

6. Conclusões

Ao longo deste trabalho, foram descritas as características principais do sistema WiMAX e da tecnologia OFDM, a fim de contextualizá-los, uma vez que um sinal baseado nessas características é transmitido durante as campanhas de medidas *outdoors*, que serviram para obtenção dos dados base para a análise estatística do sinal realizada nesta pesquisa.

As medições realizadas durante a coleta de dados utilizados neste trabalho consistem na transmissão de um sinal WiMAX com as seguintes características principais: OFDM 256; 200 subportadoras úteis; 56 subportadoras nulas; largura de banda útil de 3,25 MHz; frequência central de 3,410 GHz; espaçamento entre subportadoras de 16,276 KHz. Por comodidade, ao longo deste trabalho adota-se a contagem sequencial das subportadoras, iniciando em 1.

Foram realizadas três campanhas de medições. A primeira teve como objetivo determinar a faixa de frequência com menos sinais interferentes no espectro de 3,4 a 3,6GHz. A campanha de medição seguinte determinou o raio de cobertura da antena transmissora. Por fim, foi realizada a campanha de medição das informações de fase e quadratura (I e Q) do sinal transmitido, possibilitando a criação de um banco de dados. As informações contidas neste banco de dados foram utilizadas como base para o estudo estatístico do comportamento do sinal propagado por meio do canal móvel.

Durante o pós-processamento foram definidas as oito subportadoras pilotos com base na especificação dos *offsets* de frequências citados na Tabela 1.3. Estas subportadoras foram utilizadas como referência para as análises realizadas.

6.1. Estatística do sinal

A literatura propõe que a variabilidade do sinal propagado em um canal rádio móvel pode ser caracterizada por certa distribuição estatística. É proposto,

de forma empírica, que a distribuição log-Normal seja capaz de caracterizar sinais obtidos ao longo de diversos setores e que sofrem desvanecimento em larga escala, ou seja, o receptor está em posição de sombreamento em relação ao transmissor. Por outro lado, define-se que os sinais que sofrem desvanecimento em pequena escala são melhor caracterizados pelas distribuições Rayleigh, de m-Nakagami e de Rice. Esta pesquisa teve como um dos objetivos utilizar dados medidos em campo para verificar a adaptação dessas distribuições teóricas com os dados coletados. O processo de medição foi descrito no capítulo 4.

A análise do desvanecimento em larga escala não pôde ser realizada devido à limitação de tempo de aquisição dos dados apresentada pelo equipamento MS2781B.

Devido à similaridade entre as distribuições de Rice e de m-Nakagami, foram gerados e apresentados no capítulo 5 apenas os resultados referentes à comparação dos dados medidos com as distribuições Rayleigh e de m-Nakagami. Ao observar a Figura 5.5, é possível perceber que a distribuição de m-Nakagami adapta-se aos dados coletados, enquanto que a distribuição Rayleigh apresenta notória discrepância. Por meio dessas informações, é possível concluir que a distribuição de m-Nakagami pode ser usada para caracterizar o ambiente de medição em questão e que este setor está em condição de visada direta com o transmissor. Por meio de inspeção visual, confirma-se que a medição foi realizada em ambiente de LOS. Outros setores em LOS foram analisados, porém não inseridos no texto, uma vez que apresentaram o mesmo desempenho citado. Foram exibidos os gráficos de distribuição cumulativa de diversas subportadoras do mesmo setor, com o intuito de mostrar que, mesmo com a separação em frequência, o canal afeta o sinal de tal forma que as subportadoras podem ser caracterizadas pela mesma distribuição de probabilidade.

A distribuição Rayleigh é um caso particular da distribuição de m-Nakagami, que se aplica para ambientes em que não existe uma componente do sinal dominante ou direta. Por meio de análise da Figura 5.6, percebe-se que a distribuição de m-Nakagami, Rayleigh e os dados coletados seguem o mesmo traçado. Os resultados são semelhantes para todas as oito subportadoras. Devido à definição da distribuição Rayleigh, conclui-se que, uma vez que esta se adapta aos dados, temos uma situação de NLOS. Tal situação foi confirmada por meio de inspeção visual.

A análise da variabilidade do sinal é importante para que seja possível determinar o comportamento do sinal, a área em que o sinal possui nível adequado, o tempo médio que ele permanece abaixo de um nível mínimo detectável e a escolha da taxa de dados a ser transferida no canal.

A função distribuição cumulativa, por definição, é um parâmetro estatístico de primeira ordem (*first order statistics*), ou seja, não é função do tempo. A taxa de desvanecimento e o tempo médio de desvanecimentos são funções do tempo (parâmetros estatísticos de segunda ordem). O primeiro destes define a frequência, por segundo, em que a amplitude do sinal cai abaixo de um determinado limiar R , enquanto que o segundo, tempo médio de desvanecimento, determina o tempo médio que este sinal permanece abaixo do dado nível.

É possível observar que as equações de taxa de cruzamento de nível (LCR – *Level Crossing Rate*) e tempo médio de desvanecimento (AFD – *Average Fade Duration*) propostas por Yacoub [66] caracterizam de forma satisfatória os dados medidos em campo, tanto para ambientes com visada direta quanto sem visada, ou seja, para diversos valores da variável m da distribuição m -Nakagami. Novamente, foram apresentados os gráficos para as diversas subportadoras piloto (Figura 5.9 a Figura 5.24), sendo possível concluir que as equações de LCR e AFD, propostas para as distribuições Rayleigh e m -Nakagami de fato adaptam-se aos dados das diversas subportadoras obtidos em campo. Cada subportadora piloto é espaçada em 406,9 kHz ($25 \cdot 16,276$ kHz) da subportadora piloto anterior.

6.2. Banda de coerência

Por definição, a banda de coerência determina qual o máximo espaçamento em frequência em que o canal afeta igualmente as componentes do sinal. Em outras palavras, qual o espaçamento em frequência em que duas componentes espectrais possuem amplitude com correlação superior a determinado limiar. Geralmente, tal valor é 0,5 ou 0,9, não havendo um rigor técnico para escolha de um ou de outro. Neste trabalho, optou-se por usar o limiar de correlação de 0,5.

O sinal OFDM obtido durante as medições, quando analisado no domínio da frequência, possui 200 subportadoras de dados espaçadas em 16,276 kHz. De posse destes dados, foi realizada a correlação de uma determinada

subportadora X com as subportadoras $X+i$ subsequentes, onde i assume os valores de 0 a $228-X$ e X assume os valores das sete primeiras subportadoras piloto. Optou-se por não realizar o cálculo de correlação a partir da oitava subportadora piloto devido à menor, e até mesmo insuficiente, quantidade de amostras subsequentes disponíveis.

Os resultados referentes à banda de coerência foram classificados de acordo com o ambiente de propagação (LOS ou NLOS), pois durante a análise dos dados percebeu-se diferença significativa de valores de banda de coerência para setores em situação de visada (LOS) e não visada direta (NLOS) com a antena transmissora. A mesma característica é retratada em [39] e [52].

Decidiu-se trabalhar com a média da banda de coerência por ambiente por perceber a não homogeneidade dos dados, tanto na literatura [9, 10, 40, 48], quanto nos dados pós-processados. Indo mais além, optou-se por realizar, também, a média ponderada pela quantidade de amostras utilizadas no cálculo da correlação, dando, assim, maior importância para as estimativas que usam maior quantidade de dados. Os valores de média e média ponderada dos dados coletados podem ser visualizados na Tabela 5.1.

Em ambientes sem linha de visada existe maior incidência do fenômeno do multipercurso, acarretando em maior espalhamento de retardos do sinal [43]. Uma vez que o *delay spread* é inversamente proporcional à banda de coerência, justifica-se o fato deste parâmetro ter menor magnitude em NLOS do que em LOS.

Analisando a Figura 5.25 à Figura 5.28, é possível perceber que nos ambientes de LOS, Figura 5.25 e Figura 5.26, as oscilações são menos numerosas. Em [47] os autores afirmam que quanto maior for o multipercurso, mais oscilações são apresentados no gráfico de correlação versus espaçamento em frequência. Em alguns gráficos de correlação, como a Figura 5.29, pode ser observado que a curva de correlação cruza mais de uma vez o valor de correlação de 0,5. Neste trabalho, foi adotado que a banda de coerência é determinada pela primeira vez que a curva cruza o limiar de 0,5, como determina Parsons em [47].

Nota-se que o valor da média ponderada em relação à média aritmética tem maior alteração quando se trata de ambientes em LOS. É possível supor que esta diferença ocorra, pois, em linha de visada, a banda de coerência é maior, logo, necessita de maior quantidade de subportadoras para que seja determinado o seu valor, ocorrendo momentos em que a correlação em 50% não pode ser determinada, devido à limitação quantitativa de subportadoras

subsequentes. Com isto, conclui-se que o peso da quantidade de amostras tem maior influência em ambientes de LOS.

6.3. Espalhamento de retardos (*Delay Spread*)

Uma vez de posse da informação de banda de coerência, é possível calcular o valor do *delay spread*, parâmetro que caracteriza canais banda larga. Neste trabalho, propõe-se chegar ao valor de *delay spread*, por meio da manipulação matemática de informações de banda de coerência, obtidas a partir da medição de sinais banda estreita e sem a necessidade da construção de uma sonda específica para realização das medições, apenas fazendo uso das características do sistema utilizado.

Foram calculados os valores de *delay spread* utilizando a Equação 2.17 proposta por [51], bem como a regressão linear proposta por [10], com base em campanhas de medições onde o perfil de retardo é adquirido e as informações de banda de coerência e *delay spread* são obtidas. É possível notar que os valores de banda de coerência apresentados neste trabalho estão coerentes com os valores observados em [10] e que os valores de *delay spread* calculados a partir do mesmo são cerca de três vezes maior, em LOS, e duas vezes maior, em NLOS, quando comparados aos resultados obtidos com base na fórmula de *delay spread* [51]. Esta comparação induz a que a fórmula subestima o valor de *delay spread* quando calculado a partir da informação da banda de coerência em 50%.

6.4. Trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho surgiram idéias de trabalhos que podem complementar os estudos, aqui realizados, ou simplesmente trabalhos afins com o deste estudo. Algumas dessas idéias para estudos futuros são expressas a seguir:

- Pós processar os dados com o intuito de encontrar o perfil de retardos e, assim, poder verificar as equações de espalhamento de retardos, aqui utilizadas, em função da banda de coerência;
- Análise da dispersão em frequência;
- Estudar a diferença de potência observada entre as suportadoras pilotos de um mesmo setor, uma vez que tal

diferença não seria esperada baseado na intervalo de freqüência entre as mesmas.

- No sistema WiMAX a alocação das subportadoras pode variar de acordo com o esquema de alocação de canais, como por exemplo PUSC (*partial usage of subchannels*) ou FUSC (*full usage of subcarriers*). Verificar se o padrão da mudança de alocação das subportadoras piloto é adequado para a realização da estimativa do canal;
- Análise estatística da variação da banda de coerência de acordo com a alteração da frequência.