

Uso de sonda de canal de propagação faixa-larga para estimar ângulos-de-chegada, pela técnica de arranjo por abertura sintética

Maurício Henrique Costa Dias¹ e Gláucio Lima Siqueira²

Resumo—Este trabalho relata o uso estendido de uma sonda faixa-larga para estimar ângulos-de-chegada. Um arranjo de antenas linear uniforme por abertura sintética foi empregado para medir a resposta do canal em 1,8 GHz. Algoritmos de estimação espectral espacial como a conformação de feixe e o MUSIC foram aplicados.

Palavras-Chave—Canal de propagação, sondagem de canal faixa-larga, ângulo-de-chegada, estimação espectral, arranjo de antenas.

Abstract—This work reports the extended use of a wideband sounder to estimate angles of arrival. A synthetic aperture uniform linear antennae array was adopted for measuring the 1.8 GHz channel impulse response. Spatial spectral estimation algorithms such as beamforming and MUSIC have been applied.

Index Terms—Propagation channel, wideband channel sounding, angle of arrival, spectral estimation, antennae array.

I. INTRODUÇÃO

O desempenho dos sistemas de comunicações móveis é extremamente dependente do comportamento do canal de propagação. O percurso entre uma estação base e um terminal móvel pode apresentar uma condição de visibilidade entre ambos, ou uma severa obstrução por edificações, relevo ou mesmo vegetação. Ao contrário das comunicações por meios confinados, nas quais o canal é estacionário e previsível, o canal rádio-móvel é aleatório, de difícil análise.

A abordagem tradicional para modelos de propagação procura prever a intensidade média de sinal recebido a uma certa distância do transmissor, bem como a variabilidade da intensidade de sinal dentro de uma pequena região ao redor do receptor. Os modelos de propagação que predizem a intensidade média de sinal para uma separação arbitrária entre transmissor e receptor são úteis para a estimação da área de cobertura do transmissor, e são comumente referidos como “modelos de propagação de larga escala”. Por outro lado, os modelos que caracterizam as flutuações rápidas do sinal

recebido ao longo de distâncias muito curtas (da ordem de alguns comprimentos de onda), ou durante pequenos intervalos de tempo (da ordem de segundos), são chamados de “modelos de pequena escala” ou “modelos de desvanecimento” [1].

O desvanecimento é provocado por interferência entre duas ou mais “cópias” do sinal transmitido que chegam ao receptor em instantes ligeiramente diferentes. Estes sinais, conhecidos como componentes por multipercursos, se combinam na antena receptora, produzindo um sinal resultante que pode apresentar grandes variações de amplitude e fase, dependendo da distribuição das intensidades e dos tempos relativos de propagação das ondas recebidas, e também da largura de faixa do sinal transmitido. Os efeitos mais importantes causados pelos multipercursos ao canal rádio-móvel são três. Em primeiro lugar, variações rápidas na intensidade do sinal ao longo de pequenas distâncias percorridas, ou durante pequenos intervalos de tempo. O segundo efeito é uma modulação de frequência aleatória devida a deslocamentos Doppler variantes nas diferentes componentes recebidas, em função do movimento relativo entre o receptor e os diversos espalhadores que originaram os multipercursos. Por fim, os retardos de propagação dos sinais que chegam ao receptor por múltiplos percursos provocam um efeito de dispersão temporal ao sinal original. É importante salientar que os multipercursos chegam à antena receptora não só em tempos diversos, mas também em direções (ou ângulos) diferentes, mesmo em condição de visibilidade entre transmissor e receptor.

Uma das estratégias mais adotadas para a análise dos efeitos de pequena escala do canal de propagação é a caracterização estatística baseada em medidas. Em particular, como existe uma relação entre a largura de faixa do sinal transmitido e os efeitos associados aos multipercursos, é interessante analisar o comportamento de propagação de sinais faixa-larga. As sondagens faixa-larga permitem, portanto, a análise do comportamento de dispersão temporal do canal. Mais recentemente, com o advento do uso de arranjos de antenas em sistemas de comunicações móveis [2], a análise do canal de propagação passou a incluir também os ângulos-de-chegada (AOA – *Angle Of Arrival*), e as estatísticas associadas às variações dos mesmos, ou seja, o comportamento de dispersão espacial do canal. A análise do espectro espacial é relevante ainda no contexto dos sistemas

¹ Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: mhcdias@epq.ime.br

² Centro de Estudos em Telecomunicações, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: glaucio@cetuc.puc-rio.br

de localização de posição [3], como parte integrante de algumas das técnicas disponíveis.

A caracterização experimental faixa estreita e faixa larga do canal de propagação rádio-móvel tem sido uma linha ativa de pesquisa do Centro de Estudos em Telecomunicações da PUC-Rio há pelo menos uma década [4]-[7]. Mais ainda, os trabalhos desenvolvidos têm procurado acompanhar o aprofundamento demandado pela evolução tecnológica dos sistemas de comunicações pessoais. Em particular, o momento atual evidencia o ganho que o uso de arranjos de antenas pode trazer em termos de aumento da eficiência espectral, o que traz à tona a conseqüente necessidade de se conhecer detalhadamente o comportamento do canal no domínio espacial [8]-[9]. Em particular, a primeira e mais simples abordagem adotada foi a implementação de um arranjo linear uniforme por abertura sintética [8].

O presente trabalho descreve a incorporação da técnica de abertura sintética à sonda faixa-larga então disponível, que permitiu a estimação do espectro espacial (AOA) do canal de propagação, em complementação ao espectro temporal (retardos). Alguns resultados são apresentados e comentados para ilustrar a validade da técnica. Para isso, a Seção II apresenta inicialmente uma breve descrição sobre as técnicas de sondagem do canal faixa-larga, nos dois domínios em questão. Em seguida, a sonda faixa-larga utilizada é descrita. A implementação do arranjo por abertura sintética é detalhada na Seção IV, e os comentários finais sobre o trabalho são apresentados na Seção V.

II. TÉCNICAS DE SONDAÇÃO DO CANAL DE PROPAGAÇÃO FAIXA-LARGA

A. Canal temporal

Dada a importância em se conhecer a estrutura multipercursos do canal rádio-móvel para se determinar os efeitos de desvanecimento de pequena escala, diferentes técnicas de sondagem foram desenvolvidas. De modo geral, são três os princípios mais utilizados [1]. O mais antigo é provavelmente o que envolve a transmissão de um pulso temporal de curta duração, tentando aproximar o efeito da transmissão de um impulso ideal. Outra técnica é a que aproveita as propriedades estatísticas de sinais pseudo-aleatórios, mais especificamente o formato quase impulsivo de sua autocorrelação, para realizar a sondagem. A chamada “sondagem por compressão de pulso” é uma das técnicas mais empregadas atualmente, principalmente em ambientes externos. As duas formas mais conhecidas de implementação são a “convolução por filtro casado” e a “correlação por varredura de tempo de retardo”.

O terceiro princípio utilizado compreende a sondagem por varredura do espectro de frequência. A Figura 1 apresenta uma configuração bastante utilizada para medidas em ambientes internos. Basicamente coloca-se o canal de propagação como o “dispositivo sob teste” (DUT – *Device Under Test*) de um analisador de rede. Tendo o espectro de frequências à disposição, basta aplicar uma transformada inversa de Fourier para se obter a resposta no domínio temporal, que representa a distribuição de potência do canal

como função dos retardos de propagação associados aos multipercursos. Esta representação no domínio do retardo é mais conhecida como “perfil de potência de retardos” (PDP – *Power Delay Profile*).

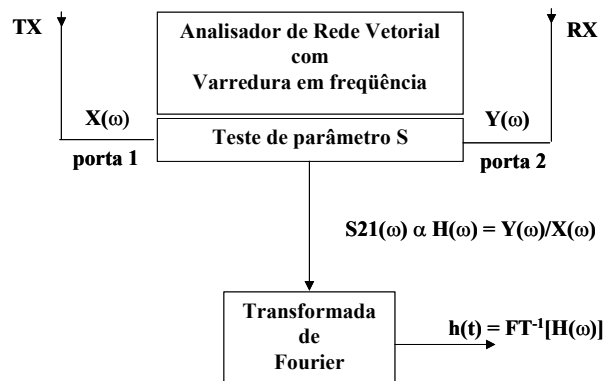


Fig. 1. Sondagem temporal no domínio da frequência usando analisador de rede.

Uma das restrições da técnica em questão é a limitação de distância, já que as portas do analisador se conectam com as antenas transmissora e receptora através de cabos. Outra restrição está associada à velocidade de varredura do analisador na faixa de frequências escolhida. Durante o tempo em que o analisador executa uma varredura, qualquer modificação que o canal sofra não é captada [1], [4].

B. Canal espacial

A técnica mais simples de sondagem do canal espacial, embora a menos eficiente, é a por varredura espacial com antena diretiva de alto-ganho [10]. A idéia consiste em varrer o domínio angular, passo-a-passo, com uma antena altamente diretiva, de modo que a cada passo medido, apenas uma pequena porção do espaço seja captada eficientemente pela antena. Embora simples, sua grande desvantagem é a baixa resolução que ela proporciona, da ordem de grandeza da largura de feixe da antena utilizada.

O emprego de arranjos de antenas é a técnica mais adotada ultimamente para estimação de AOA. Como a resposta ao impulso do canal de propagação é distinta em cada elemento do arranjo, faz sentido trabalhar-se com um vetor de respostas, normalmente referido por “resposta ao impulso do canal vetorial” (VCIR – *Vector Channel Impulse Response*) [10]. O canal é aleatório, e sua distribuição de probabilidade é desconhecida. O que se pode fazer na prática, portanto, é calcular uma estimativa do espectro espacial a partir da coleta de algumas varreduras (*snapshots*) da VCIR. Deste conjunto de dados, é possível calcular a chamada “matriz covariância”, que contém intrinsecamente a informação espectral espacial desejada. A estimativa do espectro espacial é então obtida aplicando-se algum método apropriado, não-paramétrico como a conformação de feixe, ou paramétrico como os métodos sub-espaciais MUSIC (*MUltiple Signal Classification* – classificação de sinais múltiplos) e ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters by Rotational Invariance Techniques* – estimação de parâmetros de sinal por técnicas de invariância rotacional) [11].

A implementação da técnica baseada em arranjos de antenas admite algumas simplificações importantes quanto ao hardware utilizado. Com relação ao arranjo propriamente dito, uma alternativa bastante atraente e simples é aplicar o princípio da abertura sintética [12]-[14], muito comum em aplicações de radar e sensoriamento remoto, no qual uma única antena (ou um conjunto menor que o total projetado) é utilizada para medir o sinal desejado, deslocando-a sucessivamente para as posições correspondentes da abertura planejada. O arranjo por abertura sintética não acompanha certas variações do canal ao longo do tempo, já que as respostas de cada posição “virtual” da abertura são medidas seqüencialmente ao longo do tempo. Por outro lado, elimina-se o efeito do acoplamento mútuo entre as antenas, inevitável em arranjos “reais”, ainda que possa ser minimizado por esquemas de calibração compensatória [10], [15].

No caso da opção por um arranjo real, outra simplificação importante é comumente empregada. Uma configuração ideal exige um receptor para cada elemento do arranjo, o que em termos práticos pode até inviabilizar a aplicação, dependendo do número de antenas. A alternativa simples e barata é o uso de um único bloco de RF (rádio-freqüência) comutado temporalmente [15]-[16]. A contrapartida mais uma vez é a redução da capacidade de acompanhamento das variações do canal ao longo do tempo.

C. Canal temporal-espacial

As técnicas de sondagem do canal espacial apresentadas anteriormente admitem implicitamente a hipótese de canal faixa-estreita, ou seja, sem espalhamento de retardos. Admitindo-se decorrelação entre os dois domínios, a sondagem simultânea dos canais temporal e espacial pode ser realizada integrando-se as técnicas disponíveis, ou seja, aplicando-se a sondagem espacial retardo a retardo, como se localmente o canal temporal fosse faixa-estreita. Este tipo de estratégia provê uma estimação do tipo sub-ótima, mas ainda assim com resultados muito bons, sendo muito adotada na prática [12]-[14], [16].

Analogamente, a abordagem mais simples assume ainda que o canal temporal é invariante ao longo da abertura, ou seja, de antena para antena. Para a faixa de freqüência dos sistemas de comunicações pessoais, e considerando-se a limitação prática que impõe a necessidade do uso de arranjos com número pequeno de elementos, esta é uma hipótese bastante razoável. Afinal, a distância entre os elementos é relativamente tão pequena que mudanças significativas no perfil de potência de retardos de antena para antena são pouco prováveis. Na prática, entretanto, pequenas diferenças podem ser observadas, principalmente se a técnica de abertura sintética for utilizada, dada a não-estacionaridade do canal. Quanto maior for o número de varreduras do canal temporal, maior a diluição dessas diferenças no processo de estimação.

Abordagens otimizadas envolvem normalmente o cálculo de estimativas de máxima verossimilhança (ML – *Maximum Likelihood*), ao custo de um esforço computacional muito maior. Um algoritmo que vem ganhando destaque por sua eficiência numérica é a maximização SAGE (*Space Alternating Generalized Expectation* – expectativa

generalizada alternante no espaço), mas exemplos de implementações experimentais são mais escassos e mais recentes [17].

III. DESCRIÇÃO DA SONDA DE CANAL FAIXA-LARGA DISPONÍVEL PARA AMBIENTES INTERNOS

A sonda de canal faixa-larga utilizada foi implementada e testada com sucesso em [5]. Um enlace ótico foi utilizado como elemento de sincronização do analisador de rede que compunha a sonda, estendendo sua distância máxima de atuação. Tipicamente, cabos coaxiais são utilizados, mas sua alta perda específica limita bastante o alcance da sonda. Uma ilustração completa da configuração utilizada é apresentada na Figura 2, e inclui: um analisador de rede HP8714ET; duas antenas onidirecionais discônicas de 2,14 dBi especialmente montadas para a faixa de 1,8 GHz; amplificadores de baixo-ruído; um laser HP83420A; uma fibra ótica multimodo encapsulada de 500 m de extensão; um detector óptico; e um computador tipo laptop equipado com um cartão GPIB para controle e aquisição de dados. A calibração adotada simplesmente armazenava no analisador todos os efeitos indesejados das componentes de sistema antes de cada medida, à exceção das antenas, cujas respostas estão embutidas na resposta medida do canal. A unidade móvel do sistema era o transmissor, já que este era o módulo que consumia menos energia, e também para manter o frágil detector óptico parado. O uso do enlace ótico deu mais mobilidade à sonda, com percursos de até 150 m tendo sido testados. A largura de faixa de trabalho adotada foi de 200 MHz centrada em 1,8 GHz, com 801 amostras por resposta.

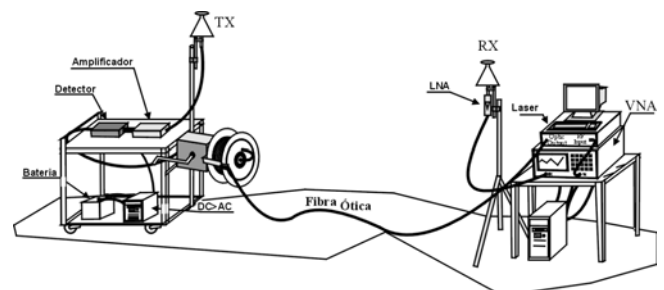


Fig. 2. Ilustração da sonda faixa-larga utilizada, implementada originalmente em [5].

IV. IMPLEMENTAÇÃO E TESTES DA TÉCNICA DE ARRANJO POR ABERTURA SINTÉTICA

A sondagem do canal espacial contemplou apenas variações azimutais. Para isto, as antenas utilizadas nas sondagens estavam sempre à mesma altura. Com as direções de chegada representadas por apenas uma dimensão, arranjos do tipo linear eram suficientes para realizar as sondagens. Com isso, a geometria adotada para o arranjo por abertura sintética foi a mais simples possível, ou seja, a linear uniforme (ULA – *Uniform Linear Array*). A simplicidade desta geometria apresenta duas contrapartidas principais. Há um problema de ambigüidade de fase para AOA maiores que 180° , ou seja, AOA que cheguem numa mesma direção, mas por sentidos opostos, não são distinguidos por um arranjo ULA. Outra

desvantagem da configuração em questão é a capacidade decrescente de detecção e resolução de AOA à medida que a onda incidente se afasta da chamada direção de *broadside* do arranjo (perpendicular à linha formada pelos elementos do arranjo).

O espaçamento entre as posições dos sensores deve sempre respeitar o teorema da amostragem espacial, que é análogo ao de Nyquist [11]. Nos experimentos realizados, adotou-se a distância de 5 cm entre os sensores, ou seja, 0,3 do comprimento de onda da portadora central (menor que o limite máximo de 0,5). O número de elementos do arranjo sintetizado variou para cada posição de sondagem, sendo 11 o menor, e 21 o maior valor adotado. O número de varreduras ficou entre 11 e 21.

A estimação do espectro espacial-temporal era realizada por pós-processamento, e não em tempo real. O processamento das medidas adquiridas pela sonda foi dividido em dois blocos. O primeiro bloco de rotinas gerava os PDP e os organizava em um vetor de três dimensões, cujos índices representavam os eixos de retardo, tempo (número de varreduras) e posição (sensor). Cada PDP era calculado como uma estimativa do tipo correlograma a partir da resposta ao impulso no domínio da frequência correspondente [11], método este equivalente ao uso da transformada inversa discreta de Fourier, que foi adotado em [5]. Antes desse cálculo, porém, uma pré-filtragem era aplicada aos dados, para minimizar o inevitável efeito de vazamento espectral. Como em [5], adotou-se uma janela de Blackman-Harris de três termos mínimos, resultando num alargamento da largura dos picos dos PDP de 80%.

O segundo módulo realizava a estimação do espectro espacial propriamente dita, a partir da carga do vetor gerado pelo bloco anterior. A estimação espacial era realizada em retardo a retardo, de acordo com as hipóteses discutidas na seção anterior. Quatro diferentes algoritmos de estimação de AOA foram utilizados: conformação de feixe (*beamforming*); Capon; MUSIC espectral; e ESPRIT. Basicamente, a partir da matriz de dados em cada retardo, obtinha-se uma estimativa da matriz covariância associada, da qual a informação espectral espacial desejada era extraída aplicando algum dos métodos mencionados.

A campanha de medidas aproveitou o esforço empreendido para o trabalho descrito em [5], e compreendeu a sondagem espacial em cinco posições distintas, com a sonda parada. Os ambientes de teste foram corredores do shopping da Gávea, e um corredor e uma sala de aula de um dos edifícios da PUC, ambos no Rio de Janeiro. A Figura 3 ilustra uma estimativa espectral espacial-temporal para o ponto designado como “AOALV” no shopping, que apresentava visada direta entre transmissor e receptor. O método espacial aplicado no exemplo foi o da conformação de feixe, cuja resolução máxima para o número de antenas utilizado (11) era de cerca de 20°. Da geometria local, esperava-se que a componente direta chegasse com AOA entre 1° e 6°, uma das reflexões principais nas fachadas laterais do corredor com AOA entre

8° e 14°, e a outra reflexão com AOA entre -12° e -7°, sendo que todas chegando com retardo entre 95 ns e 100 ns. Observa-se no exemplo que a conformação de feixe não foi capaz de resolver a componente direta de uma das reflexões, estimando uma única componente em seu lugar com AOA intermediário (10°). A segunda reflexão, entretanto, pôde ser resolvida, com AOA estimado de -10°. O retardo estimado para as componentes em questão (100 ns) também ficou próximo do esperado.

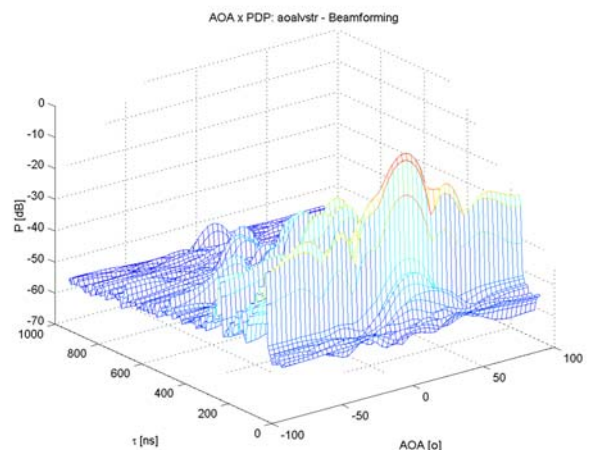


Fig. 3. Espectro espacial-temporal na posição “AOALV” no shopping: conformação de feixe.

A condição de obstrução da visada entre os módulos receptor e transmissor foi testada em três posições, sendo duas delas na PUC. Em ambas, o módulo transmissor da sonda foi posicionado dentro de uma sala de aula, cuja porta de entrada dava acesso a um longo corredor. O receptor estava posicionado a cerca de 30 m da entrada da sala. A Figura 4 apresenta o espectro espacial-temporal para uma das posições (“AOASV”), com a estimativa espacial calculada segundo o método MUSIC. Uma avaliação teórica com base na geometria do local de sondagem indicava que a componente que chegaria mais rapidamente ao receptor (145 ns) sofreria três reflexões ao longo do corredor e uma dentro da sala, com um AOA de 18° a 19°. Não só a estimativa MUSIC, mas as demais testadas chegaram bem perto disto, indicando um pico espectral em 17° para um retardo de 145 ns. Outras componentes por reflexões múltiplas esperadas também foram confirmadas pelas estimativas, embora o desempenho de cada técnica tenha sido diferente, com alguma vantagem para o MUSIC em termos de detecção e precisão [8].

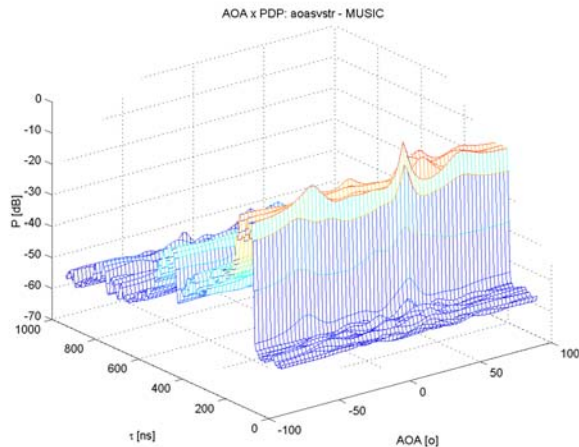


Fig. 4. Espectro espacial-temporal na posição "AOASV" na PUC: MUSIC.

V. COMENTÁRIOS FINAIS

A implementação recente de uma técnica simples para estender a aplicabilidade de uma sonda de canal de propagação faixa-larga foi relatada neste trabalho. Usando o princípio da abertura sintética, foi possível realizar estimativas do espectro espacial-temporal com uma sonda para ambientes internos disponível. As sondagens contemplaram a frequência central de 1,8 GHz, com uma resolução temporal absoluta de 5 ns. No domínio espacial, a configuração linear uniforme foi adotada, com um número de elementos que variou entre 11 e 21. Os algoritmos de processamento para estimação dos AOA incluíram métodos clássicos como a conformação de feixe, e métodos paramétricos como o MUSIC.

Dado o caráter de iniciação do trabalho, não houve um rigor com relação à precisão do posicionamento da antena ao longo de cada abertura projetada. O carrinho que continha o módulo transmissor da sonda nem permitia um controle adequado das posições. Ainda assim, os resultados obtidos mostraram boa concordância com estimativas teóricas, validando a técnica.

Uma continuação natural para o trabalho aqui reportado seria o uso de um arranjo real, comutando o *hardware* de RF ao longo do tempo. Esta abordagem já foi implementada e testada com sucesso em [8]-[9], embora o efeito de acoplamento mútuo tenha prejudicado um pouco o desempenho da técnica, em comparação com o método da abertura sintética. Espera-se para breve a possibilidade de testar ambas as abordagens em ambientes externos, assim que estiver pronta uma sonda de canal faixa-larga por compressão de pulso, atualmente em desenvolvimento como parte de outra tese de doutorado.

REFERÊNCIAS

[1] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*, Prentice-Hall, 1996.
 [2] L. C. Godara, "Applications of antenna arrays to mobile communications, part I: performance improvement, feasibility, and system considerations", *Proceedings of the IEEE*, v. 85, n. 2, pp. 1029-1060, Jul 1997.

[3] J. H. Reed et al., "An overview of the challenges and progress in meeting the E-911 requirement for location service", *IEEE Communications Magazine*, v. 36, n. 4, pp. 30-37, Abr 1998.
 [4] E. J. A. Vasquez, "Caracterização do canal móvel em faixa larga", Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Abr 2000.
 [5] L. H. Macedo, "Sondagem em frequência do canal indoor de faixa larga", Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Fev 2002.
 [6] J. C. R. Dal Bello, G. L. Siqueira, H. L. Bertoni, "Theoretical analysis and measurement results of vegetation effects on path loss for mobile cellular communication systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 49, n. 4, pp. 1285-1293, Jul 2000.
 [7] L. H. Macêdo et al., "Mobile indoor wide-band 1.8 GHz sounding: measurement-based time dispersion analysis", in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Spring 2002*, Birmingham - AL - EUA, 2002, v. 1, pp. 375-379.
 [8] M. H. C. Dias, "Estimação das respostas do canal real de propagação rádio-móvel nos domínios espacial e temporal: análise da supressão de ruído por decomposição *wavelet* como técnica complementar de processamento", Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Abr 2003.
 [9] J. F. Macêdo, "Caracterização espaço-temporal do canal rádio móvel", Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Fev 2003.
 [10] J. C. Liberti Jr, T. S. Rappaport, *Smart antennas for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications*, Prentice Hall PTR, 1999.
 [11] P. Stoica, R. Moses, *Introduction to spectral analysis*, Prentice Hall PTR, 1997.
 [12] A. Kuchar, J.-P. Rossi, E. Bonek, "Directional macro-cell channel characterization from urban measurements", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 48, n. 2, pp. 137-146, Fev 2000.
 [13] J. Fuhr, J.-P. Rossi, E. Bonek, "High-resolution 3-D direction-of-arrival determination for urban mobile radio", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 45, n. 4, pp. 672-682, Abr 1997.
 [14] J. Rossi et al., "Theory and measurement of the angle of arrival and time delay of UHF radiowaves using a ring array", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 45, n. 5, pp. 876-884, Mai 1997.
 [15] R. D. Tingley, K. Pahlavan, "Space-time measurement of indoor radio propagation", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, v. 50, pp. 22-31, Fev 2001.
 [16] R. S. Thomä et al., "Identification of time-variant directional mobile radio channels", in *Proc. IMTC*, Veneza - Itália, 1999.
 [17] K. I. Pedersen, P. E. Mogensen, B. H. Fleury, "A stochastic model of the temporal and azimuthal dispersion seen at the base station in outdoor propagation environments", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 49, n. 2, pp. 437-447, Mar 2000.