

7

Conclusões e Recomendações

Este trabalho teve como objetivo a caracterização do canal de propagação em banda larga numa região urbana densa a faixa de frequências de 3,5 GHz, utilizada por sistemas WiMAX.

A campanha de medição foi realizada na Zona Sul do Rio de Janeiro, com o transmissor instalado no bairro da Gávea e a região de cobertura compreendendo ainda partes dos bairros da Lagoa, Leblon e Ipanema, num raio de 3,5 km.

Foi transmitido um sinal OFDM em canais com larguras de banda de 1,75 MHz, 3,5 MHz, 7 MHz e 20 MHz, na faixa de frequências entre 3.400 e 3.420 MHz. A caracterização foi realizada através da medição e modelagem da perda média de propagação e do perfil de retardos do canal.

As principais contribuições do trabalho, além do banco de dados obtido na campanha de medição, são:

- i. o desenvolvimento de uma metodologia de medição simples e precisa, utilizando a técnica de multiportadoras OFDM, e das ferramentas de *software* para pré-processamento e análise de dados.
- ii. o desenvolvimento de dois modelos para a previsão da perda média de propagação: um modelo simplificado, que não requer o conhecimento detalhado do perfil do enlace, e um modelo mais preciso, derivado do modelo SUI com o ajuste de parâmetros e a inclusão de um termo correspondente à difração no obstáculo principal do perfil.
- iii. a obtenção de perfis de retardo do canal e dos valores médio e desvio padrão do retardo em condições de visibilidade (LOS) e obstrução (NLOS), e de expressões empíricas para sua estimativa.
- iv. a obtenção do valor médio das amplitudes relativas dos multipercursos e sua modelagem em função do valor de retardo.

Os principais resultados obtidos são resumidos e discutidos nas seções seguintes.

Metodologia de medição

A metodologia de medição utilizando a técnica de multiportadoras OFDM mostrou-se simples e flexível, permitindo realizar medições controladas com diferentes larguras de banda de canal a partir da programação de sinais de teste modulados no gerador de sinais. A técnica CFAR se mostrou efetiva na obtenção do perfil de retardos e os resultados se mostraram coerentes com trabalhos publicados por outros pesquisadores, relativos na mesma faixa de frequências. A principal limitação observada diz respeito à grande quantidade de dados gerada, o que obriga a interrupção das medições a cada 15 minutos para transferência dos dados da memória do analisador de redes para um meio de armazenamento externo. Isto torna o trabalho de medição laborioso mas não prejudica a precisão dos resultados.

Perda média de propagação

A perda média de propagação medida foi comparada com as predições fornecidas por modelos existentes na literatura técnica: o modelo SUI e os modelos das Recomendações ITU-R P.1411 e ITU-R P.1546. Estes dois últimos para distâncias ao transmissor inferiores e superiores a 1 km, respectivamente. As medições foram classificadas em condição de visada direta (LOS) e sem visada (NLOS). Para cada caso o coeficiente de decaimento com a distância foi calculado. Observou-se que, para distâncias menores que 1 km, o modelo da Recomendação ITU-R P. 1411 mostra resultados otimistas tanto na condição LOS como na condição NLOS. Na condição LOS o erro médio de predição foi de -21,9 dB com desvio padrão de 10,4 dB. Na condição NLOS, o erro médio de predição foi de -19,7 dB com desvio padrão de 15,6 dB. Concluiu-se que o modelo é mais adequado para ambientes suburbanos do que para ambientes densamente urbanizados com prédios elevados de diferentes alturas e distribuídos aleatoriamente. Já para distâncias maiores que 1 km, o modelo da Recomendação ITU-R P. 1546 mostrou-se muito pessimista. O erro médio de predição na situação LOS é de 15,7 dB com desvio padrão de 7,6 dB, enquanto que na situação NLOS a media é de 19,2 dB com desvio padrão de 11,8 dB. O modelo SUI, que não exige o conhecimento do perfil do enlace mas apenas uma avaliação subjetiva das características da região, mostrou melhores resultados. Utilizando a categoria de região A do modelo obteve-se um erro médio de -1,93 dB com desvio padrão de 14,41 dB. Entretanto, este desvio padrão é ainda alto, obrigando o uso de margens elevadas, e observou-se uma tendência à subestimação para pequenas distâncias e à superestimação da perda para

distâncias acima de 2 km. O ajuste dos parâmetros do modelo por regressão não linear não produziu melhorias significativas. Considerando os maus resultados obtidos com os modelos disponíveis na literatura técnica, foram desenvolvidos dois modelos empíricos de predição da perda média de propagação a partir dos dados experimentais. O primeiro modelo não exige o conhecimento detalhado do perfil do enlace mas considera uma distinção entre as situações LOS e NLOS. Para o caso LOS foi considerada uma expressão semelhante à da propagação em espaço livre mas ajustada a constante de modo a minimizar o erro médio. Para a situação NLOS foi introduzida uma dependência com a distância no fator de propagação. Com este modelo composto o erro médio obtido é de -0,036 dB com desvio padrão de 8,37 dB. O segundo modelo é baseado no modelo SUI com a introdução de um fator proporcional à atenuação por difração gume de faca do obstáculo dominante no perfil do enlace. O erro médio obtido com este modelo é de 0,0044 dB com desvio padrão de 8,00 dB.

Caracterização do canal banda larga

Os parâmetros de dispersão do canal (retardo médio e desvio padrão do retardo) obtidos para cada uma das rotas de medição não mostraram diferença marcante entre as situações com e sem linha de visada. Os valores encontrados foram similares em toda a região, o que caracteriza um mesmo tipo de área tanto para as medições realizadas no bairro da Gávea como Lagoa e Leblon. O valor médio para as medições realizadas com canal de 20 MHz é de 0,196 μseg e o desvio padrão de 0,161 μseg . No caso de um sinal transmitido com 20 MHz, com duração de bloco de 43,52 μsegs , o tempo mínimo de prefixo cíclico recomendado 1,96 μsegs , correspondendo a um intervalo de guarda mínimo de 1/22. Quanto à dependência do retardo médio e seu desvio padrão com a distância, observou-se uma tendência de queda dos valores médios e desvios padrão do retardo RMS até distâncias de 700 metros, uma tendência de crescimento para distâncias entre 700 e 1.500 metros e novamente uma tendência de crescimento entre 2.000 e 3.500 metros. Para cada uma destas regiões foi obtida uma regressão logarítmica que permite estimar os valores de retardo médio e desvio padrão a partir da distância ao transmissor. A amplitude média das amplitudes de retardo mostrou um decaimento logarítmico com o valor do retardo e também com a largura de banda de medição. Foi obtida uma expressão empírica para caracterizar esta dependência, que permite não apenas estimar as amplitudes de retardo mas também realizar escalonamentos considerando diferentes larguras de banda de medição.

Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros propõe-se:

- i. a realização de novas campanhas de medições para se obter a perda média e o perfil de retardos em ambientes externo e interno, em diferentes cenários, para ampliar a base de dados existente.
- ii. comparar os resultados obtidos com a técnica de sondagem OFDM com outras técnicas como a de sondagem por pulso e correlação no domínio do tempo.
- iii. quanto aos modelos para predição da perda média de propagação, sugere-se refinar o modelo de predição da recomendação ITU-R P.1411-3 com o ajuste do parâmetro L_{rts} de forma a diminuir o erro de predição.
- iv. a partir da base de dados já disponível, realizar o modelagem estatística do número de componentes de multipercurso.
- v. considerar os efeitos adicionais que são produzidos no ambiente de medição e tratá-los de forma isolada como são os efeitos produzidos pela vegetação, veículos e pessoas.
- vi. medições e modelagem do ângulo de chegada das componentes de multipercurso, o que requer um sistema de medição mais sofisticado.