

1 Introdução

O projeto de comunicação via rádio sem fio em ambientes interiores utiliza a propagação de ondas de rádio em ambientes repletos de espalhadores (paredes, objetos e pessoas). Assim, um projeto de enlace rádio requer receptores e transmissores que estejam localizados em posições adequadas que garantam uma eficiente cobertura do sinal. Para que este tipo de enlace seja realizado, é vantajoso que uma campanha de medidas seja feita no local. Entretanto, na maioria dos casos, este tipo de campanha requer equipamentos de alto custo financeiro, fato que pode tornar inviável a utilização deste procedimento. Uma alternativa para este tipo de dificuldade seria a utilização de métodos de predição. Existem vários métodos de predição e, entre eles, podemos listar os métodos empíricos, analíticos e numéricos.

Os métodos empíricos [1]-[5] possuem a vantagem de facilidade de uso e implementação. Entretanto, por serem provenientes de medidas realizadas em ambientes determinados, podem falhar ao serem aplicados em ambientes diferentes. Adicionalmente, estes métodos, de um modo geral, limitam-se à predição do nível de potência, esquecendo-se de analisar parâmetros de pequena escala do canal de rádio propagação [6].

Os modelos analíticos [2], [7] aplicam a teoria eletromagnética diretamente ao ambiente de interesse. Este método apresenta a desvantagem de possuir certa complexidade na aplicação das condições de contorno em ambientes com grandes dimensões.

Os métodos numéricos se aplicam a problemas que não podem ser resolvidos analiticamente. Um método numérico bastante utilizado para o cálculo de campos irradiados em ambientes interiores é o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) que consiste na substituição das derivadas temporais e espaciais por razões entre diferenças algébricas em um pequeno intervalo. Este método foi introduzido por Yee [8] em 1966 e mais tarde aprimorado por Taflove et al. [9]-[15]. Proporciona uma forma eficiente de resolver as equações de

Maxwell, pois as equações contínuas são substituídas por um sistema de equações de diferenças finitas, onde as componentes dos campos terão posições definidas em uma malha espaço-tempo. A plena utilização deste método apresenta limitações, pois se faz necessário o armazenamento de uma grande quantidade de dados para aplicação posterior. Por exemplo, é o que acontece quando se deseja determinar as características de irradiação em um ambiente interior [16] ou a análise de uma antena [17]-[21], implicando em um tempo de processamento considerável. Para reduzir estes problemas, o processamento paralelo é utilizado [22]-[24].

Outro método numérico bastante utilizado para a propagação em ambientes interiores é o traçado direto de raios [25] que encontra os percursos de propagação entre uma fonte e um receptor através da emissão de raios que atravessam o ambiente, sofrendo múltiplas transmissões, reflexões e difrações. Uma das desvantagens do método é o uso de um número discreto de raios, que pode proporcionar a perda de raios no receptor, devido a espaços vazios entre os mesmos [26]. Outra desvantagem do método é a sua dependência em relação a uma posição particular do receptor. Desta forma, os métodos não são diretamente aplicados a ambientes em que o receptor se move constantemente.

O método de traçado de feixes consiste na emissão de feixes, que representam um conjunto infinito de raios congruentes entre si, emitidos de um transmissor em direção a um determinado ambiente. Os feixes emitidos possuem representações diferentes dependendo do tipo de interação dos mesmos com o ambiente. Por exemplo, feixes transmitidos e refletidos possuem um vértice e uma base, como mostrados na Figura 1. Os feixes difratados possuem uma representação um pouco mais complexa que será mostrada com mais detalhe na seção 2.4.4.

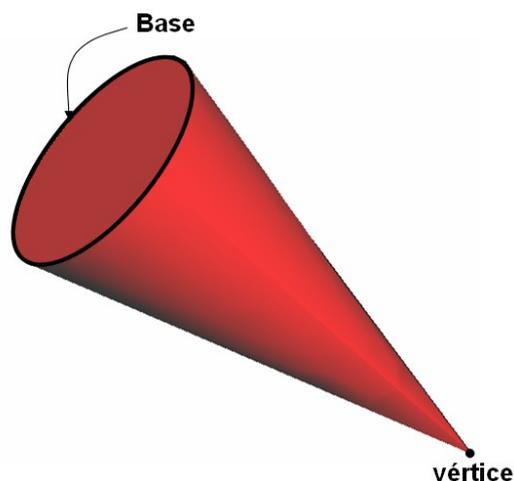


Figura 1 - Exemplo de feixe. Feixe cônico formado por um vértice e uma base circular.

Um feixe pode incidir total ou parcialmente sobre uma superfície que define o ambiente. Em ambos os casos, serão gerados um feixe transmitido e outro refletido pela superfície. Existe também a possibilidade do surgimento de um feixe difratado. Após a obtenção de todos os feixes que se propagam no ambiente, um processamento cujo término é caracterizado por algum critério de interrupção, verificam-se para um determinado ponto de recepção, quais feixes interceptam este ponto. Os raios contidos no interior de cada feixe que contém o ponto de recepção são traçados deste ponto em direção à posição do transmissor, através dos feixes antecessores aos feixes de recepção.

Neste método, os feixes são traçados em todo ambiente analisado independentemente da posição do receptor. A posição do receptor só é levada em conta quando traçamos feixes associados a algoritmos de aceleração [31], [32], que se utilizam dessa posição para determinar expressões matemáticas (relacionadas à distância e atenuação do sinal), capazes de indicar quais feixes efetivamente irão contribuir para obtenção do sinal recebido.

Muitos trabalhos, evitando as dificuldades de interseção de um feixe incidente com uma superfície (obstáculo) e a possível formação de feixes de reflexão e transmissão com bases dadas pela interseção do feixe incidente com a superfície, aproximaram cada feixe por um raio médio. Vian [55] utilizou feixes cônicos para predição de iluminação de objetos. Estes cones eram definidos ao longo de um eixo central que variava ao longo de um ângulo sólido em relação ao

transmissor, varrendo uma superfície esférica. No entanto, como cones não conseguem cobrir completamente uma superfície esférica, são obtidos feixes adjacentes com espaços vazios entre os mesmos, o que resulta na perda de raios no ponto de observação. Para se evitar estes espaços é necessária a sobreposição de feixes, fato que representa erros de contagem dupla de raios em pontos de observação contidos na sobreposição de feixes.

Durgin et al. [27] propuseram um método para reduzir estes erros na propagação de um sinal de rádio. Ao invés de se contar raios oriundos de feixes cônicos, o método leva em consideração todos os raios vizinhos. O campo total recebido pelo transmissor é a soma de várias frentes de onda multiplicadas por uma função peso, que leva em conta a distância em relação ao receptor. Este método melhora a precisão dos campos calculados, mas o mesmo é relativamente complexo de se realizar.

Um método simples para se evitar o problema de dupla contagem de raios na propagação de um sinal de rádio foi proposto por Yun et al. [28]. O método baseia-se no fato de que um raio no interior de um feixe, que vai do transmissor até o receptor é unicamente definido por uma sequência de superfícies atravessadas. Assim quando um raio é recebido, a sequência de superfícies é armazenada. Quando um novo raio for recebido, a sequência de superfícies obtidas será checada com as outras sequências existentes. Caso exista uma sequência idêntica, o novo raio recebido é considerado um raio duplicado, e não é levado em consideração.

Makino et al. [30] e Rajkumar et al. [68] utilizaram feixes poligonais para a predição de rádio propagação em ambientes interiores e exteriores. Estes feixes eram emitidos inicialmente de uma esfera, formada por um conjunto de polígonos convexos com quatro lados. No primeiro trabalho, os vértices dos feixes inicialmente emitidos eram dados pela posição do transmissor e a base dada por polígono triangular. No segundo trabalho, os vértices dos feixes inicialmente emitidos eram dados pela posição do transmissor e a base por um polígono convexo. Apesar da utilização de feixes poligonais evitarem os problemas de dupla contagem de raios, estes métodos continuavam levando em consideração, no momento da interseção de um feixe com os obstáculos, o raio médio do feixe para formação de feixes transmitidos e refletidos.

Fortune [46] descreveu um algoritmo para predição de rádio propagação em ambientes interiores, no qual os feixes poligonais com base triangular eram subdivididos em regiões convexas por planos que continham as arestas dos polígonos de oclusão. Os feixes eram traçados do transmissor em direção ao receptor ao longo de caminhos de transmissão e reflexão que não levavam em consideração a interseção do feixe com polígonos de obstrução.

Heckbert and Hanrahan [36] descreveram um algoritmo para iluminação no qual feixes poligonais são traçados recursivamente. Cada feixe que interceptava um polígono de obstrução gerava uma região de sombra, que era cortada do feixe original usando um algoritmo de interseção, capaz de fazer a interseção de polígonos não convexas. Os autores descrevem a construção de uma árvore de feixes para armazenar os feixes.

Funkhouser [31]-[32], [38], [42], [45], baseado no trabalho de Heckbert and Hanrahan, desenvolveu um método de traçado de feixes para modelagem de ambientes acústicos, que subdivide o ambiente analisado em um grupo de células, para que os feixes sejam traçados. Os feixes são traçados inicialmente com vértices na posição do transmissor e bases sobre as faces que constituem a célula que contém o transmissor. Quando um feixe incide sobre a face de uma célula o mesmo é subdividido em novos feixes, com base dada pela exata interseção do feixe com a face. O método incluía a obtenção de feixes difratados na aresta dos polígonos, mas não explicava a maneira pela qual se obtinha os feixes resultantes da interação dos mesmos com os obstáculos, explicando somente que estes feixes deveriam conter bases planas e convexas.

Bernadi et al. [29] utilizou feixes transmitidos e refletidos com bases triangulares para a predição de campos em ambientes interiores. O modelo desenvolvido incluía a representação do feixe de difração compreendido entre os cones de Keller que são definidos pela incidência de um feixe sobre uma aresta. Este feixe era subdividido uniformemente em feixes menores com base triangular, para se manter a convexidade das bases utilizadas no modelo.

De um modo geral, o método de traçado de feixes tem sido usado nas mais variadas aplicações citadas anteriormente, e em outros casos referentes à iluminação[33]-[36], determinação de visibilidade [37], [39] e na modelagem acústica de ambientes específicos [40], [41], [43], [44]. No entanto, a utilização deste método para a predição do comportamento do canal rádio sem fio em

ambientes interiores ainda é incipiente na literatura especializada, quando falamos de métodos que se utilizam da complexidade geométrica dos feixes, quando da interseção do mesmo sobre uma superfície de obstrução.

A complexidade geométrica dos feixes se torna ainda maior quando se considera feixes difratados, pois a incidência do mesmo sobre obstáculos gera feixes astigmáticos com mais de dois focos. Este fato torna o processo demorado computacionalmente, pois os focos de todos os feixes existentes entre os pontos de difração e de recepção devem ser obtidos e armazenados, sem contar o grau de dificuldade para a obtenção dos feixes resultantes da interação de feixes de difração astigmáticos com os obstáculos do ambiente.

É neste contexto que este trabalho se propõe a utilizar o método de traçado de feixes em ambientes tridimensionais para caracterização do canal de propagação banda ultralarga (*ultra-wideband*, UWB) em alguns tipos de ambientes interiores. O método proposto baseia-se em outros anteriormente utilizados para modelagem em ambientes acústicos e iluminação de ambientes, que se utilizam da exata representação de um feixe tridimensional, sem nenhuma aproximação no processamento das interações entre feixes e obstáculos. Este método também utiliza algoritmos próprios para as obtenções de feixes de transmissão, reflexão e difração a partir de feixes incidentes sobre as estruturas existentes no ambiente.

Esta tese propõe uma representação própria dos feixes de difração, para evitar cálculos complexos relacionados às interações destes feixes com o ambiente, com a consequente diminuição de tempo computacional. Os detalhes da representação usada para feixes de difração são explicados nas subseções 2.4.4 a 2.4.9.

O método desenvolvido foi usado para a obtenção dos parâmetros de dispersão temporal do canal em pequena escala e a análise da perda de propagação, visando futuras aplicações sem fio para altas taxas de transmissão. Entre os exemplos destas aplicações, encontram-se WPANs (*Wireless Personal Area Networks*), multimídia, conexão remota entre equipamentos, etc. Os resultados obtidos serão comparados com medidas realizadas [48], para validação do método.

1.1 Banda Ultralarga

A comunicação em Banda Ultralarga (UWB) refere-se à transmissão de sinais que possuem espectro em frequência consideravelmente largo, sendo representados no domínio do tempo por pulsos de pequena duração.

Uma definição apropriada para largura de banda de sinais UWB é baseada na fração

$$B = 2 \frac{f_f - f_i}{f_f + f_i}, \quad (1.1)$$

onde f_i e f_f são as frequências inicial e final do espectro do sinal cujas densidades de potência diferem de 10 dB ou menos do valor de pico, respectivamente.

Em fevereiro de 2002, a FCC (*Federal Communications Commission*) definiu como UWB um sinal que possui largura de banda fracionária maior que 0,2 ou uma largura de banda ($f_f - f_i$) maior que 500 MHz [49]. Outros, como a DARPA (*The Defense Advanced Research Project Agency*), consideram o sinal UWB como aquele que possui largura de banda fracionária maior que 0,25, com valores de f_i e f_f medidos no ponto de 3 dB do espectro [50].

O estudo sobre sistemas que transmitem sinais em banda ultralarga é um tópico emergente no campo das comunicações, pois somente em fevereiro de 2001 o FCC permitiu a transmissão de sinais UWB em espectro regulamentado, caso certas condições de potência fossem satisfeitas.

O estudo para a implantação do sistema UWB pode ser dividido em duas vertentes, uma no domínio do tempo e outra no domínio da frequência.

No domínio do tempo, o sinal transmitido consiste de pulsos de pequena duração (da ordem de nanossegundos) que ocupam uma única banda. Os bits de informação são modulados usando estes pulsos estreitos com período de repetição maior que o tempo de espalhamento de retardo RMS do canal (*delay spread*). Nestes sistemas, a informação pode ser modulada por diversas técnicas de

modulação como, por exemplo, PPM (*Pulse Position Modulation*) aliada ao esquema de saltos no tempo para suportar múltiplos usuários [51].

No domínio da frequência, o sinal é espalhado em múltiplas bandas, cada uma possuindo largura suficiente para ser considerada UWB. Na literatura, o projeto destes sistemas no domínio da frequência é baseado em OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), onde o canal é subdividido em um determinado número de subcanais que possuem subportadoras ortogonais, o que permite a transmissão a diferentes taxas em cada subportadora [52].

Apesar da definição de alguns tipos de sistemas UWB no domínio do tempo e frequência disponíveis na literatura, ainda se faz necessária uma extensa caracterização do canal quanto aos seus parâmetros de dispersão temporal em vários tipos de ambientes interiores e exteriores. Deve-se observar que o grande número de publicações sobre transmissão de sinais banda larga ainda é insuficiente, pois oferecem parâmetros de dispersão do canal com resolução temporal limitada.

1.2 Objetivos da Tese

Esta tese tem por objetivo a apresentação de modelo de propagação desenvolvido e implementado computacionalmente para a análise das características de propagação do canal UWB em diversos tipos de ambientes interiores através do método de traçado de feixes em três dimensões.

A descrição do modelo inclui a representação de feixes transmitidos e refletidos em ambientes interiores, assim como a representação de feixes difratados em arestas perpendiculares a planos paralelos que contém o teto e solo do ambiente, respectivamente.

As informações resultantes do traçado de feixes serão utilizadas para auxiliar na determinação das características do campo recebido em pontos de observação de interesse, utilizando a ótica geométrica [53] e a teoria uniforme da difração [54], [82]. Após a determinação de todos os pares (E_n, τ_n) de amplitude e retardo devidos às componentes resultantes de múltiplas transmissões, reflexões

e difrações em cada ponto de observação selecionado, obtém-se a função de transferência $H(f)$ do canal UWB para cada polarização (horizontal ou vertical), por intermédio da equação:

$$H(f) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{E_n(f)}{E_{\max}} \right] e^{-j2\pi f \tau_n(f)}, \quad (1.2)$$

onde f representa a frequência do sinal, E_n / E_{\max} representa a amplitude normalizada do sinal, N indica o número de componentes e τ_n representando o retardo de cada componente de multipercurso dado por:

$$\tau_n(f) = \frac{d}{c} + \sum_{m=1}^M \frac{\varphi_m}{2\pi f} \quad (1.3)$$

onde d representa a distância percorrida pelo multipercurso, c a velocidade da luz, φ a fase introduzida pelos coeficientes de transmissão, reflexão [69] e difração [73] em cada interação m do multipercurso com os obstáculos do ambiente.

Baseados na equação (1.2), os resultados dos cálculos são comparados com os de uma campanha de medidas das características de propagação do canal UWB. Isto inclui a obtenção e comparação com os dados medidos referentes a:

- a) parâmetros de dispersão do canal UWB de pequena escala (retardo médio, espalhamento de retardo RMS e banda de coerência) de três ambientes interiores;
- b) variação da potência recebida com a distância em ambientes interiores;

1.3 Composição da Tese

Esta tese é composta de sete capítulos. Os assuntos referentes a cada capítulo são os seguintes:

Capítulo 1: introdução ao trabalho proposto, sua motivação e objetivos, assim como uma revisão da literatura específica;

Capítulo 2: apresenta-se o método de traçado de feixes em três dimensões assim como o algoritmo utilizado para sua implementação;

Capítulo 3: apresenta-se a caracterização do canal UWB;

Capítulo 4: apresenta-se a técnica de sondagem do canal UWB;

Capítulo 5: apresentam-se os procedimentos para a obtenção dos parâmetros de dispersão do canal, obtidos através dos cálculos e medidas realizadas;

Capítulo 6: apresentam-se os resultados do modelo e dos experimentos, assim como, as comparações e investigações pertinentes;

Capítulo 7: conclusões do trabalho.