

2

Canal Espaço-Temporal

Este capítulo descreve as propriedades físicas do canal de comunicação *wireless* a serem modeladas, e se subdivide em duas partes. Na primeira, serão abordadas as características do sinal propagante em um ambiente móvel, seus parâmetros e algumas estatísticas necessárias para a análise Espaço-Temporal. Já a segunda parte, resume os principais modelos Espaço-Temporais já desenvolvidos.

2.1

Ambiente e Parâmetros do Sinal

Nos sistemas sem fio, o sinal transmitido em um canal interage com o ambiente de forma complexa. Fenômenos como a reflexão em grandes objetos, o sombreamento e o espalhamento estão sempre presentes. O resultado de interações tão complexas é a presença de várias componentes de um mesmo sinal no receptor, chamados de multipercursos. Outra propriedade dos canais *wireless* é a presença de um incremento Doppler, causado pelo movimento do receptor, do transmissor, e/ou de qualquer outro objeto no ambiente.

Uma ilustração simples de um ambiente pode ser observada na figura 2.1. Cada componente de sinal está submetido a um diferente micro-ambiente de propagação que irá determinar: a amplitude $A_{l,k}$, a fase da portadora $\varphi_{l,k}$, o retardo $\tau_{l,k}$, o ângulo de chegada $\theta_{l,k}$ e o incremento Doppler f_D . Tudo isto para cada l -ésimo componente de sinal de cada k -ésimo móvel. Em geral, cada um destes parâmetros do sinal será variante no tempo [35, 28, 21].

Os clássicos modelos iniciais, desenvolvidos para sistemas de transmissão de faixa estreita, provêm informação sobre a distribuição do nível de potência e incrementos Doppler do sinal recebido. Estes modelos têm sua origem nos primórdios da tecnologia celular na qual técnicas de modulação digital de faixa larga não estavam disponíveis comercialmente.

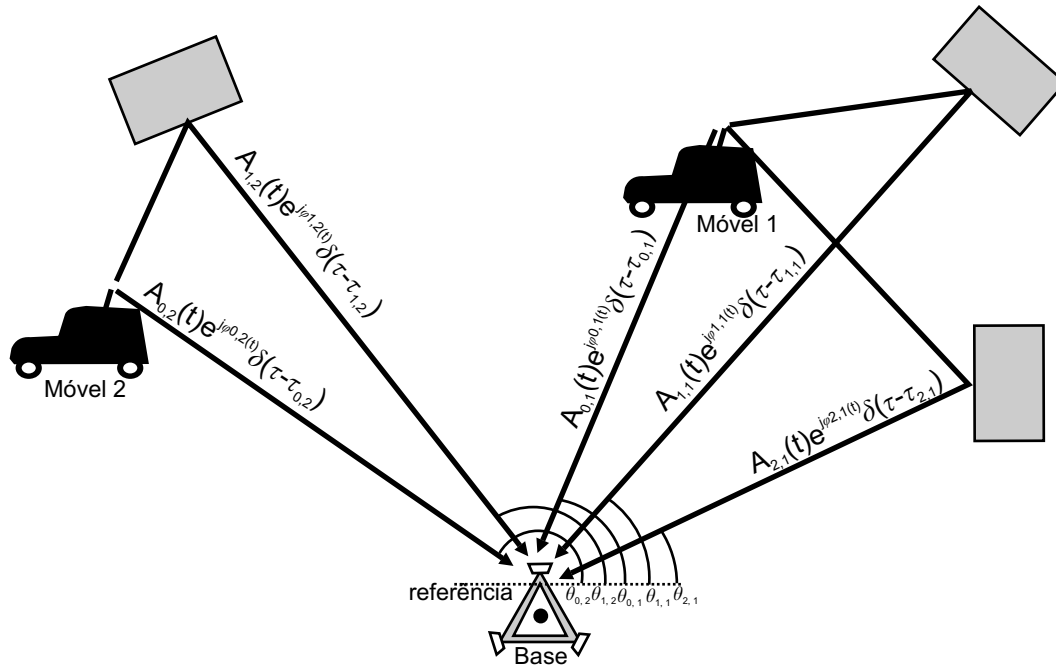


Figura 2.1: A Propagação por Multipercursos

Na medida em que os sistemas celulares se tornam mais complexos, modelos mais precisos se fazem necessários. Representando o canal de rádio frequência (RF) como um canal variante no tempo e utilizando a representação banda-básica de envelope complexo, temos a resposta ao impulso do Móvel 1, figura 2.1, que tem sido representada classicamente por [22]:

$$h_1(t; \tau) = \sum_{l=0}^{L(t)-1} A_{l,1}(t) e^{j\varphi_{l,1}(t)} \delta(\tau - \tau_{l,1}(t)) \quad (2-1)$$

onde $L(t)$ é o número de componentes de multipercurso presentes no instante de tempo t . A amplitude $A_{l,k}$ das componentes de multipercurso é geralmente representada por uma distribuição de Rayleigh, enquanto o incremento de fase $\varphi_{l,k}$ é uniformemente distribuído.

A natureza variante no tempo do Canal Rádio Móvel é causada pela movimentação dos objetos no ambiente. Uma medida dessa variação do canal é dada pelo Espectro Doppler de potência, introduzido por Gans em 1972 [3]. O Espectro Doppler de Potência provê uma informação estatística da variação em frequência de um tom recebido por um móvel se deslocando com velocidade v . Baseado no modelo desenvolvido por Clark em 1968, Gans assumiu que o sinal recebido na estação móvel veio de todas as direções e foi uniformemente distribuído. Assumindo isto, e considerando como antena um monopolo vertical do tamanho de um quarto do comprimento de onda,

tem-se que o espectro Doppler é dado por [22]:

$$S(f) = \begin{cases} \frac{1.5}{\pi f_m \sqrt{1 - \left(\frac{f-f_c}{f_m}\right)^2}} & \text{se } |f - f_c| < f_m \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases} \quad (2-2)$$

onde f_m é o incremento Doppler Máximo, dado por v/λ , no qual λ é o comprimento de onda do sinal transmitido na frequência f_c .

O modelo de canal expresso pela equação 2-1 não considera os ângulos de chegada de cada componente de multipercurso mostrado na figura 2.1. Fazendo-se um equivalente de faixa estreita do sinal, o ângulo de chegada do sinal pode ser incluído, utilizando:

$$h(t; \tau, \theta) = \sum_{l=0}^{L(t)-1} A_{l,1}(t) e^{j\varphi_{l,1}(t)} \delta(\tau_{l,1}(t), \theta_{l,1}(t)) \quad (2-3)$$

A resposta ao impulso espacial dada pela equação 2-3 é um somatório de vários componentes de multipercurso, cada qual tendo sua amplitude, sua fase e seu ângulo de chegada. A distribuição desses parâmetros depende do tipo de ambiente.

2.1.1 Espalhamento Temporal

O efeito do espalhamento temporal do canal pode ser quantizado pelo espalhamento de retardos σ_τ , também conhecido como retardo *rms*, que nada mais é que o desvio padrão dos retardos do espectro de potência do canal dado por $P_h(\tau)$ e pelo seu valor médio $\langle \tau \rangle$:

$$\langle \tau \rangle = \frac{\int \tau P_h(\tau) d\tau}{\int P_h(\tau) d\tau} \quad (2-4)$$

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{\int (\tau - \langle \tau \rangle)^2 P_h(\tau) d\tau}{\int P_h(\tau) d\tau}} \quad (2-5)$$

Tendo-se a resposta ao impulso discreta do canal, dada por 2-1, é possível simplificar a equação 2-5 [22]. Para isso considera-se $\alpha_k(\tau)$ a magnitude equivalente de todos os raios que chegam no mesmo instante τ , o conjunto de todos os equivalente $\alpha_k(\tau)$ para o usuário k formam um perfil de retardo (*pdp*) como mostrado na figura 2.2.

$$\langle \tau \rangle = \frac{\sum_{l=0}^{L-1} \tau(\alpha_k(\tau))^2}{\sum_{l=0}^{L-1} (\alpha_k(\tau))^2} \quad (2-6)$$

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{\sum_{l=0}^{L-1} (\tau - \langle \tau \rangle)^2 (\alpha_k(\tau))^2}{\sum_{l=0}^{L-1} (\alpha_k(\tau))^2}} \quad (2-7)$$

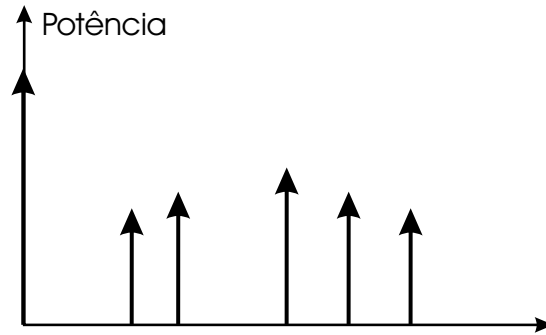


Figura 2.2: Perfil de Potência de Retardos Equivalente

2.1.2 Espalhamento Angular

A raiz média quadrática (*rms*) do Espalhamento Angular é a medida da dispersividade espacial do canal [35]. Para um sinal emitido por uma única fonte, e propagado em um ambiente com múltiplos percursos, o Espalhamento Angular é definido como:

$$\sigma_\theta = \sqrt{\mathbb{E}[\theta^2] - \mathbb{E}[\theta]^2} \quad (2-8)$$

Como tipicamente não se tem a Função Densidade de Probabilidade dos ângulos de chegada, frequentemente aproxima-se o espalhamento angular por:

$$\sigma_\theta = \sqrt{\langle \theta^2 \rangle - \langle \theta \rangle^2} \quad (2-9)$$

onde

$$\langle \theta \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} \theta P_r(\theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} P_r(\theta) d\theta} \quad (2-10)$$

$$\langle \theta^2 \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} \theta^2 P_r(\theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} P_r(\theta) d\theta} \quad (2-11)$$

e $P_r(\theta)$ é a potência recebida pelo ângulo θ . Utilizando o resultado discreto dado pela equação 2-3 tem-se:

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{\sum_{l=0}^{L-1} A_{l,k}^2 \theta_{l,k}^2}{\sum_{l=0}^{L-1} A_{l,k}^2} - \left(\frac{\sum_{l=0}^{L-1} A_{l,k}^2 \theta_{l,k}}{\sum_{l=0}^{L-1} A_{l,k}^2} \right)^2} \quad (2-12)$$

A equação 2-12 representa o espalhamento angular para o canal de faixa estreita. Para uma caracterização de faixa larga calcula-se a dispersividade σ_θ considerando todos sinais que chegam, de vários ângulos, em um mesmo retardo.

Como ilustração, temos a figura 2.3 que exemplifica uma resposta espaço-temporal típica de um ambiente *indoor*. Se cada pico do espectro obtido for associado a uma amplitude discreta, a representação do canal se dará como na equação 2-3. Em uma análise cuidadosa do gráfico, observa-se que com retardo de 70[ns] chegam 7 raios, aplicando-se o equacionamento descrito em 2-12 tem-se um espalhamento angular $\sigma_\theta = 42^\circ$. Da mesma forma, com retardo de 115[ns] chegam outros 5 raios que geram um espalhamento angular de $\sigma_\theta = 45^\circ$. A média ponderada pela energia contida em cada uma destas linhas de retardo gera um espalhamento angular final $\sigma_\theta = 43^\circ$.

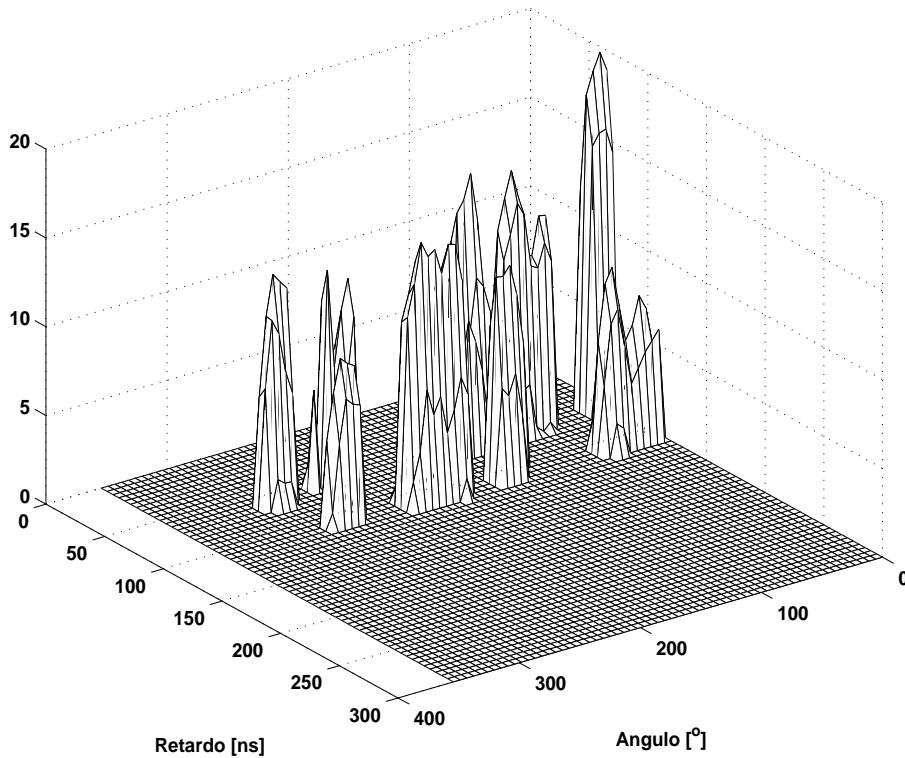


Figura 2.3: Exemplo de uma Resposta Espaço-Temporal

2.2 Modelos Espaço-Temporais

No passado, a distribuição dos ângulos de chegada não era conhecida, assumindo-se uma distribuição uniforme no intervalo $[0, 2\pi]$. Em um ambiente tipicamente macrocelular, uma estação rádio-base é instalada acima dos maiores espalhadores da região. Desta forma, os sinais recebidos na base são o resultado do processo de espalhamento na vizinhança da estação móvel. Os componentes de multipercurso na estação base são restritos a uma pequena região angular, e com isso a distribuição dos ângulos de chegada não é mais uniforme em torno de $[0, 2\pi]$. Nos ambientes microcelulares a antena da estação base geralmente é montada abaixo da altura dos prédios. Isto implica em um maior espalhamento angular, uma vez que o processo de espalhamento também ocorre na vizinhança da base. Na prática, observa-se que à medida em que se abaixa a antena transmissora, aumenta-se a dispersividade angular do canal. Dentro desta perspectiva, o que se verifica na propagação em ambientes interiores é um comportamento das estatísticas de espalhamento angular extremamente dependente do tipo de ambiente e da disposição de armários, estantes e outros grandes espalhadores.

Em [28], Rappaport *et al.* realizam um resumo dos modelos Espaço-Temporais existentes que levam em consideração as características de tempo e ângulo de chegada dos sinais. Nesse trabalho, os autores subdividem as possibilidades de modelagem em três grupos. A seguir, será apresentada uma breve descrição de cada grupo. Informações quanto à formulação completa de cada modelo, além das referências a cada trabalho, podem ser encontradas em [28, 35]:

1. **Modelos Gerais de Base Estatística** – Inicialmente surgiram o Modelo de Lee, algumas variações deste, e o Modelo de Distribuição Geométrica Uniforme. Todos esses modelos partem de uma suposição quanto ao posicionamento dos espalhadores principais e têm como objetivo prever a correlação entre pares de elementos (antenas) em sistemas de diversidade de espaço.

Outra série de modelos estatísticos surgiu a partir de funções de densidade espacial de espalhadores, os quais são dispostos aleatoriamente a partir de um tipo de função assumida. Conhecidos como Modelos de Base Geométrica, possuem algumas variantes quanto à forma, havendo modelos de base circular ou elíptica. Diferentemente dos outros, os Modelos de Base Geométrica assumem que cada multipercurso sofre uma única reflexão, provendo então o tempo e ângulo de chegada

do sinal, e por isso estes podem ser empregados para prever a performance de sistemas com *arrays* adaptativos (Antenas Inteligentes).

Tem-se também, outro modelo, chamado de Canal Vetorial de Rayleigh Variante no Tempo, desenvolvido para prover resultados considerando tanto o desvanecimento de Rayleigh de pequena escala quanto propriedades de correlação espacial. Este modelo apresenta boa performance quando comparado com medidas e por isso ganhou duas variantes, uma para ambientes urbanos típicos e outra para urbanos densos.

Saleh e Valenzuela [9] desenvolveram um modelo para multipercursos em ambientes *indoor* baseado no fenômeno de “clusterização” dos retardos, observado através de dados experimentais. Posteriormente, este modelo foi expandido para considerar uma distribuição espacial desses *clusters*.

Finalmente, tem-se o modelo de Lu, Lo e Litva, baseado na hipótese de distribuição dos espalhadores em sub-regiões elípticas. Simulações realizadas com esse modelo levaram à conclusão de que o uso de antenas com abertura de 60° em ambientes celulares pode reduzir o espalhamento *rms* de retardos em valores que variam de 30 a 40%. Medidas posteriores realizadas em Toronto com antenas setorizadas comprovaram esta hipótese.

2. **Modelos *site-specific* Baseados em Medidas** – Modelos desse grupo possuem maior precisão, mas dependem totalmente de medidas. Dentre eles, destaca-se o modelo proposto por Blanz *et al.*, a idéia por detrás deste modelo é caracterizar o ambiente de propagação em termos dos pontos de espalhamento predominantes, identificados com campanhas de medidas.

Outra possibilidade levantada é transformar o modelo de linhas de retardo do canal [19], para que neste, cada *tap* contenha informações de tempo de chegada, amplitude complexa e ângulo de chegada. Assim, as funções densidade de probabilidade conjuntas do canal podem ser determinadas a partir de medidas.

3. **Modelos Totalmente *Site-Specific*** – Os modelos apresentados até aqui são baseados em análises estatísticas e/ou medidas, e provêm informações quanto a média da perda de propagação, dos espalhamentos angulares e de retardos, para vários tipos de ambientes. Nos últimos anos, um modelamento determinístico, conhecido como Traçado de

Raios, foi proposto baseado nas teorias geométricas da difração, além de modelos de reflexão e espalhamento. Utilizando informações ditas *Site-Specific*, como base de dados geo-referenciadas do relevo e dos prédios, estes métodos tentam prover informações determinísticas do ambiente de propagação. No entanto, maiores desenvolvimentos têm esbarrado no grande esforço computacional requerido.