

## Capítulo VII – Conclusão e Trabalhos Futuros

### 7.1

#### O Modelo de Propagação

Com o objetivo de analisar a propagação de ondas milimétricas em canais UWB em ambientes exteriores, utilizando o estado da arte que vem emergindo na literatura recente sobre comunicações móveis, foi desenvolvido o modelo descrito nesta tese. Foi necessário dispor de um algoritmo implementado na linguagem de programação Matlab R15, com as seguintes funções e propriedades:

- a) Pode analisar toda a faixa de frequências milimétricas, de 30 GHz a 300 GHz;
- b) Pode analisar canais UWB com largura de banda configurável, sendo usados nas simulações canais com largura de banda de: 5 GHz, 1 GHz e 800 MHz. Foram também simulados canais em faixa estreita, na largura de 100 kHz;
- c) Pode simular vários tipos de antenas diretivas, cujos diagramas de radiação são aproximados por um feixe principal axialmente simétrico em relação a direção de ganho máximo e o restante da região possui um ganho plano;
- d) Considera os mecanismos de propagação:
  1. Raio direto e refletido no solo;
  2. Raios com diversas reflexões especulares em paredes de prédios, postes, troncos e copas de árvores (tanto raios aéreos quanto, adicionalmente, refletidos no solo);
  3. Raios difratados em arestas verticais nas laterais dos prismas retos de base poligonal que representam os prédios e em cilindros verticais que podem representar troncos, postes e copas de árvores;
  4. Raios com reflexão difusa em paredes de prédios, podendo utilizar três modelos de espalhamento difuso: Lambertiano, Diretivo e Misto;

- e) Os raios podem conter apenas uma interação do tipo difração ou reflexão difusa e até 47 interações do tipo reflexão especular. Nas simulações, foram usadas até oito interações para raios aéreos e dez interações para raios que podem tocar o solo;
- f) São consideradas duas polarizações lineares ortogonais, que podem ser combinadas para formar polarizações circulares;
- g) Os raios podem sofrer a ação de bloqueio por parte de elementos do ambiente, tais como postes e troncos e sofrer atenuação pela propagação em copas de árvores e atenuação da potência recebida por ação da atmosfera;
- h) Em cada canal simulado, o modelo determina o raio cujo campo associado é mais intenso e alinha a direção de ganho máximo das antenas às direções de partida e chegada deste raio;
- i) É possível escolher qualquer altura acima do solo para as antenas nas simulações;
- j) O modelo dispõe de um editor de ambientes, que permite especificar a localização dos prédios, árvores e postes, assim como rotas de medição.

Os ambientes considerados são típicos de microcélulas urbanas com alta ocupação por prédios em um terreno plano. Nos ambientes reproduzidos, foi feita uma breve campanha de coleta de informações sobre os tipos de espalhadores presentes, sua quantidade e posicionamento, assim como dimensões gerais.

Foram representados três ambientes para o ajuste e validação do modelo: Campus da Universidade de Nova York; distrito de Nihonbashi, no centro de Tóquio; e rua Eerikinkatu, no centro de Helsinque. Posteriormente, foram representados dois ambientes para simulações: o bairro de Ipanema, na cidade do Rio de Janeiro, e a estilização de um bairro central da cidade de Madri, utilizada para testes de conceito e simulação pelo grupo de pesquisa do projeto METIS 2020.

As edificações em um quarteirão foram agrupadas e representadas por prismas retos de base poligonal convexa. Cada prisma possui características eletromagnéticas e rugosidade próprias, formando um bloco que representa todas as construções do quarteirão. Foi usado o método de traçado de raios 2.5D, para traçá-los usando os mecanismos propostos. Durante a fase de traçado de raios,

foram usadas várias técnicas de aceleração. Cada raio traçado é relacionado a uma parcela infinitesimal da frente de onda, que possui uma fração da energia radiada pelo transmissor e que é representada por um número complexo (amplitude e fase), para cada polarização linear. Todos os números complexos associados aos raios traçados foram somados e representam a função de transferência do canal em uma determinada frequência. A função de transferência no canal UWB foi definida pela composição de todas as contribuições em toda a faixa de frequências selecionada, calculada em valores de frequência discretos e uniformemente espaçados. O valor do espaçamento entre as frequências pode ser ajustado.

O algoritmo utiliza a função de transferência para gerar um perfil de potência e retardos, que serve de base para os cálculos de potência recebida, retardo médio e desvio de retardo RMS para todos os tipos de polarização.

O modelo também considerou os efeitos das diversas possíveis interações dos raios com os prédios e demais espalhadores, tais como: despolarização, atenuação e mudanças de fase associadas às interações.

As faixas de frequência utilizadas neste modelo em simulações foram: 26 GHz, 28 GHz, 72 GHz e 80 GHz.

## 7.2

### Conclusões

Existe literatura reduzida sobre campanhas de medições em ambientes externos utilizando mmW em canais UWB. Consequentemente, a comparação entre resultados simulados e dados reais obtidos em campanhas de medições foi um dos principais desafios ao desenvolvimento do modelo. A carência de literatura pode ser devida ao alto custo de aquisição de equipamentos para uso em medições nesta faixa. Outra dificuldade diz respeito à forma como as informações sobre as campanhas estão apresentadas na literatura, mostrando apenas resultados finais ou após algum processamento. Foram selecionadas cinco campanhas de medições em diversas partes do mundo, de onde foram extraídas informações que serviram de base para simulações e ajustes do modelo.

A primeira campanha [110] utilizou a faixa de frequência de 28 GHz e mediu a perda de propagação da componente vertical do campo em função da distância. Foram feitas medições em diversos canais em condições de LOS e NLOS situados no campus da Universidade de Nova York e, ao final, foi proposto pelos autores um modelo de perda de propagação. A simulação apresentada nesta tese reproduziu o ambiente do campus, utilizando as técnicas descritas no Capítulo III. Foram obtidos por simulação os valores de potência nos canais, que obtiveram boa concordância geral com os valores medidos para os mesmos canais, com módulos das diferenças médias entre valores medidos e simulados iguais a 6,48 dB. Alguns canais apresentaram diferenças médias maiores que 10 dB.

A segunda campanha de medições utilizou as mesmas localizações dos receptores da primeira campanha e foi alterada a posição do Tx. A análise comparativa entre os dados oriundos das medições e simulações mostrou módulos das diferenças médias nos canais iguais a 5,2 dB. Alguns canais apresentaram diferenças próximas de 10 dB.

A terceira campanha executada em Tóquio [111], na faixa de 26,4 GHz, utilizou uma rota preestabelecida, sem visada. Os resultados simulados e medidos apresentaram uma diferença média de 6,72 dB. Alguns canais apresentaram diferenças da ordem de 10 dB e um canal da ordem de 30 dB.

A quarta campanha [114] usou o mesmo ambiente da primeira campanha, embora com o Tx e Rx em novas posições e usando a faixa de 73 GHz. Foram obtidos resultados próximos aos das outras simulações, com a diferença média de 5,2 dB. Em alguns canais, a diferença ficou na faixa de 10 dB e, em um canal, foi calculada a diferença de 15,1 dB entre valores simulados e medidos. Nesta campanha, foram estudados em detalhes os possíveis motivos para as grandes diferenças entre valores medidos e simulados encontradas em alguns canais. O modelo pode errar na fase de traçado de raios ao não considerar janelas, sacadas e possivelmente outros objetos pequenos presentes nas paredes das construções. Tal efeito pode ser devido à alta frequência utilizada.

A última campanha de medições foi feita em uma rua do centro de Helsinque, Finlândia [112]. Utilizou a faixa de 80 GHz com a largura de banda de 5 GHz nas polarizações VV e HV. As medições utilizaram antenas diretivas do tipo parabólica e corneta, com ganhos de 45 dBi e 24 dBi, respectivamente. As diferenças entre as despolarizações simulada e medida situaram-se abaixo de 10 dB. Em geral,

a primeira mostrou-se otimista em relação à segunda. A comparação mostra boa concordância geral para ambas as antenas utilizadas em todas as polarizações.

Posteriormente, foram realizadas as simulações nos cenários de Ipanema e Madri, com o objetivo de investigar algumas características do modelo e extrair informações sobre vários aspectos da propagação.

A primeira simulação avaliou os efeitos do número máximo de interações do traçado de raios com o ambiente sobre a potência recebida, o retardo médio, o desvio RMS e a XPD (que mede o isolamento entre as componentes copolarizada e cruzada do campo). A variação deste número máximo de interações (ordem) impacta na quantidade de raios traçados e no tempo total da simulação. A ordem variou da oitava até a quinta, em canais LOS e NLOS.

A potência recebida apresentou pouca variação, tanto em LOS quanto em NLOS. O retardo médio também sofreu pouco impacto. Por outro lado, o tempo de execução da simulação, na dependência do canal, pode sofrer uma redução de mais de 99% ao se reduzir a ordem máxima da oitava para a quinta. O desvio RMS, em geral, diminui com a ordem máxima, embora a variação não seja grande, ficando abaixo de 10% ou 20 % para canais LOS ou NLOS, respectivamente.

A XPD medida entre as componentes copolarizadas (VV e HH) e cruzadas (VH e HV) do campo sofre pouca influência da variação de ordem em canais LOS, mas experimenta grandes variações em canais NLOS.

Em resumo, as análises comparativas mostram que, em todas as métricas avaliadas, ocorre pouca variação na previsão quando a ordem máxima de traçado de raios é diminuída da oitava para a quinta em canais LOS e até a sexta em canais NLOS.

Foi avaliado o impacto de árvores na propagação em um canal LOS situado em uma praça densamente arborizada. Os transceptores foram simulados com o Rx em 1,5 m e com o Tx nas alturas de 3,0 m e 8,0 m e 20,0 m do solo, em pontos fixos nos limites de uma praça arborizada. As copas das árvores estavam compreendidas entre as alturas de 3,8 m a 8,0 m do solo. Portanto, com o Tx a 1,5 m do solo, grande parte dos raios traçados se situavam abaixo da linha inferior das copas das árvores. Com o Tx nas demais alturas, os raios traçados podem sofrer interceptação pelas copas.

A simulação com o Tx abaixo da linha de copas mostrou um alto isolamento

entre as componentes copolarizada e cruzada do campo. A XPD entre as estas componentes foi sempre ligeiramente superior a 61 dB.

Ambas as simulações com o Tx acima da linha de copas mostraram uma grande queda no isolamento entre as componentes do campo. A simulação com o Tx em 8,0 m apresenta valores de XPD de 32,8 dB e 12,42 dB para as componentes VV-VH e HH-HV, respectivamente. Esta discrepância pode ter sido causada pela grande diferença entre os coeficientes de Fresnel para as polarizações VV e HH verificadas no solo, o que pode causar forte despolarização nos raios que refletem com altos ângulos entre a normal ao solo. Com o Tx na altura de 20,0 m, os valores de XPD para as componentes VV-VH e HH-HV foram de 36,29 e 21,64 dB, respectivamente.

O retardo médio e o desvio RMS sofrem as maiores variações com o Tx a 8,0 m, aumentando o retardo médio em mais de 15% e o desvio RMS até 48% em relação ao cálculo destas métricas com o Tx a 3,0 m. A simulação com o Tx a 20,0 m apresenta o retardo médio com um aumento de 6% e o desvio RMS com aumento da ordem de 15% em relação aos seus valores com o Tx a 3,0 m. Estas diferenças estão diretamente relacionadas aos efeitos das árvores sobre o raio direto e seu raio terrestre, pois com o Tx a 8,0 m o raio terrestre é bloqueado e o direto sofre atenuação pelas copas e com o Tx a 20,0 m ocorre a atenuação pelas copas em ambos os raios.

Também foi estudado o impacto provocado pela proximidade com uma árvore. O Tx foi simulado em uma posição fixa e o Rx percorre uma rota em inicialmente em LOS e o percurso é posteriormente interceptado por uma árvore próxima. O Rx esteve a 1,5 m e o Tx foi situado a 3,0 m e 15,0 m do solo; ou seja, abaixo e acima da faixa das copas das árvores.

Na simulação com o Tx a 3,0 m do solo, as posições do Rx foram escolhidas para que o raio direto seja interceptado pelo tronco em alguns canais. Nos canais sem visada, a simulação mostra que a potência média recebida pode decrescer até 15 dB em ambas polarizações VV e HH. Existe um grande número de raios (dezenas) que chegam ao Rx oriundos de reflexões especulares, o que pode garantir um bom nível de sinal, a despeito da maior despolarização. É importante frisar que os transceptores estão na praça, cercados por prédios e espalhadores, e foram traçados mais de 100.000 raios nos canais. A simulação também mostra que o bloqueio do raio direto neste canal pode provocar uma diminuição no isolamento da ordem de

13 dB e 16 dB para as componentes VV-VH e HH-HV, respectivamente, em relação aos canais que se encontra em condições LOS. Em relação ao retardo médio e desvio RMS, o modelo estimou um aumento na ordem de 20% e 30%, respectivamente, para os canais que sofrem bloqueio do raio direto, na componente vertical.

A simulação com o Tx a 15,0 m do solo ilustra o caso em que o raio direto é interceptado pela copa de uma árvore próxima, o que pode diminuir a potência recebida de 14 dB em ambas as polarizações VV e HH e causar uma queda no isolamento da ordem de 7 dB e 20 dB para as componentes VV-VH e HH-HV, respectivamente. O modelo mostrou que, nos canais em que o raio direto é interceptado pela copa, o retardo médio pode aumentar até 30% em comparação àqueles sem interceptação, na componente vertical. O desvio RMS também aumentou até 45% nestes canais com interceptação do raio direto.

A última simulação foi feita com o Tx em uma posição fixa a 15,0 do solo e o Rx em uma rota predeterminada. Os receptores definidos no início da rota, nas proximidades de uma praça arborizada, não têm visada direta ao transmissor. Nos canais posteriores, há visada e o ambiente de propagação é do tipo “vale de prédios”. O Rx foi simulado na rota em posições uniformemente espaçadas e na altura de 1,5 m. A frequência de operação foi de 70 GHz.

O modelo mostrou que a potência recebida, nas polarizações VV e HH, pode variar de até 50 dB ao longo da rota. Bloqueios do raio direto em alguns canais na rota, podem provocar decréscimos na potência recebida da ordem de até 18 dB em comparação a canais próximos.

Ao longo da rota, o isolamento entre as componentes copolarizadas e cruzadas do campo pode sofrer grandes variações, da ordem de até 70 dB entre os canais com menor (NLOS - próximos à praça) ou maior isolamento (LOS - vale de prédios). A simulação mostrou que o isolamento pode sofrer variações maiores nos canais situados no ambiente do tipo “vale de prédios”, em função do menor número de raios traçados em comparação aos canais situados na praça. Este efeito pode ser explicado pela grande diferença no número de raios traçados entre os canais NLOS e LOS, da ordem de dezenas de milhares. Assim no ambiente NLOS o impacto do bloqueio do raio direto é mitigado pelo grande número de raios que chegam ao Rx.

O retardo médio apresenta uma variação aproximadamente linear e decrescente, à medida que o Rx se aproxima do Tx. Um comportamento oposto é observado nos canais posteriores, quando o Rx se afasta do Tx.

O desvio RMS sofre pouca alteração nos canais sem visada próximos à praça, mas atinge seu valor mínimo nos canais onde o Rx está próximo ao Tx. Em seguida, à medida que os transceptores se afastam, o desvio RMS aumenta. Contudo, seu crescimento é mais acentuado nos canais com visada.

### 7.3

#### Desenvolvimento Futuro da Pesquisa

O modelo apresentado é uma ferramenta de predição que incorpora diversas técnicas que vêm sendo testadas nos últimos anos como prováveis constituintes do novo padrão de comunicações móveis de quinta geração. Como desenvolvimento futuro, pretende-se:

- a) Conseguir novas bases de dados para comparações e ajustes, por intermédio de cooperação com grupos que já estudam a propagação em ondas milimétricas ou da aquisição de equipamentos para a execução de uma campanha de medições;
- b) Aprimorar o código, eliminando redundâncias e promovendo a inclusão de novas ferramentas que gerem dados de forma gráfica sobre um ambiente, com o intuito de gerar mapas de cobertura e despolarização para as componentes do campo;
- c) Adequar e portar o modelo ao uso de novas técnicas de aquisição de ambientes de propagação, tais como nuvens de pontos geradas por *scanners laser*, por exemplo;
- d) Consolidar o modelo, via publicação de trabalhos em revistas especializadas e participação em congressos sobre o tema;
- e) Considerar a inclusão de novas classes de espalhadores tais como automóveis, placas de trânsito, hidrantes e outros espalhadores presentes nos ambientes externos;
- f) Utilizar o modelo em conjunto com técnicas de otimização e inteligência computacional, de forma a escolher valores ótimos para os diversos parâmetros eletromagnéticos do ambiente e assim obter melhores previsões.