

Capítulo I – Introdução

1.1

Introdução

O intenso desenvolvimento das tecnologias de comunicação pessoal sem fio nas últimas décadas tem criado novas potencialidades e formas de interação entre usuários. Para o futuro, além da comunicação rápida e de longa distância a um custo acessível que foi implementada em um primeiro momento, espera-se uma ampla variedade de serviços multimídia que superem os existentes na atualidade. A sociedade, de forma geral, possui alta expectativa sobre as qualidades do que virá a ser o novo padrão de comunicações móveis de quinta geração (5G). Para tentar materializar essa expectativa, novas tecnologias e técnicas têm sido propostas, podendo-se citar como importantes: o uso de ondas milimétricas, a utilização de transceptores com alta diretividade, sinais predominantemente do tipo de banda ultra larga (UWB) e algoritmos de rede “inteligentes”, capazes de rastrear os sinais emitidos nos lances de descida (*downlink*) e de subida (*uplink*), de forma a estabelecer conexões (*links*) mais apropriadas ao tipo de comunicação pretendido [1].

A utilização de frequências no limite inferior da faixa das ondas milimétricas (compreendido entre, aproximadamente, 30 GHz e 90 GHz) é uma solução natural ao problema de limitação de banda atual. De fato, as redes celulares de hoje usualmente operam entre 400 MHz e 4 GHz e presume-se, mesmo com estimativas conservadoras, que em poucos anos será necessária a alocação de novas faixas para atender ao crescimento do uso de sistemas móveis [1]. Estima-se que um crescimento explosivo na demanda ocorrerá com a evolução da comunicação entre máquinas (M2M) e aumento da utilização da “internet das coisas” em um futuro próximo.

A utilização dos enormes recursos de banda na faixa milimétrica possui, entretanto, uma série de desafios tecnológicos em diversas áreas. Sob o ponto de vista da propagação de ondas eletromagnéticas, sua modelagem sugere maiores dificuldades, em virtude do diminuto comprimento de onda nestas frequências em relação aos possíveis espalhadores no meio [2]. Modelos de propagação baseados

em simulações computacionais têm sido largamente utilizados para esse fim com ótimos resultados [1].

Nas faixas de frequências ultra alta (UHF) e micro-ondas, bons modelos de propagação em ambientes externos (*outdoor*) podem ser obtidos utilizando as técnicas determinísticas oriundas de métodos assintóticos, como a ótica geométrica e a teoria uniforme da difração [3-6], em ambientes representados unicamente por suas construções, que têm sido modeladas de variadas formas [7-9]. Na faixa de ondas milimétricas, pode-se constatar que a comunicação também se dá pela interação da onda com uma grande variedade de elementos presentes no ambiente [1], em virtude do pequeno comprimento de onda em relação a esses espalhadores. Assim é importante que seja considerada na modelagem nesta faixa uma gama maior de elementos no ambiente.

A análise do formalismo matemático que descreve os principais mecanismos de propagação presentes em ambientes urbanos indica que importantes mecanismos para a faixa de UHF, como reflexão e difração, experimentam efeitos diferenciados resultantes do aumento da frequência na faixa milimétrica [1]. Na reflexão, a relação de escala entre o comprimento de onda e as rugosidades das superfícies dos espalhadores podem causar um aumento na componente difusa em detrimento da especular [10]. Na difração, altas perdas são esperadas para os sinais resultantes deste mecanismo.

Esforços de pesquisa e desenvolvimento têm sido realizados com o objetivo de transpor os atuais desafios tecnológicos, não apenas para dispor de mais recursos em frequência, mas visando benefícios na eficiência espectral e no planejamento e dimensionamento da cobertura nessa faixa que, segundo vários autores, é a nova fronteira das comunicações móveis [1].

1.2

Motivação

Compreender os fatores que influenciam a propagação de ondas eletromagnéticas em um meio proporciona melhor caracterização do problema e, consequentemente, um eficiente modelo de predição de seu comportamento. No planejamento

de enlaces de comunicação do tipo ponto-a-ponto ou ponto-área, os modelos são usados para estimar a qualidade do sinal e sua intensidade na área ou local em que precisa estar presente.

O estudo determinístico da propagação de sinais do tipo de banda ultra larga em ambientes urbanos utilizando as tecnologias de ondas milimétricas e a formatação de feixes em ambos os transceptores, considerando o espalhamento e obstrução provocado por árvores, postes (iluminação, trânsito e distribuição de energia) e o espalhamento difuso em paredes, é um tema pouco estudado no mundo [1], portanto, é um estudo importante para a avaliação dos impactos e potencialidades deste novo estado da arte, que vem emergindo como possível solução a ser adotada em um futuro padrão de comunicações móveis (5G).

1.3

Objetivos da Pesquisa

Pretende-se com este estudo a proposição de um modelo de rádio propagação em ondas milimétricas de sinais de banda ultra larga em ambientes urbanos externos, considerando a interação dos sinais com as construções existentes no ambiente (espalhamento especular e difuso), assim como árvores e postes de iluminação, de trânsito e de distribuição de energia, utilizando técnicas e tecnologias que estão emergindo como prováveis padrões nos próximos sistemas de comunicação móveis, tais como:

- a) A utilização de antenas com capacidade de formatar o diagrama de radiação, o ganho e a direção de seus lóbulos principais apenas controlando sua excitação, sem a ação de elementos que alteram sua geometria ou posicionamento em relação a um referencial externo;
- b) A utilização da técnica de sondagem prévia do canal com a intenção de identificar os sinais mais fortes em ambos os lances (subida e descida), a fim de orientar os feixes de transmissão e de recepção de forma a causar uma fil-

tragem espacial das componentes de multipercursos provenientes das interações com o ambiente de propagação;

- c) Utilização de sinais do tipo banda ultra larga de até 1 GHz de largura de banda, que pode prover uma taxa de transferência de altíssima velocidade;
- d) A utilização de pequenas células de cobertura, tipicamente inferiores a 200 metros, com estações base de baixas potências, possivelmente alocadas nas ruas a baixas alturas (inferiores a 20 metros em relação ao solo).

Para tanto, foi implementado um código computacional em Matlab R12® para a análise das características de propagação na faixa de ondas milimétricas de sinais de banda ultra larga em alguns tipos de ambientes externos (*outdoor*) típicos de espaços urbanos densamente povoados por espalhadores, utilizando o método de traçado de raios. O código permite variadas possibilidades para a simulação pretendida, tais como:

- a) A utilização de ambientes onde a representação das edificações é feita a partir de prismas retos com a seção transversal poligonal convexa representando um quarteirão inteiro, o que acelera a execução do algoritmo computacional com baixas perdas na qualidade dos dados simulados [11, 12];
- b) A base de dados pode ser obtida a partir de mapas de distribuição predial, de onde é feito um pré-processamento com princípios de mineração de dados de forma a eliminar da base dados redundantes ou pouco representativos;
- c) Um modo de edição de ambientes, de onde é possível criar bases de dados sintéticas sobre as edificações ou ainda incluir quaisquer dos elementos espalhadores já descritos;
- d) Utilizar o método das imagens para ambientes 2.5D, que traça raios a partir das projeções no solo, desconsidera a altura dos prismas e que possui excelentes resultados em traçado de raios nos mais variados tipos de simulação de propagação em variados cenários [13-15];
- e) Considerar raios que podem sofrer até 47 interações com o ambiente, o que na prática é muito difícil de atingir, em virtude do tempo necessário para o cálculo. Neste estudo, foram avaliadas até a oitava ordem de interação;

- f) Implementar os mecanismos de reflexão, difração e espalhamento especular e difuso, considerando as características particulares de cada interação, tanto geométricas quanto as propriedades intrínsecas dos elementos do ambiente (constante dielétrica, condutividade e rugosidade);
- g) Utilizar o cálculo vetorial e fasorial do campo e suas componentes lineares ortogonais, possibilitando a determinação da resposta impulsiva do canal sobre polarizações verticais e horizontais e quaisquer outras oriundas da composição vetorial e temporal destas, como polarizações circulares;
- h) Verificar e quantificar a despolarização de uma componente arbitrária qualquer; ou seja, avaliar como um sinal emitido em uma determinada polarização atinge o receptor com sua componente de polarização ortogonal;
- i) Em simulações de canais em rotas preestabelecidas, implementar o conceito de combinação de feixes [1], verificando cada canal da rota em busca dos raios que produzem os sinais mais intensos, tanto no lance de subida quanto no de descida, e orientar os feixes dos transceptores para as direções de chegada (DOA) e de partida (DOD) dos respectivos raios encontrados;
- j) Implementar a formatação de feixes [1], utilizando antenas com diagrama de radiação diretivo com ganho e largura do feixe de meia potência (feixe principal) programáveis e resposta plana nas direções fora do feixe principal;
- k) Aceitar a configuração de qualquer intervalo de frequências dentro da faixa milimétrica e qualquer largura de banda. Esta faixa é então discretizada em intervalos uniformes em frequência que são configuráveis (tipicamente, em 2000 intervalos). Então, são calculados os valores da função de transferência $H(f)$ do canal em todas as frequências de amostragem e combinação de polarizações ortogonais, considerando as contribuições de todos os raios definidos entre a estação base e o terminal do usuário selecionados. De posse da função de transferência, pode-se encontrar o perfil de potência e retardo do canal correspondente, pela aplicação da transformada inversa de Fourier. Em seguida, são estimados os demais parâmetros de dispersão temporal e espacial, tais como: desvio de retardo RMS, retardo médio e ainda o perfil de potência recebida em função da distância entre os transceptores.

Em todos os canais e rotas simulados, foi considerada uma atmosfera uniforme e isotrópica, sendo a perda de propagação por ação de gases modelada segundo o anexo 2 da Recomendação ITU-R P.676-10 [16].

Foram utilizados dados de medições realizadas em ambientes reais, com o objetivo de verificar a aderência dos resultados simulados aos experimentais, com o intuito de ajuste, calibração e validação.

1.4

Contribuições deste Trabalho

Grande parte dos sistemas de comunicação operam na faixa de frequências abaixo de 4 GHz e a crescente demanda, tem motivado previsões de esgotamento de recursos necessários ao crescimento da oferta do serviço desejado na banda disponível [1]. A faixa de ondas milimétricas pode ser uma solução para este problema, contudo, possui características de propagação peculiares, o que sugere que novas abordagens devem ser adotadas nos futuros sistemas de comunicação, a fim de obter resultados práticos. Pelo exposto, é de grande relevância a caracterização desta nova faixa de frequências, pois há uma forte necessidade de avançar nesta nova fronteira.

Este trabalho se insere neste contexto de intenso esforço de caracterização desta faixa, para uma futura disponibilização de sistemas de comunicação da próxima geração (5G). Antigos paradigmas adotados nos sistemas passados (3G e 4G), como células de cobertura maiores, comunicação sem visada e a desconsideração dos pequenos espalhadores na modelagem, se mostram pouco eficazes na nova faixa [21]. É crescente a literatura sobre o tema, embora o alto custo dos equipamentos necessários para a pesquisa seja um fator limitante. Apesar do conhecimento limitado do canal de comunicações nesta faixa, a comunidade científica espera dispor de sistemas capazes de oferecer um desempenho substancialmente superior aos atuais, em termos de velocidade de comunicação e serviços. Neste contexto, várias técnicas e abordagens novas têm surgido e mostrado capacidade de materializar as expectativas de desempenho de um novo padrão de comunicações, que está sendo formado.

O presente trabalho contribui de forma original na medida em que utiliza as principais técnicas e abordagens que estão emergindo na literatura de forma conjunta e as integra na proposição de um modelo de propagação considerando os principais mecanismos e utilizando métodos assintóticos na análise dos campos eletromagnéticos.

Outra contribuição é a consideração de várias classes de elementos espalhadores de energia, que foram pouco utilizados em modelos nas faixas de UHF e micro-ondas, pelo seu baixo impacto na propagação [30], mas que podem ser de grande importância na faixa de ondas milimétricas. Adicionalmente, há um esforço de caracterização em banda ultra larga em canais com e sem visibilidade, em duas polarizações lineares ortogonais (vertical e horizontal), permitindo a avaliação dos efeitos da despolarização em ambientes exteriores complexos.

O estado da arte é empregado com base no traçado de raios e o método das imagens, com a utilização adicional de técnicas de aceleração. Nos próximos capítulos, este método é abordado em profundidade.

Espera-se que o presente trabalho seja uma contribuição à modelagem do canal em ondas milimétricas, acrescentando novas possíveis abordagens a modelos que não consideram muitas classes de espalhadores, que constituem a maioria dos trabalhos encontrados na literatura.

1.5

Estrutura do trabalho

Este trabalho é apresentado de forma a facilitar a compreensão dos tópicos necessários ao desenvolvimento do mesmo. Primeiramente, são abordados temas gerais sobre o problema. Nos capítulos seguintes, os temas relevantes serão apresentados de forma mais específica, para introduzir os conceitos gradativamente.

O Capítulo I, aborda a motivação deste trabalho e seus objetivos básicos e possíveis contribuições.

No Capítulo II, é apresentada uma breve revisão da literatura, que servirá de base e ponto de partida para o restante do trabalho. Serão descritas abordagens e peculiaridades da propagação em áreas urbanas na faixa de ondas milimétricas e os

principais desdobramentos teóricos e experimentais sobre sua caracterização. Também são tratados aspectos relativos à metodologia e definições utilizadas na abordagem do problema, assim como possíveis simplificações que tornem sua modelagem mais amigável. São discutidos e implementados métodos de aceleração na sua execução, que diminuem o custo computacional e proporcionam a composição de raios com uma quantidade maior de interações com o ambiente, no mesmo tempo de processamento e com os recursos computacionais disponíveis.

No Capítulo III, são descritas as formas utilizadas para representar o ambiente de propagação: aspectos, abordagens e arranjos computacionais utilizados para a composição da base de dados a ser processada para a obtenção da resposta impulsiva nos canais das rotas simuladas.

O Capítulo IV trata dos temas de polarização e propagação. São discutidos os procedimentos utilizados com base no método das imagens, suas características e aplicação e a forma como o algoritmo trata os mecanismos de propagação do raio direto, refletido e difratado, assim como o espalhamento especular e difuso. Descreve também o tratamento eletromagnético utilizado na análise de cada raio gerado e de suas interações com os elementos do ambiente. É tratada a forma de cálculo do campo elétrico e de suas componentes ortogonais, assim como do posterior processamento dos resultados para a obtenção da função de transferência do canal.

No capítulo V, são descritos os ambientes utilizados em campanhas de medições e para simulações no modelo, com o objetivo de ajuste, calibração e comparação de resultados. São descritas também as técnicas empregadas pelas equipes que realizaram as medições na faixa milimétrica. É descrita a modelagem do ambiente real, utilizando a mesma escala, posicionamento dos transceptores e construções e a distribuição geral dos espalhadores. Foi realizada uma breve pesquisa sobre a quantidade, o tipo e o posicionamento dos espalhadores, baseada em imagens dos ambientes de interesse.

No Capítulo VI, são relatados resultados de simulações em cenários urbanos típicos propostos para tal fim e a análise de sua conformidade com a literatura e trabalhos recentes. Serão utilizadas as métricas mais populares de caracterização de canais de banda larga, considerando os efeitos de despolarização, assim como impactos da vegetação sobre a propagação em canais externos.

Por fim, o Capítulo VII apresenta a conclusão sobre o trabalho, onde são sumarizados e analisados os resultados, baseados na recente literatura sobre propagação, e propõe futuros trabalhos.