

## 7

### Conclusão

Com o objetivo de estudar uma técnica de caracterização espaço-temporal do canal rádio móvel, baseada na sondagem em frequência, foi delimitado o caminho a ser percorrido na realização deste trabalho.

A demanda por novos serviços de comunicações móveis aumenta a cada dia e a implantação desses serviços depende não apenas do conhecimento da amplitude do sinal, mas também de outros parâmetros como espalhamento temporal e angular. As características espaço-temporais do canal têm sido o foco de vários estudos e tentativas de modelagem do canal, que só são possíveis com o profundo conhecimento dos mecanismos de propagação.

Métodos avançados de processamento de sinais são o ponto chave para a estimação do ângulo de chegada, e têm vetores de sinais provenientes de conjuntos de antenas como pilar de desenvolvimento. O primeiro método desenvolvido foi o *beamforming*, que é bastante simples do ponto de vista computacional, mas com resultados de baixa resolução. Recentemente foram desenvolvidos outros métodos que provêm maior eficiência e melhor resolução, porém com maior custo computacional, como o *MUSIC*, o *ESPRIT*, as técnicas de máxima verossimilhança...

O trabalho aqui apresentado mostra as etapas de construção do *setup* de medidas. O Analisador Vetorial, elemento central da técnica de sondagem em frequência, varre uma banda de frequência e reporta dados de amplitude e fase do sinal; o *setup* final foi construído baseando-se em trabalhos de estimação temporal e espaço-temporal do canal [16] [41] [44], constituído por um conjunto de elementos: Analisador Vetorial, *array* de antenas, antena discônica (transmissão), computador, amplificadores, *switches*, cabos e conectores. A introdução do *array* e do conjunto de *switches* dão condições para que métodos de processamento de sinais possam ser utilizados para estudar as características espaço-temporais do canal.

Após o processo de montagem do *setup* de medidas, foi apresentado o método de análise escolhido, baseado nas técnicas de *beamforming*, especificamente no método proposto por Capon, o *MVDR*. Este algoritmo vale-se

do conhecimento do comportamento do sinal para determinadas direções. Isto é obtido através da geração de matrizes apontamento, que trazem informações sobre o canal para 64 diferentes direções espaçadas de  $5,625^\circ$ , realizando uma volta de  $360^\circ$ . De posse dessas matrizes foram encontrados 64 vetores de pesos ótimos.

Nota-se que, apesar do alto custo computacional no processo de otimização dos pesos, uma vez encontrados os pesos ótimos, estes podem ser utilizados indefinidamente gerando resultados de forma extremamente rápida. Tomando-se 801 pontos na banda, pôde-se observar, conforme a tabela 5.1, na página 50, que o tempo de processamento para os 64 vetores de pesos, os quais compõem a matriz  $W$ , foi de *76 minutos*. Várias otimizações chegaram a pesos extremamente semelhantes, com variação na quinta casa decimal.

Para obter o resultado do processamento, os pesos ótimos  $W$  encontrados no processo de otimização são multiplicados por uma matriz de medidas qualquer  $V$ , gerando a matriz  $X$ . Nesta matriz é aplicada uma função janela seguida de uma Transformada Inversa Discreta de Fourier, resultando na matriz espaço-temporal  $Y$ .

De posse do conjunto: *setup*, matrizes de apontamento e algoritmo de processamento, algumas investigações foram adotadas como forma de caracterizar o desempenho do conjunto. Nelas analisou-se as situações para geração das matrizes apontamento, a carga computacional para processamento das medidas quando tomados 101 e 801 pontos dentro da banda de frequência e a resposta do algoritmo de processamento quando submetido às matrizes de apontamento, seção 5.4.

Apresentados os cenários de medidas (Estacionamento, 4º andar do Edifício Cardeal Leme e CETUC), os resultados obtidos foram mostrados, e os principais pontos de análise levantados.

Os tópicos a seguir esclarecerão, com mais detalhes, o conjunto de resultados obtidos.

## 7.1

### Limitações da Técnica

O primeiro ponto de discussão é em relação às limitações apresentadas pela técnica de processamento escolhida. Nos experimentos reportados por [41] foi observado que esse método favorece o aparecimento de lóbulos laterais ao sinal desejado.

Conforme pode ser visto na figura 5.3, o mesmo ocorreu neste trabalho. O processamento da matriz apontamento na direção 26 deveria ter como resultado apenas um pico de sinal na direção prevista, entretanto, são visíveis lóbulos laterais ao sinal desejado que não correspondem a nenhum ângulo de chegada.

Uma consequência da presença desses lóbulos aparece nos resultados obtidos para estatísticas de dispersividade angular, apresentadas na seção 6.3.

Tomando como exemplo as matrizes apontamento, é possível perceber que o sinal só deveria chegar ao receptor vindo de uma direção específica, sem reflexões, resultando num espalhamento angular de  $0^\circ$ . Entretanto, o valor encontrado pelo algoritmo de análise é  $18,51^\circ$ , mostrando que a presença de lóbulos laterais influencia no resultado, criando a falsa idéia de espalhamento angular.

O mesmo acontece com as medidas realizadas no estacionamento. O raio direto chega ao receptor a  $0^\circ$ , sem reflexões. Porém, existem lóbulos laterais fazendo com que os valores encontrados estejam próximos de  $40^\circ$ , conforme tabela 6.1.

Nota-se que os valores encontrados nas outras medidas são compatíveis com os valores reportados por outros trabalhos para ambientes *indoor* [35], onde receptor e transmissor estão em um mesmo andar e são recebidos multipercursos provenientes de todas as direções. Com essas inconsistências, seria incoerente tentar estabelecer correlações entre o espalhamento angular e o espalhamento temporal.

É importante salientar que, apesar da limitação aqui discutida, a técnica apresenta uma performance aceitável, conseguindo perceber situações bastante peculiares como as múltiplas reflexões encontradas no corredor do Edifício Cardeal Leme.

## 7.2

### Realização e Análise das Medidas

Medidas foram realizadas em três ambientes diferentes com o objetivo principal de avaliar a metodologia adotada. Para isso, percebeu-se a necessidade de “forçar” algumas situações com o intuito de investigar a resposta do sistema a tais estímulos. Além do posicionamento TX-RX em pontos estratégicos, como nas medidas ESQUINA1-ESQUINA3 e CETUC4r, em alguns momentos foi utilizada uma placa metálica como elemento refletor.

A ferramenta de análise forneceu resultados espaço-temporais de acordo com o esperado. O tempo de propagação dos retardos foi coerente com o posicionamento dos principais espalhadores e os ângulos de chegada observados também estavam em conformidade com a possível localização dos elementos geradores de multipercurso.

Algumas medidas realizadas no Ed. Cardeal Leme evidenciaram a existência de múltiplas reflexões do sinal. Conforme apresentado no capítulo 2, Modelos de Base Geométrica baseiam-se na hipótese de reflexão única, confrontada com as medidas LEME5-LEME8.

Outra situação importante foi encontrada na medida CETUC4r, onde é possível perceber claramente dois raios que chegam no receptor com o mesmo retardo, mas provenientes de direções diferentes.

Um ponto forte de validação da técnica aconteceu com a comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e uma outra técnica de análise, o *pdp*. Essa última, é uma técnica de análise temporal para detecção de retardos [44] com a qual já se obteve resultados consistentes, e aqui, foi empregada com o propósito de confrontar a eficiência do método utilizado para processamento das medidas. Conforme pôde ser observado no decorrer do capítulo 6, os resultados obtidos pelos dois métodos foram bastante semelhantes, legitimando o método de filtragem espacial mostrado no capítulo 5 e usado neste trabalho.

Resultados como os agora reportados, além de todo o conjunto mostrado na seção 6.2, vêm demonstrar que apesar das imperfeições da técnica mostrada no item anterior, o sistema implementado contribui para o conhecimento dos principais modos de propagação do ambiente.

### 7.3 Trabalhos Futuros

Sugere-se, para trabalhos futuros, o uso de outra técnica de análise para comparação com os resultados alcançados neste trabalho, como critério a ser avaliado para explorar o vasto banco de dados disponível. De acordo com [41], é possível implementar um método de alta resolução que também utilize as matrizes de apontamento e que forneça resultados mais precisos. Entretanto, esse método só é aplicável para matrizes apontamento que forneçam uma relação sinal-ruído maior que  $20dB$ , tornando imprescindível o uso de uma câmara anecóica para geração das mesmas.

Ressalta-se que tentou-se implementar esse método, porém, com as matrizes disponíveis não se obteve nenhum resultado coerente.

Apesar de não constarem do escopo da pesquisa, foram realizadas medidas com um *array* linear de 16 elementos. É interessante tentar explorar esses dados com a aplicação de métodos clássicos de processamento que não utilizam matrizes apontamento, como o *MUSIC*.

Em relação ao *setup*, seria possível aprimorar o processo de obtenção das matrizes apontamento com a introdução de um sistema mecânico para rotação automática das antenas, fazendo com que a determinação das 64 direções fosse mais precisa. Também seria interessante um estudo mais detalhado a respeito dos problemas de acoplamento mútuo, visando medidas ainda mais confiáveis.

Conforme dito acima, a geração das matrizes apontamento numa câmara anecóica traria grandes benefícios para o trabalho pois tornaria possível a utilização de outro método de análise, além da obtenção de melhores resultados com o método de filtragem espacial aplicado.

Um importante estudo a ser desenvolvido diz respeito à determinação da resolução espacial do sistema, ou seja, o menor espaçamento perceptível entre ângulos de chegada. De acordo com o reportado por [34], é possível determinar a resolução espacial através de simulações que envolvam as matrizes apontamento.

Finalmente, como um avanço natural do trabalho, pode-se tentar a implementação de sistemas MIMO (*multiple input multiple output*). Estes sistemas utilizam múltiplas antenas na transmissão e na recepção dos sinais no processo de caracterização completa do canal.