

8 Conclusões e Trabalhos Futuros

8.1 Conclusões

Sistemas com múltiplas antenas transmissoras e receptoras, também conhecidos como sistemas MIMO, têm sido apontados como uma solução para aumentar a capacidade de enlaces sem fio, permitindo aos usuários utilizar aplicações com altas taxas de dados. Esses sistemas podem alcançar alta eficiência espectral, porque eles decompõem o canal em vários canais paralelos. Porém, a eficiência desses sistemas depende do ambiente de propagação entre o transmissor e o receptor, já que esses canais necessitam ser independentes. Uma hipótese muito utilizada para avaliar a capacidade do sistema MIMO é descrever esse ambiente de propagação como sendo rico em espalhadores, o implica que os elementos do canal são gaussianos e estatisticamente independentes.

Foram dois os objetivos principais desta tese: (1) avaliar a capacidade faixa-larga e faixa-estreita para diferentes ambientes de propagação; e (2) caracterizar este ambiente de propagação. Para que isto fosse possível, foi desenvolvido um sistema de medidas com quatro antenas no transmissor e quatro no receptor. Os seguintes ambientes foram escolhidos para serem medidos: laboratórios, corredores, salas de aulas, biblioteca e indústria.

Através de uma extensiva campanha de medidas *indoor* a capacidade do canal para um sistema MIMO foi avaliada. Esta capacidade foi calculada para um canal faixa-estreita e para um canal seletivo em frequência, com diferentes larguras de banda. A caracterização dos canais paralelos foi realizada através da obtenção dos autovalores da matriz HH^H . Foi também avaliada a capacidade de cada canal paralelo. Por fim, foi avaliada a capacidade de um sistema MIMO 2x2 com diferentes espaçamentos entre os elementos dos arranjos.

Com estes mesmos dados medidos foi possível caracterizar o canal espaço-temporal. Parâmetros como tempo de chegada, ângulos de chegada e saída e amplitude complexa foram estimados utilizando o algoritmo FD-SAGE. Através de parâmetros de dispersão temporal e espacial do canal foi possível ter uma melhor visão do ambiente de propagação. Com esses parâmetros, um estudo sobre a influência deles na capacidade foi realizado.

Os principais resultados obtidos foram:

- foi possível observar uma grande variação da capacidade do canal MIMO para o mesmo ambiente;
- foi possível observar a queda da capacidade do canal MIMO com o aumento da distância;
- foi observado que para a situação com visada, tem-se uma capacidade aproximadamente 30% menor que a capacidade ideal e aproximadamente 24% menor para a situação com visada parcialmente obstruída. Para a situação sem visada, a capacidade pode variar aproximadamente de 8 a 20%. Para corredores, foi encontrada uma capacidade entre 12 a 52% menor que a capacidade ideal;
- capacidade faixa-larga: para a maioria dos ambientes sem visada os ganhos começam a ser significativos para larguras de banda superiores a 20 MHz; já para os ambientes com visada direta os ganhos começam a ser significativos apenas para larguras de banda maiores que 50 MHz;
- capacidade faixa-larga: foi possível observar que para a maioria dos ambientes medidos, a capacidade condicionada se aproxima da capacidade média quando se aumenta a largura de banda;
- para a maioria dos ambientes medidos, foi identificada a existência de 3 canais paralelos significativos e de um com valor desprezível;
- foi possível verificar que para os ambientes sem visada direta o CN variou de aproximadamente 27 a 32 dB, e para o ambiente com visada e com visada parcial o CN variou de aproximadamente 36 a 58 dB;
- com o aumento do espaçamento entre os elementos do arranjo, em quase todos ambientes houve a melhora na capacidade condicionada, tanto para ambientes com visada, quanto para ambientes sem visada.

- foi estimado para os ambientes medidos o número de multipercursos. Para os ambientes com visada e visada parcial, o número de multipercursos variou aproximadamente de 5 a 13, e para o ambiente sem visada o número de multipercursos variou aproximadamente de 18 a 46;
- foi definido o número efetivo de multipercursos. Foi observado que o número efetivo de multipercursos grande (maior que seis) implica no espalhamento da energia em vários multipercursos e que o número efetivo de multipercursos pequeno implica na concentração da energia em apenas alguns multipercursos;
- uma análise da quantidade de multipercursos e do número efetivo de multipercursos com as capacidades condicionada e média foi realizada. Uma conclusão importante que se tira é que nem sempre uma grande quantidade de multipercursos equivale a ter uma grande capacidade. Analisando o número efetivo de multipercursos médio foi comprovado que as maiores capacidades obtidas possuíam número efetivo de multipercursos maior que seis;
- os parâmetros de dispersão temporal foram calculados e estão dentro dos valores encontrados na literatura. Um estudo sobre o efeito da banda de coerência do canal e a capacidade para um canal seletivo foi realizada. Através deste estudo, foi possível explicar as poucas melhoras na capacidade condicionada para as larguras de 5, 10 e 50 MHz se comparadas com o canal faixa-estreita para os ambientes medidos;
- uma análise espaço-temporal do canal foi realizada. Através dessa análise foi possível observar as grandes diferenças entre os ambientes com visada e visada parcial e os ambientes sem visada. Foram identificados multipercursos com potências equivalentes e suas relações no domínio espacial. O agrupamento dos multipercursos com potências equivalentes no transmissor e no receptor foi observado, o que indica uma provável redução da capacidade;
- o espalhamento angular no transmissor e no receptor foi calculado. Foi possível observar que o espalhamento angular era bem maior no receptor do que no transmissor. Foi observado que o espalhamento angular para ambientes com visada é menor do que para os sem visada.

- para os ambientes sem visada, o espalhamento angular no receptor variou de aproximadamente 17 a 320 e no transmissor variou de aproximadamente 9 a 260. Para os ambientes com visada e visada parcial, o espalhamento angular no receptor variou de aproximadamente 10 a 300 e no transmissor variou de aproximadamente 4 a 140. Foi avaliado o comportamento do espalhamento angular do transmissor e no receptor em corredor. Foi verificado que com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor o espalhamento angular no transmissor vai reduzindo. O espalhamento de retardo no receptor, por outro lado, apresenta valores sempre bem superiores aos obtidos no espalhamento angular no transmissor.
- foi realizado um estudo sobre a relação entre o espalhamento angular e as capacidades condicionada e média. Foi confirmado que para valores pequenos de espalhamento angular (no transmissor ou no receptor) existe uma redução na capacidade. Porém, foi mostrado que outros parâmetros devem ser analisados em conjunto com o espalhamento angular para se obter conclusões mais precisas, pois nem sempre um alto valor do espalhamento angular indica probabilidade de ter uma alta capacidade.

Desse modo, através deste trabalho é possível se ter uma visão do comportamento do canal e da capacidade a ele associado. Através desse trabalho já se pode ter uma visão do que como seria um ambiente rico em espalhadores.

8.2 Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- observando os dados medidos e a análise espaço-temporal do canal, foi possível perceber a existência de cluster tanto na transmissão como na recepção. Um estudo bastante interessante é utilizar alguma técnica de processamento de sinal para identificar todos os clusters possíveis. Em seguida, analisar a influência da existência de clusters na capacidade do canal;

- para a realização das medidas foi necessário montar um sistema de medições. Um trabalho interessante para se utilizar esse sistema de medidas é construir um painel de antenas e medir o ângulo de elevação tanto transmissor quanto no receptor, observando as suas influências na capacidade do canal;
- neste trabalho foram coletadas 18.144 funções de transferência do canal. Com estas medidas alguns estudos podem ser realizados:
 - i. Propor modelo de um canal MIMO.
 - ii. Melhorar o modelo do sinal para estimação dos parâmetros.
 - iii. Melhorar o algoritmo do ciclo de inicialização.
 - iv. Propor um novo algoritmo de estimação de parâmetros.
- apesar de existirem inúmeros trabalhos de medidas sobre o assunto MIMO, ainda existem alguns temas que merecem ser investigados:
 - i. Construção de um sistema de medidas MIMO *outdoor* (Caracterização do canal)
 - ii. Construção de um sistema de medidas para testes de novas estruturas de *transceivers* e sistemas (UMTS, OFDM).