

CAPÍTULO 1

Principais Características do Canal de Rádio Propagação

Indoor

Nos últimos anos, um grande interesse foi demonstrado pelos sistemas móveis celulares e muitos trabalhos teóricos e experimentais foram produzidos. Infelizmente, a maioria desses resultados não são aplicáveis aos sistemas de rádio *indoor* pois esse opera em um ambiente que possui características diferentes do sistema de rádio *outdoor* [1].

O aumento na demanda dos sistemas celulares e serviços móveis em redes locais sem fio (WLAN), que incluem aplicações em diferentes setores (negócios, prédios públicos e de escritórios, prédios históricos, etc.) [2], intensificou o interesse pela predição de propagação em ambiente *indoor*. Portanto, um modelo para predizer a cobertura dentro de prédios, tal que seja possível escolher uma ótima localização das estações bases, de forma a maximizar a capacidade e minimizar a interferência co-canal foi pesquisado nesse trabalho.

Tais modelos de predição tornam-se muito úteis para operadoras de telefonia móvel, por exemplo, em grandes cidades. Onde muitos assinantes são pedestres, exigindo que seja fornecida uma boa cobertura dentro de prédios, *shoppings centers*, estações de trem, etc. Somado a tudo isso, está a alta densidade de assinantes dentro de cidades como, por exemplo, Hong Kong (fazendo com que os recursos do espectro de rádio sejam muito escassos) e, portanto, pode ser deduzido que a margem de lucro das operadoras de telefonia

móvel é altamente dependente da maximização da capacidade e consequentemente do desempenho da precisão da predição de propagação.

A predição de propagação dentro de prédios torna-se mais difícil, uma vez que surgem vários fenômenos de propagação que dependem da estrutura específica do prédio, por exemplo, a propagação ao longo de corredores geralmente tem menos perda do que no espaço livre, enquanto sinais que se propagam através de paredes e pisos têm mais perdas que no espaço livre. Janelas também provêm percurso de propagação entre andares, devido ao mecanismo da difração pelas janelas, o que complica ainda mais a predição de propagação[3]. Além disso existem fenômenos, tais como, o espalhamento provocado por paredes, tetos, pisos e mobílias, que produzem um canal com grande multipercurso, onde a perda de percurso é muito diferente daquela do contexto *outdoor* [2].

Dentre todos os fenômenos que ocorrem na propagação *indoor*, alguns devem ser cuidadosamente estudados devido a sua importância, são eles:

1. potência média – intensidade média do sinal no espaço através de alguns comprimentos de onda;
2. desvanecimento lento e rápido;
3. multipercurso;
4. atraso de espalhamento no tempo – o espalhamento no tempo do transmissor ao receptor móvel;
5. perda de Penetração.

1.1 - Potência Média do Sinal

Todo receptor móvel, seja um telefone celular ou um computador de uma WLAN, necessita receber uma potência mínima da antena transmissora para que consiga trabalhar eficientemente. Num projeto, tanto de uma picocélula como de uma WLAN, é de fundamental importância que todos os pontos do edifício estejam recebendo, pelo menos, essa potência mínima. As áreas que não são atendidas por essa potência mínima são conhecidas como “área de sombra” .

A potência do sinal de RF está sujeita à variações temporal e espacial. As variações temporais são devido ao movimento de pessoas, elevadores, portas, etc. Para tanto, os sistemas devem ser projetados com uma margem de potência suficiente para acomodar essas variações.

A variação espacial na potência do sinal de RF tem componentes de pequena escala e de larga escala. A componente de larga escala é resultante da perda de propagação ser dependente da distância e da atenuação devido a grandes obstáculos (isto é, perda de sombreamento) tais como paredes, portas do elevador, pisos, tetos, mobília grande, etc. Essas variações de larga escala são observáveis através de grandes distâncias (isto é, muitos metros), e são tipicamente modeladas como variáveis aleatórias log-normal para ambientes *outdoor*. A componente de pequena escala é resultante das interferências construtivas e destrutivas da propagação de rádio através dos múltiplos percursos (isto é, multipercurso) que chegam no receptor com diferentes atrasos de propagação, potência e fase. Como resultado dessa interferência, a potência de RF pode variar desde alguns dB's acima até dezenas de dB's abaixo da potência média local para pontos distantes apenas de algumas frações de comprimento de onda. Essas variações de pequena escala são usualmente modeladas como variáveis aleatórias com funções densidades de probabilidade (FDP) de Rayleigh e Rice para propagação obstruída (OBS) e em linha de visada (LOS), respectivamente.

A potência do sinal, medida em experiências com receptores portáteis, apresentou flutuações rápidas de sinal (desvanecimento rápido) devido à componente de pequena escala na distribuição espacial da potência de RF e flutuações lentas (desvanecimento lento) devido à componente de grande escala. Quando se estuda as variações espaciais através de pequenas distâncias (isto é, um comprimento de onda), a componente de grande escala é considerada constante. Reciprocamente, quando estuda-se grandes áreas de cobertura (isto é, muitos comprimentos de onda), a componente de pequena escala está longe da média do sinal sobre todo o espaço. Em outras palavras, a potência média do sinal local é obtida pela média de um grande número de medidas individuais de RF realizadas nas vizinhanças do local.

As variações de pequena escala são extremamente difíceis de serem preditas, pois requerem um conhecimento exato do ângulo de fase de cada componente de multipercurso. Felizmente, desvanecimento de pequena escala pode ser bem caracterizado pela média estatística. Consequentemente, é interessante predizer somente a potência média local. Assim, a caracterização da precisão de um modelo de propagação é baseado em medidas que estimem a potência média do sinal local. A diferença entre intensidade do sinal médio local medido e seu valor correspondente predito é definido como erro de predição [4].

1.2 - Desvanecimento

Baseado em estudos anteriores sobre o desvanecimento do sinal, o mesmo pode ser didaticamente separado em duas partes: desvanecimento lento $m(t)$ e o desvanecimento rápido $r_o(t)$.

1.2.1 – Desvanecimento Lento

A variação no nível da média local é referida como desvanecimento lento, que é a média ou envoltória do sinal desvanecido recebido. A média local pode ser diferente em diferentes localizações para a mesma distância transmissor - receptor. Essa diferença é, principalmente, causada por variações na topografia *indoor* ao longo do percurso de propagação. A variação lenta da média local p é, normalmente, aproximada por uma pdf log-normal

$$PDF(p) = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot p} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(p) - m_d)^2}{2 \cdot s^2}\right) \quad (1.1)$$

onde $s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ln(p_i) - m_d)^2$ e $m_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(p_i)$ são a variância logarítmica e a potência média local do sinal recebido, respectivamente.

O sinal médio local medido pode fornecer uma indicação da severidade do desvanecimento lento, que um sistema de comunicação *indoor* deve compensar com o controle de potência ou técnica de diversidade de percurso. O desvanecimento lento pode ser atenuado com o uso de antenas direcionais

1.2.2 – Desvanecimento Rápido

O desvanecimento rápido é principalmente causado por reflexões, provocando o multipercurso, de uma onda transmitida através de espalhadores tais como casas, edifícios, e outras estruturas construídas pelo homem, ou por obstáculos naturais como florestas que cercam uma unidade móvel. Não é causado por uma obstrução natural como uma montanha ou colina localizada entre o transmissor e o receptor [5]. No caso do ambiente *indoor*, o desvanecimento rápido é causado por reflexões, difrações e refrações em móveis, pisos, paredes e tetos.

A variação rápida no nível de sinal recebido r em torno da média p para um percurso direto (LOS), mais os percursos devido ao espalhamento, podem ser aproximadas por uma distribuição de Rice, onde a função distribuição de probabilidade (FDP) é dada por

$$PDF(r/p) = \frac{r}{p_a} \cdot \exp\left(-\frac{r^2 + s^2}{2 \cdot p_a}\right) \cdot I_0\left(\frac{r \cdot s}{p_a}\right) \quad (0 \leq r < \infty, s \geq 0) \quad (1.2)$$

onde

$$R_d = \frac{s^2}{2 \cdot p_a} \quad (1.3)$$
$$p = (R_d + 1) \cdot p_a$$

e I_0 é a função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem zero, s é o valor de pico do sinal de percurso de linha de visada (ou sinal de percurso refletido especularmente em um canal obstruído), p_a é a potência média do sinal com percurso espalhado, e R_d é chamado de

fator de Rice, que é definido como a razão da potência do sinal de percurso em linha de visada (ou percurso especularmente refletido) e os percursos devido a espalhadores.

Na ausência de sinal em linha de visada ou percurso especularmente refletido, o nível de sinal recebido pelos percursos com espalhamento pode ser aproximado por uma distribuição de Rayleigh, como segue [6]:

$$PDF(r) = \frac{r}{p_a} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2 \cdot p_a}\right). \quad (1.4)$$

1.3– Multipercurso

A propagação de multipercurso é devido à reflexão, difração e espalhamento do ondas de rádio causadas por obstruções ao longo do percurso de transmissão. A magnitude desses efeitos depende do tipo e área total de obstrução. Esses sinais espúrios percorrem um percurso maior que aqueles do sinal direto. A associação das diferentes magnitude e fase também variam de acordo com o comprimento do percurso[7].

1.4 - Atraso de Espalhamento no Tempo

Devido ao meio dispersivo no tempo, o atraso típico da envoltória $e(t)$ de uma resposta ao impulso ocorre como mostrado na Figura 1.1. O atraso médio no tempo T_d e o atraso de espalhamento Δ podem ser calculados como

$$T_d = \int_0^{\infty} t \cdot e(t) dt \tag{1.5}$$

e

$$^2 = \int_0^{\infty} t^2 \cdot e(t) dt - T_d^2 \tag{1.6}$$

respectivamente, onde $e(t)$ é o sinal impulso recebido, resultante de um sinal impulso $s_0(t) = a_0 \cdot \delta(t)$.

$$e(t) = \left[a_0 \sum_{i=1}^N a_i \cdot (t - T_i) \right] e^{-j \cdot t} = E(t) e^{j \cdot T} \tag{1.7}$$

onde T é o atraso no tempo, a_i é o coeficiente de reflexão do i -ésimo percurso, e $\delta(t)$ é a função impulso, como mostrado na Figura 1.1. Os dados de atraso de espalhamento médio, fornecidos pela Tabela 1.1, são listados como exemplo.

Tabela 1.1 - Exemplos de atraso de espalhamento no tempo para diversos ambientes.

Tipo de ambiente	Atraso de espalhamento (Δ)
Dentro de edifícios	< 0,1 μ s
Área aberta	< 0,2 μ s
Área suburbana	0,5 μ s
Área urbana	3 μ s

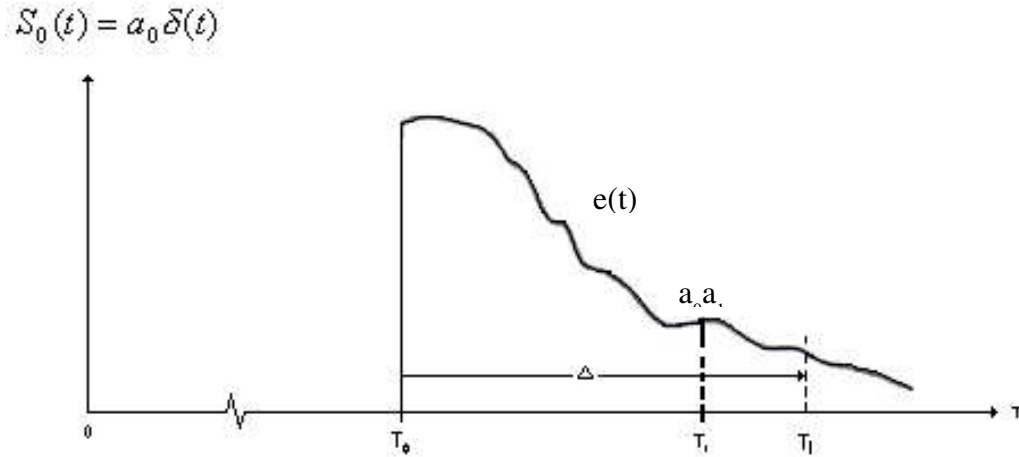
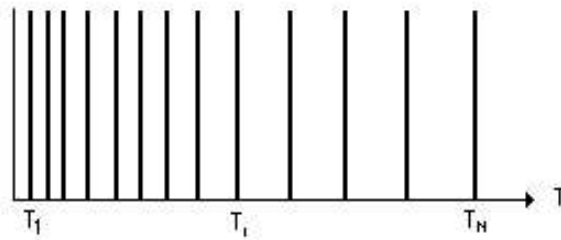


Figura 1.1 - Atraso de Espalhamento[5].

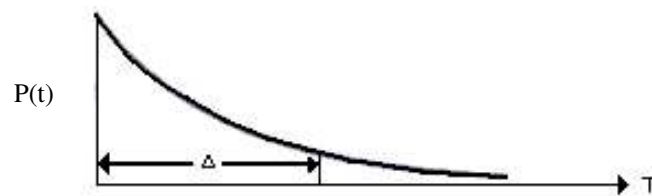
Os valores previstos são inalterados para qualquer frequência de operação acima de 30 MHz, porque acima dessa frequência os comprimentos de onda são sempre muito menores que o tamanho das estruturas construídas pelo homem. Todas as estruturas arquitetônicas podem ser tratadas, portanto, como refletores para qualquer frequência de operação acima dessa frequência. Um modelo do atraso de espalhamento pode ser expresso como

$$p(T_i) = \frac{1}{\exp\left(-\frac{T_i}{T_i}\right)} \quad (1.8)$$

onde T_i é um atraso de tempo. Esse modelo é assumido para N igual a amplitude das ondas refletidas, a maioria dessas ondas chegando sem atraso. Porém algumas chegam depois, como mostrado na Figura 1.2A. A distribuição do atraso de espalhamento $p(T_i)$ é mostrada na Figura 1.2B [5].



(A) A maioria chega próximo de T_1 .



(B) Atraso de Espalhamento $p(T_i)$.

Figura 1.2 - A Distribuição do atraso de espalhamento[5].

1.5 - Perda de Penetração

Para a caracterização do canal de propagação *indoor* faz-se necessário conhecer a perda de penetração através de paredes, pisos, tetos e outras obstruções. Embora o conhecimento qualitativo da perda de penetração seja função dos tipos de materiais de construção, frequência de operação, direção de incidência e polarização, existem muitos dados medidos para quantificar e validar a perda de penetração *indoor*[8].

Em um trabalho realizado por Thomas Schwengler e Mike Gilbert [9] na frequência de 5,8 GHz, uma antena transmissora foi posicionada a 250 m da frente de uma casa. Várias medições foram realizadas dentro da casa. A perda média nas janelas da casa (em linha de visada com a antena transmissora) foi de 3,3 dB, com uma parede entre as antenas

transmissora e receptora a perda foi de 13,2 dB e nos compartimentos com mais de um parede separando as antenas, a perda foi de 16,2 dB. Essas perdas tendem a aumentar com o número de obstáculos entre as antenas e com o aumento da frequência.

A polarização, também, é uma característica que influencia na perda de penetração. Alguns trabalhos apresentam a polarização circular como aquela que apresenta menor perda. Um trabalho desenvolvido por Cuiñas e Sánchez [10] apresentou resultados de medições realizadas com as polarizações vertical e horizontal para materiais, tais como: vidro, parede de tijolo, portas de madeira, **chipwood*** e **plasterwood***. As Figuras 1.3 e 1.4 mostram o coeficiente médio de transmissão (de potência) em função da frequência para as polarizações vertical e horizontal respectivamente.

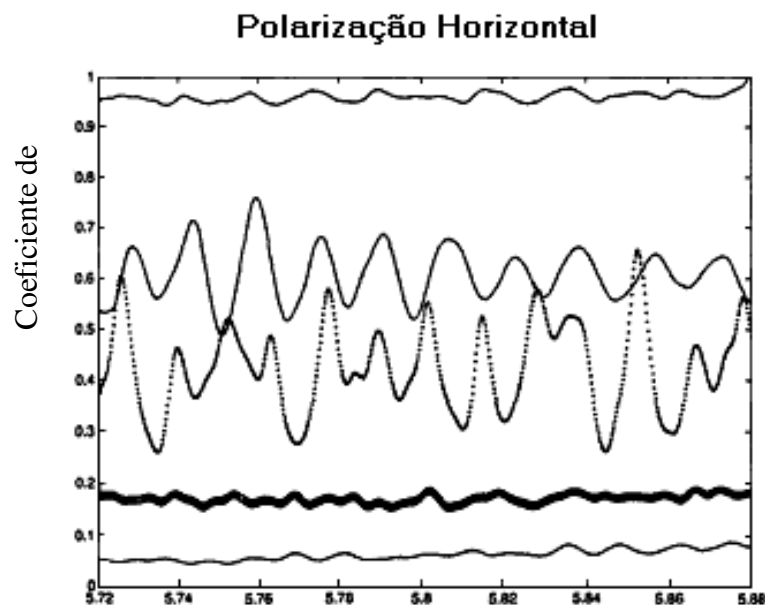


Figura 1.3 - Coeficientes de transmissão com polarização horizontal , de cima para baixo:
plasterboard, chipwood, vidro, portas e parede de tijolo [10].

* ainda não encontrei uma boa tradução para essas palavras.

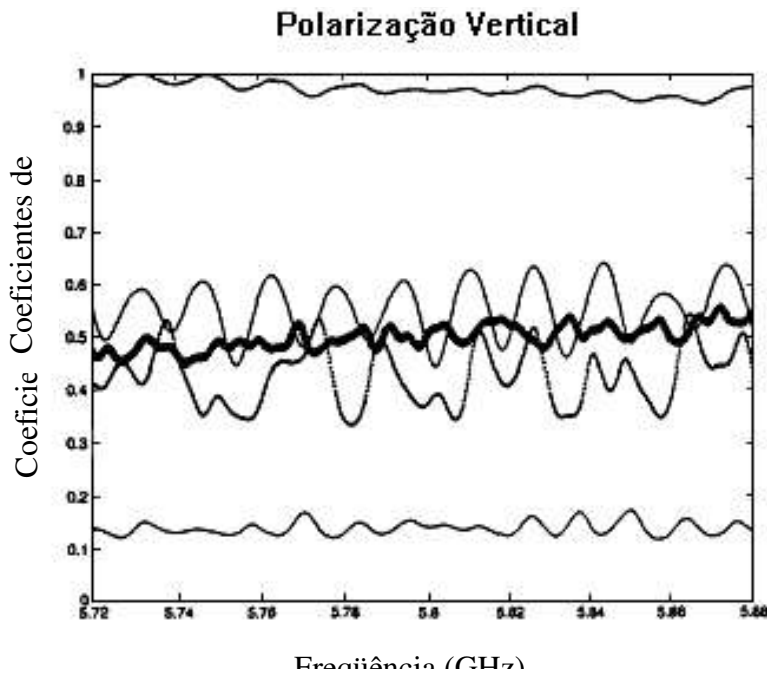


Figura 1.4 - Coeficientes de transmissão com polarização vertical , de cima para baixo: plasterboard, chipwood, portas, vidro e parede de tijolo [10].

Como pôde ser observado nas Figuras acima, o coeficiente de transmissão da chipwood e do vidro apresentam uma grande variação com a frequência. Comparando as Figuras 1.3 e 1.4, percebe-se que os coeficientes de transmissão do vidro, do plasterwood e do chipwood não são dependentes da polarização, porém, materiais com a estrutura orientada, como a parede de tijolo e as portas, exibem um comportamento anisotrópico. Seria interessante se o comportamento anisotrópico desses materiais fosse considerado nos *software* de planejamento para obter maior precisão nas simulações da propagação em canais de rádio.

A perda de penetração, entretanto, pode ser uma característica muito positiva quando se pensa em reuso de frequência. A comunicação em altas frequências, ondas milimétricas, apresenta como vantagem a grande capacidade de transportar informações (comparada à faixa de UHF já muito utilizada) e a possibilidade de reuso de frequência entre salas vizinhas, visto que em altas frequências as ondas sofrem muito mais atenuação ao passar de uma parede a outra [11]. Alguns materiais de construção com blindagem eletromagnética já estão sendo estudados. Dentre eles, destaca-se o BMDM (*building material to depress multipath*), desenvolvido por uma empresa japonesa, capaz de absorver ondas de rádio de 1,5 GHz a 20 GHz [12]. A combinação, portanto, desses materiais absorventes com a característica de perda de penetração das ondas, torna possível que salas vizinhas sejam capazes de utilizar a mesma frequência, aumentando muito a capacidade do sistema.

Devido a todas características do canal de rádio propagação *indoor*, estudadas nesses capítulo, existe uma grande dificuldade na predição de propagação nesse ambiente. Muitos modelos já foram propostos mas na sua maioria esses modelos apresentam como problema, ou a baixa precisão na sua predição ou apresentam um modelamento que necessita de uma grande capacidade de processamento computacional (e, portanto, muito tempo de processamento). Alguns desses modelos serão estudados no capítulo seguinte.