de sinal de N amostras, um estimador de ρ_e pode ser dado por [8]:

$$r_{xx}(k) = \frac{[\sum_{i=1}^{N-k} (x_i x_{i+k}) / (N-k)] - [\sum_{i=1}^N x_i / N]^2}{(\sum_{i=1}^N x_i^2 / N) - (\sum_{i=1}^N x_i / N)^2}, \quad (14)$$

onde x_i são as amostras da seção de sinal e N , o número de amostras da seção.

O estimador $r_{xx}(k)$ calcula a autocorrelação de uma seção de sinal com sua versão deslocada no tempo. Cabe notar que $r_{xx}(k)$ é função de k , onde $k = 0, 1, \dots, N-1$ representa o atraso de tempo relativo entre a seção de sinal de 401 amostras e sua versão deslocada no tempo. No numerador, o primeiro termo de somatória realiza o produto amostra-a-amostra de duas seções de $N-k$ amostras; a primeira seção tem suas amostras no intervalo $[x_1, \dots, x_{N-k}]$, enquanto a segunda seção, deslocada de k amostras, está no intervalo $[x_{k+1}, \dots, x_N]$. A Fig. 5 mostra como é realizado o cálculo de autocorrelação de uma seção de sinal genérica.

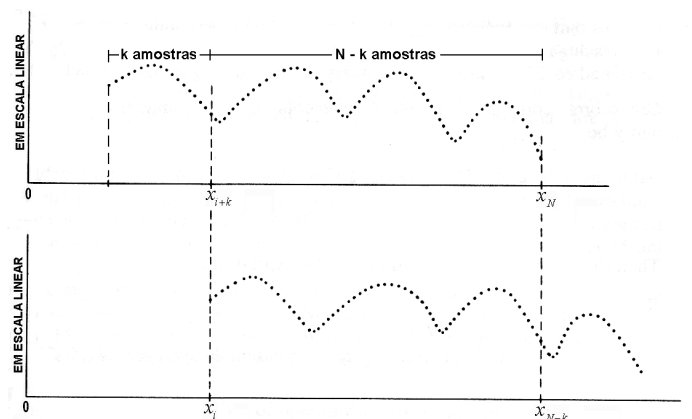


Fig. 5. Esquema mostrando como é realizado o cálculo do coeficiente de autocorrelação.

O estimador $r_{xx}(k)$ é calculado para valores de k crescentes, até que $r_{xx}(k) \approx 0,5$. O valor de k que

corresponde a $r_{xx}(k) \approx 0,5$ é, então, multiplicado pelo intervalo entre amostras, $T_s = S/400$, para se determinar o tempo de coerência, T_0 , correspondente a um valor de autocorrelação de $\approx 0,5$. Como o valor de T_s corresponde ao valor mínimo de atraso da seção deslocada, valores discretos de $r_{xx}(k)$ são calculados para valores crescentes de $k = 0, 1, 2, \dots$. Com o objetivo de conseguir uma boa resolução dos valores consecutivos de $r_{xx}(k)$, o valor de T_s deve ser pequeno o suficiente. Esse foi o motivo pelo qual a taxa de amostragem do sinal foi definida em ≈ 9 vezes a taxa de Nyquist.

A Fig. 6(a) e (b) mostra duas seções típicas de sinal de 401 amostras, gravadas para as velocidades de 35 km/h e 70 km/h , respectivamente. Os dados foram adquiridos em valores de potência em dBm . É possível notar variações rápidas no sinal de até 20 dB , caracterizando um fenômeno de desvanecimento curto.

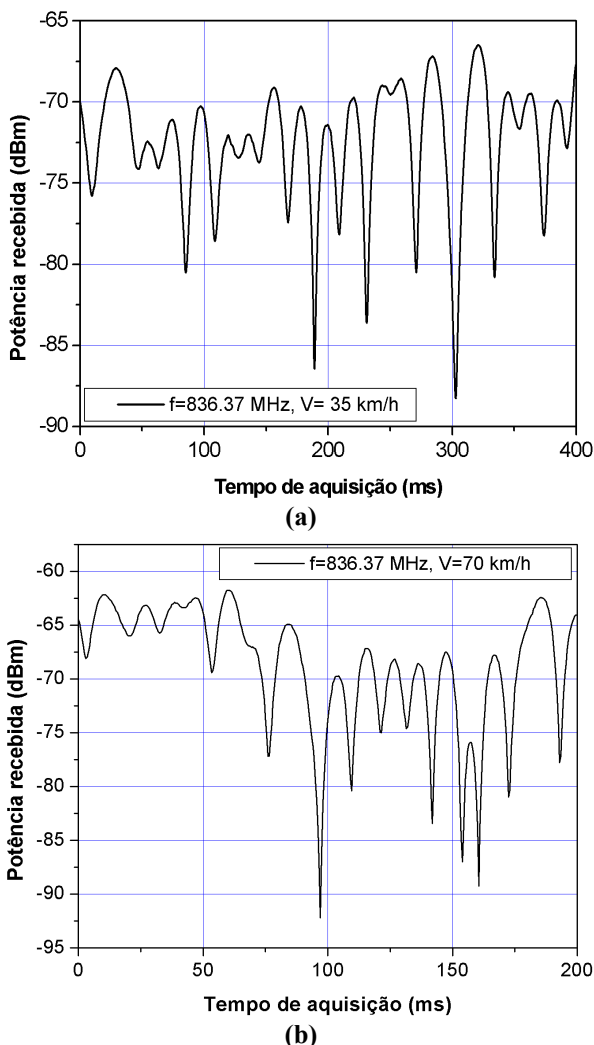


Fig. 6. Seções de sinal de rádio-móvel adquiridas para (a) $V = 35 \text{ km/h}$ e (b) $V = 70 \text{ km/h}$.

As seções de sinal, adquiridas em dBm , foram convertidas para valores lineares de envoltória em *volts*, antes de se

calcular o valor de $r_{xx}(k)$. O algoritmo realizou os cálculos dos valores de autocorrelação, como função de k , para as diversas seções de sinal adquiridas nas velocidades de 35 km/h e 70 km/h . Após o processamento dos dados pelo programa, é gerado um arquivo *ASCII* com os resultados, como mostrado na Fig. 7.

O arquivo *ASCII* está dividido em colunas, cada coluna representa uma seção de sinal para a qual foi calculado $r_{xx}(k)$. A primeira linha de cada coluna representa os valores de autocorrelação, $r_{xx}(k)$, mais próximos possíveis de $0,5$, encontrados pelo programa; a segunda linha representa os valores de T_0 (em ms) encontrados para cada seção de sinal; os valores de k , em que o programa parou de calcular $r_{xx}(k)$, estão gravados na terceira linha; finalmente, a partir da quarta linha está a seqüência de valores de $r_{xx}(k)$, calculados para cada valor de k . Por exemplo, para a primeira coluna (seção de sinal), o valor de $r_{xx}(k)$, mais próximo de $0,5$ encontrado, foi $0,49$ (1ª linha); o valor de T_0 correspondente foi calculado em 4 ms (2ª linha); o atraso entre a seção de sinal e sua versão deslocada no tempo foi de 8 amostras (3ª linha); a partir da quarta linha foram encontrados os seguintes valores de $r_{xx}(k)$: $1,00, 0,99, 0,96, 0,90, 0,82, 0,73, 0,65, 0,56$ e $0,49$, correspondentes, respectivamente, aos valores de k : $0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ e 8 (após encontrar o valor de $r_{xx}(k)$ mais próximo de $0,5$, o programa completa o restante da coluna correspondente com zeros).

0.49	0.51	0.49	0.45	0.58	0.47	0.50	0.52	0.52	0.47	0.46
4.00	5.00	3.00	2.50	2.00	3.50	3.00	3.00	4.50	4.00	4.50
8.00	10.00	6.00	5.00	4.00	7.00	6.00	6.00	9.00	8.00	9.00
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.99	1.02	0.99	0.94	0.95	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99
0.96	1.01	0.94	0.85	0.86	0.93	0.92	0.93	0.95	0.95	0.96
0.90	0.99	0.85	0.74	0.73	0.85	0.84	0.86	0.91	0.89	0.92
0.82	0.95	0.74	0.60	0.58	0.76	0.74	0.76	0.85	0.81	0.86
0.73	0.89	0.62	0.45	0.41	0.66	0.63	0.64	0.79	0.73	0.79
0.65	0.82	0.49	0.00	0.00	0.56	0.50	0.52	0.73	0.64	0.71
0.56	0.75	0.00	0.00	0.00	0.47	0.38	0.39	0.66	0.55	0.63
0.49	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	0.47	0.54
0.00	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	0.00	0.46
0.00	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00
0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fig. 7. Aspecto de um arquivo *ASCII* gerado pelo programa, com valores de $r_{xx}(k)$ calculados para 11 seções de sinal de rádio-móvel.

B. Cálculo do Tempo de Coerência do Canal

O tempo de coerência, T_0 , foi calculado para cada seção de sinal, nas duas velocidades de aquisição, 35 km/h e 70 km/h . Foi observado que o valor de T_0 é variável com a posição do móvel dentro da área local das medidas. Para $V = 35 \text{ km/h}$, valores calculados de T_0 , para $r_{xx}(k) \approx 0,5$, ficaram na faixa de 4 ms a 14 ms , enquanto que para $V = 70 \text{ km/h}$, T_0 esteve no intervalo de 2 ms a 14 ms . Devido à variabilidade do valor de T_0 , suas *funções de distribuição cumulativa* foram calculadas para as duas velocidades de 35 km/h e 70 km/h e estão mostradas na Fig. 8. Para cada velocidade, dentro do conjunto de medidas de T_0 , foi calculada a probabilidade de que T_0 esteja abaixo de um certo valor, dentro de seu intervalo de ocorrência. Observando a Fig. 8, pode-se notar que a probabilidade de

que T_0 esteja abaixo de, por exemplo, 6 ms é $\approx 85\%$ para $V = 70\text{ km/h}$, ao passo que, para $V = 35\text{ km/h}$, vale $\approx 30\%$, evidenciando que o tempo de coerência do canal, T_0 , diminui com o aumento da velocidade do móvel [1].

A partir da função de distribuição cumulativa, é estimado o valor abaixo do qual T_0 permanece por 10% do tempo, o que significa dizer que 90% das medidas estão acima desse valor. Dessa forma são determinados os valores mínimos de T_0 para um valor de coeficiente de autocorrelação $r_{xx}(k) \approx 0,5$, nas velocidades 35 km/h e 70 km/h . Estes valores estão apresentados na Tabela I.

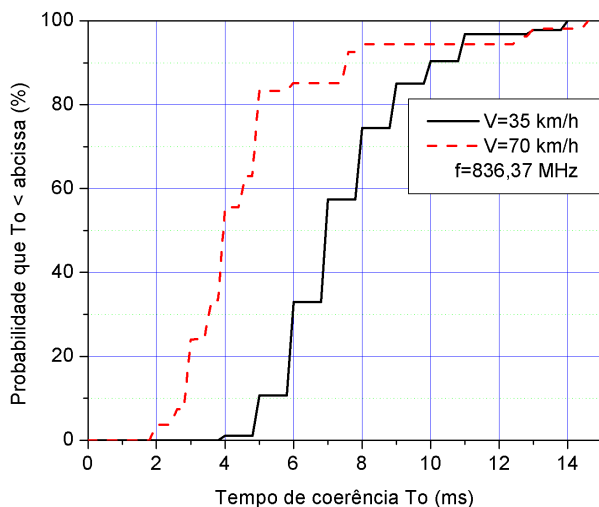


Fig. 8. Funções de distribuição cumulativa dos valores de T_0 , calculadas para as velocidades de 35 km/h e 70 km/h .

Tabela I

VALOR ACIMA DO QUAL T_0 PERMANECE POR 90% DO TEMPO PARA

$r_{xx}(k) \approx 0,5$.

Velocidade(km/h)	$T_0(\text{ms})$
35	5,8
70	3

Se o tempo de coerência do canal, T_0 , é definido como o intervalo de tempo em que o coeficiente de autocorrelação temporal, ρ_e , é maior que 0,5, então, da Tabela I, qualquer valor de $T_0 < 5,8\text{ ms}$ garante que $r_{xx} > 0,5$ para $V = 35\text{ km/h}$; da mesma forma, para $V = 70\text{ km/h}$ um valor de $T_0 < 3\text{ ms}$ garante que $r_{xx} > 0,5$. Portanto, os valores de $T_0 = 5,8\text{ ms}$ e de $T_0 = 3\text{ ms}$ representam o tempo de coerência do canal para as velocidades $V = 35\text{ km/h}$ e $V = 70\text{ km/h}$, respectivamente.

Quando T_0 é definido como o intervalo sobre o qual ρ_e é maior que 0,5, um valor aproximado de T_0 é dado por (9). Para $f = 836,37\text{ MHz}$ e $V = 35\text{ km/h}$, o desvio Doppler máximo vale $f_m = V/\lambda \approx 27\text{ Hz}$ e T_0 é dado por:

$$T_0 \approx 9/(16\pi f_m) = 6,6\text{ ms}, \quad V = 35\text{ km/h}. \quad (15)$$

Para $V = 70\text{ km/h}$, $f_m = V/\lambda \approx 54\text{ Hz}$ e T_0 vale:

$$T_0 \approx 9/(16\pi f_m) = 3,3\text{ ms}, \quad V = 70\text{ km/h}. \quad (16)$$

O valores de T_0 , dados por (15) e (16), estão bastante próximos dos valores estimados na Tabela I pelo método do cálculo do coeficiente de autocorrelação. Pode-se afirmar que, para $V = 70\text{ km/h}$, dois sinais, chegando ao receptor móvel com uma diferença de tempo menor que 3 ms , não serão afetados por mudanças significativas no canal de propagação, na área onde as medidas foram adquiridas. Para $V = 35\text{ km/h}$, quando a diferença de tempo entre os sinais for menor que $5,8\text{ ms}$, o mesmo acontece, ou seja, o receptor móvel não percebe mudanças significativas no canal.

V. CONCLUSÕES

Uma técnica de medição utilizando um analisador de espectro foi usada pra adquirir seções de envoltórias de sinal de rádio-móvel. Coeficientes de autocorrelação temporal foram calculados para as diversas seções de sinal adquiridas e o valor do tempo de coerência, T_0 , foi estimado. Como foi observado que o valor de T_0 é variável com a posição do móvel dentro da área local, funções de distribuição cumulativa de T_0 foram calculadas para duas velocidades de medidas, $V = 35\text{ km/h}$ e $V = 70\text{ km/h}$, com o objetivo de estimar o valor de T_0 para o qual $\rho_e > 0,5$.

As funções de distribuição cumulativa de T_0 mostraram que o tempo de coerência do canal diminui quando a velocidade do móvel aumenta. Foi encontrado que, para a velocidade do móvel $V = 35\text{ km/h}$, um valor de $T_0 < 5,8\text{ ms}$ garantirá um valor de $\rho_e > 0,5$ para 90% do tempo, na área local onde as medidas foram realizadas. Por outro lado, para $V = 70\text{ km/h}$, $\rho_e > 0,5$ para 90% do tempo quando $T_0 < 3\text{ ms}$. A definição do tempo de coerência do canal implica que dois sinais chegando com uma separação maior que T_0 serão afetados diferentemente pelo canal. Portanto, para $V = 35\text{ km/h}$, dois sinais que chegam ao receptor móvel com uma separação de tempo menor que $5,8\text{ ms}$ são afetados pelo canal da mesma forma; o mesmo acontece quando a separação de tempo é menor que 3 ms para $V = 70\text{ km/h}$.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communications Systems Part I: Characterization," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 90-100, July 1997.
- [2] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. Piscataway, NJ: IEEE PRESS, 1994 (reissued), pp. 45-52.
- [3] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Engineering: Theory and Applications*. New York: McGraw-Hill, 1993, pp. 35.
- [4] R. H. Clarke, "A statistical theory of mobile-radio reception," *The Bell System Technical Journal*, vol. 47, no. 6, July-Aug. 1968, pp. 957-1000.
- [5] R. Steele, *Mobile Radio Communications*. Baffins Lane, Chischester: John Wiley & Sons, 1996 (reprinted), ch. 2.
- [6] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PRT, 1996, ch. 4.
- [7] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993, pp. 151-155.
- [8] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Design Fundamentals*. New York: Wiley & Sons, 1993, ch. 1.