

### 3 Caracterização do Canal de Rádio Propagação

Neste capítulo são apresentados conceitos sobre o canal de propagação em sistemas móveis, com ênfase no ambientes microcelulares. São discutidos as variações espaciais do sinal recebido e o efeito de multipercurso atmosférico e o método de traçado de raios para a determinação do nível e perfis de retardo do sinal recebido.

#### 3.1 O sinal no canal rádio-móvel

O comportamento típico de um sinal de comunicações móveis celulares é apresentado na figura 3.1 [29].

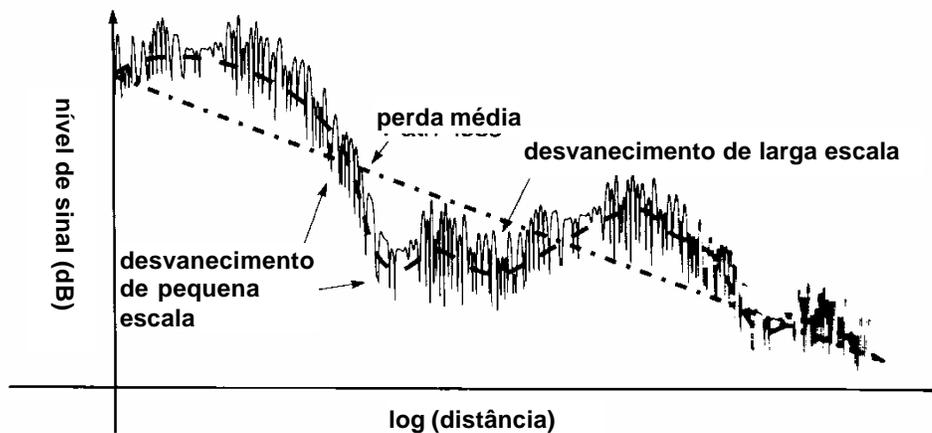


Figura 3.1 - Comportamento típico do sinal recebido em ambientes celulares

Na figura é possível distinguir dois comportamentos distintos. As flutuações rápidas do sinal são denominadas desvanecimento em pequena escala, associadas ao multipercurso. À variação mais suave e lenta dá-se a denominação de desvanecimento em larga escala, associada ao sombreamento por obstáculos. Além destes dois comportamentos do sinal há ainda, naturalmente, a tendência de queda do nível segundo algum expoente de atenuação com a distância, que varia conforme o ambiente.

### 3.1.1.

#### Desvanecimento em larga escala

O desvanecimento em larga escala está relacionado a características de propagação que manifestam seus efeitos no sinal ao longo de médias e grandes distâncias, comparadas com o comprimento de onda.

Esse tipo de desvanecimento é também conhecido por sombreamento, pois ele está mais relacionado a obstruções naturais (relevo e vegetação) e a construções, como casas e edifícios, que fazem com que o móvel fique em uma região de sombra (onde o nível de sinal é bastante reduzido) quando há obstrução. Quando é obstruído, o sinal chega ao receptor basicamente através de difração e espalhamento, e a amplitude do sinal assim recebido segue uma função de distribuição de probabilidades log-normal [30], correspondente a uma distribuição Gaussiana ou normal para o nível de sinal em dB:

$$p_l(L) = \frac{1}{sL\sqrt{2p}} e^{-\left[\frac{(\ln L - \mu)^2}{2s^2}\right]} \quad (3.1)$$

onde  $\mu$  é o valor médio da distribuição e  $\sigma$  seu desvio padrão.

### 3.1.2.

#### Desvanecimento em pequena escala

O desvanecimento em pequena escala é causado pelo comportamento aleatório das componentes do sinal que chegam ao receptor, verificado a curtas distâncias ou pequenos intervalos de tempo (embora o termo “escala”, tanto para pequena escala quanto para grande escala, refira -se originalmente à distância). Tal comportamento é fruto da multiplicidade de percursos percorridos pelas várias componentes do sinal, que chegam ao receptor com diferentes amplitudes e defasagens entre si. Uma função de densidade de probabilidades que descreve a amplitude do sinal para o desvanecimento em pequena escala é a função de Rayleigh [31], dada por

$$p_r(r) = \frac{r}{s^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2s^2}\right) \quad (3.2)$$

### 3.1.3.

#### Efeitos de Multipercurso

Em sistemas de comunicações móveis celulares, a faixa de frequências empregada, o ambiente onde as comunicações ocorrem e a mobilidade, fazem com que o sinal resultante no receptor seja fruto da composição de ondas eletromagnéticas que percorreram diversos percursos distintos entre transmissor e receptor, através de diferentes mecanismos de propagação. A faixa de frequências escolhida para sistemas móveis celulares (UHF) é favorável à propagação do sinal transmitido através de mecanismos de reflexão, difração, espalhamento e visada direta. Quanto ao ambiente onde a comunicação se realiza, nas áreas mais povoadas (principalmente as grandes áreas urbanas), edifícios representam obstáculos nos quais a onda propagante pode refletir-se ou difratar-se, conforme indica a figura 3.2. Como a unidade móvel está, em geral, imersa no ambiente, ela receberá raios através dos vários mecanismos de propagação gerados pelo ambiente. A mobilidade da unidade portátil possibilita que, a cada instante, o móvel esteja recebendo uma diferente combinação de ondas propagantes, que esteja ocorrendo em determinado local e momento. Os vários raios refletidos no ambiente urbano são os principais causadores do multipercurso.

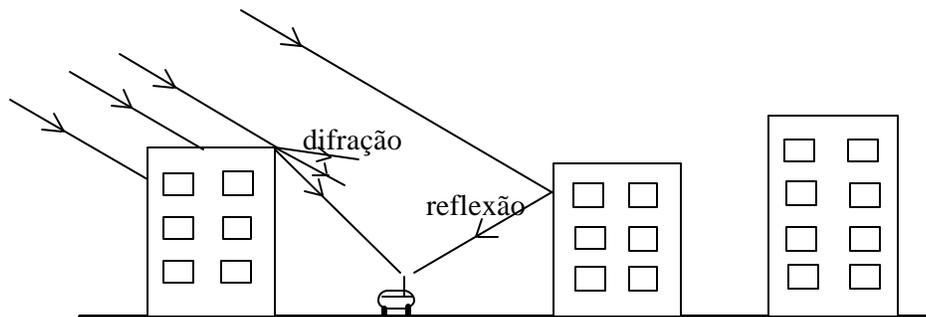


Figura 3.2 - Cenário de multipercurso

No receptor, os campos associados aos diferentes percursos somam-se vetorialmente e produzem um campo resultante oscilante. A queda no nível do sinal recebido devido ao multipercurso é conhecida por desvanecimento em pequena escala. Especialmente, desvanecimentos rápidos e profundos ocorrem entre distâncias de  $\lambda/2$ , aproximadamente (onde  $\lambda$  é o comprimento de onda). O

desvanecimento em pequena escala pode ser compreendido tanto espacialmente como temporalmente, analisando-se o tempo entre desvanecimentos sucessivos em um terminal em movimento ou mesmo em repouso (neste último caso, embora o terminal não esteja deslocando-se, o desvanecimento de pequena escala pode ocorrer devido a alterações no ambiente, como movimentação de veículos, por exemplo).

A distribuição Rayleigh é apropriada para os casos em que o móvel apenas recebe componentes através de multipercurso, de forma que não há nenhuma componente (um raio direto, em geral) cuja amplitude se destaque quando comparada à amplitude das outras. Para as situações em que o móvel recebe, além das componentes de multipercurso, um raio direto (de nível muito superior às componentes de multipercurso), a distribuição Rayleigh não mais descreve adequadamente o envelope do sinal recebido. Nesse caso, a distribuição Rice pode ser usada [32]. Na distribuição Rice há, portanto, uma componente dominante (raio direto), e a sua função densidade de probabilidade, que descreve a amplitude do sinal, é dada por:

$$p_r(r) = \frac{r}{s^2} \exp\left(-\frac{r^2 + r_s^2}{2s^2}\right) I_0\left(\frac{rr_s}{s^2}\right) \quad (3.3)$$

onde :

$I_0(.)$  - função de Bessel modificada de primeira espécie

$r_s$  - parâmetro relativo à amplitude da componente dominante

$\sigma$  - relativo ao desvio padrão das componentes do sinal

### 3.1.4.

#### Perfil de Retardos

Em um canal com multipercurso, cada componente do sinal recebido percorre um caminho diferente entre transmissor e receptor e, portanto, o tempo de chegada de cada componente ao receptor será distinto. Dessa forma, o sinal resultante será composto por um conjunto de versões do sinal enviado, que possuem retardos entre si. O sinal sofre espalhamento no tempo e o gráfico que mostra cada componente significativa de multipercurso, sua potência e o instante de tempo de chegada é denominado perfil de retardos (power delay profile). Um exemplo típico de perfil de retardos é mostrado na figura 3.3.

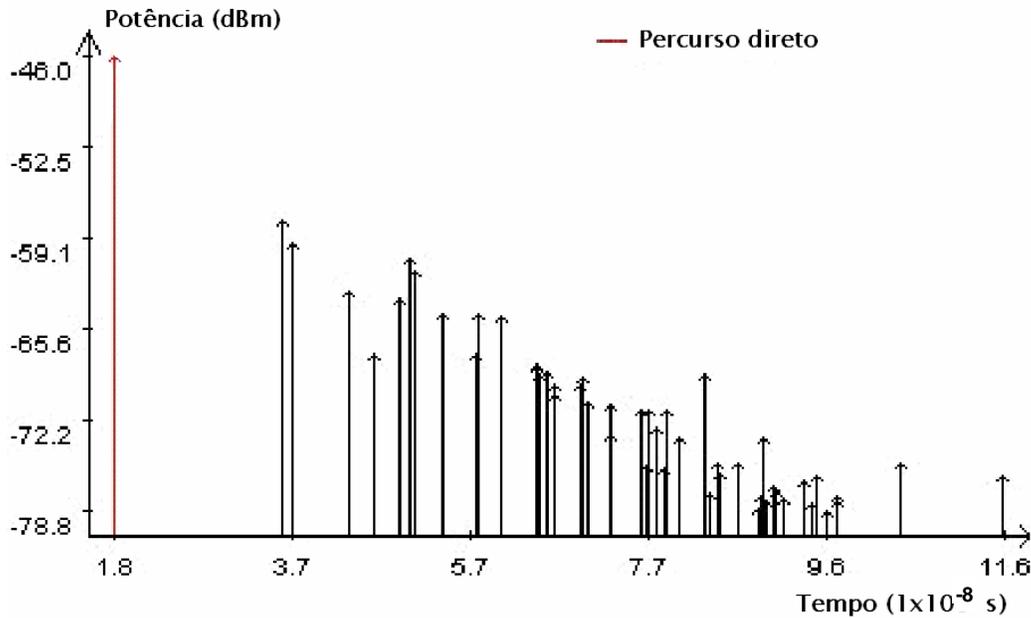


Figura 3.3– Exemplo típico de perfil de retardos

Em sistemas digitais, o espalhamento temporal provoca interferência intersimbólica (ISI - Inter-Symbolic Interference), limitando a taxa de símbolos máxima a ser utilizada no canal a  $R < 1/(2\sigma\tau)$ , onde  $\sigma\tau$  é o espalhamento temporal.

### 3.1.5.

#### Comportamento do sinal em micro e picocélulas

Medidas realizadas em microcélulas mostram que o canal é caracterizado pela distribuição de Rice. Verifica-se também que, em geral, o nível médio local na rua onde o transmissor está localizado segue uma lei com duas potências distintas de atenuação com a distância,  $n_1$  e  $n_2$ , com um ponto de quebra entre elas [33]. A forma das curvas de atenuação, bem como os pontos de quebra, variam de acordo com a localidade, e a determinação desses parâmetros é feita através de medições. Um exemplo típico é apresentado na figura 3.4.

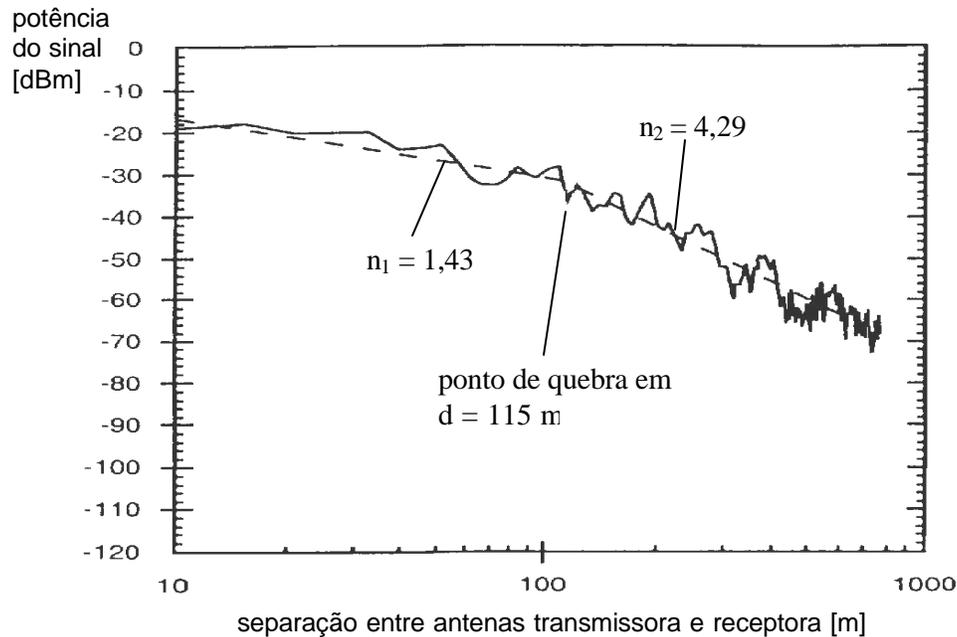


Figura 3.4 - Comportamento típico do sinal em microcélulas

Nesta figura é interessante observar que o expoente de atenuação com a distância anterior ao ponto de quebra é menor do que 2 ( $n_1 = 1,43$ ), que é o expoente para a propagação em espaço livre. Esse fato indica o guiamento (ou canalização) da onda eletromagnética, que é uma característica comum a micro e picocélulas urbanas e também *indoor*, nas proximidades da antena transmissora.

Em ambientes micro-celulares a propagação pode ser descrita através de modelos de raios, como os modebs de dois raios, quatro raios, seis raios e dez raios [29,34].

O modelo de dois raios consiste em um raio direto e um raio refletido no solo, e a distância em que ocorre o ponto de quebra é a distância para a qual o primeiro elipsóide de Fresnel é obstruído pelo solo. A localização do ponto de quebra é dependente, para um mesmo ambiente, das alturas das antenas e frequência de operação.

O modelo de quatro raios considera, adicionalmente, raios devidos à reflexão nas paredes externas das construções laterais das ruas. Nesse modelo, o cálculo do ponto de quebra será influenciado pela largura da rua, pois agora passa a ser considerada também a obstrução do primeiro elipsóide de Fresnel pelas construções às margens da rua onde está instalada a antena transmissora.

O modelo de seis raios é obtido ao acrescentar-se ao modelo de quatro raios mais dois raios gerados, cada um, por uma reflexão dupla nos edifícios das margens opostas da rua considerada.

O modelo de 10 raios [35] apresenta boa aproximação para a propagação em corredores. Este modelo incorpora todos os caminhos com uma, duas ou três reflexões, como indica a figura 3.5. Especificamente, tem-se: LOS, reflexão na terra (GR), simples reflexão na parede (SR), dupla reflexão (DW), tripla reflexão (TW), reflexão parede-terra (WG), reflexão terra-parede (GW). Existe dois de cada tipo de reflexão na parede, um para cada lado da rua.

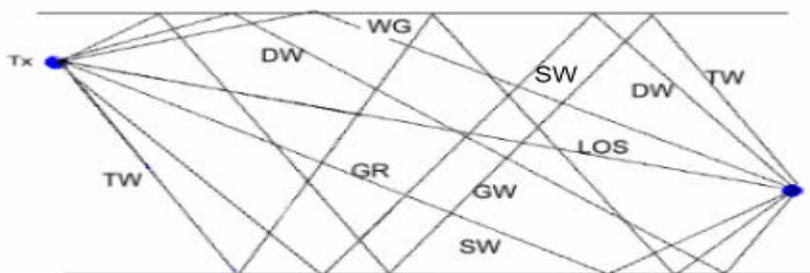


Figura 3.5. Modelo de 10 raios

O modelo de dois raios descreve melhor ambientes com menor povoamento, como áreas rurais e até suburbanas. Em contrapartida, um modelo de quatro ou mais raios funcionam melhor em cidades onde é grande a presença e influência de construções nas vias de tráfego de veículos. Estes modelos são, entretanto, consideram apenas efeitos de reflexão e são limitados à descrição da propagação em ambientes tipo “corredor”, aí incluídas longas avenidas cercadas de conjuntos contínuos de edificações. Para ambientes mais complexos, em que efeitos de difração devem ser considerados, é necessário utilizar técnicas de traçado de raios, apresentada na seção seguinte.

### 3.1.6.

#### Efeito da altura da rádio base

Resultados apresentados em [36] mostram que, em áreas construídas, a altura da estação base não tende a gerar grande impacto nas estatísticas da

propagação quando as antenas são baixas. Quando as alturas dos edifícios são da mesma ordem da altura da antena da ERB, as estatísticas passam a depender fortemente da altura antena, ou seja, a sensibilidade da propagação é aumentada a partir do momento em que as alturas da ERB e de prédios vizinhos se aproximam.

Em percursos obstruídos, o sinal pode atingir o usuário principalmente devido à propagação por ruas transversais através de múltiplas reflexões, difração nas construções localizadas nas esquinas.

Ao contrário de macrocélulas onde as predições levam em conta apenas as características globais da localidade - como altura média de edifícios ou mesmo tipo de região (rural, urbana e suburbana), em microcélulas, com antenas da base localizadas muitas vezes na altura de postes e pequenas distâncias envolvidas, são os detalhes do ambiente que determinarão a variabilidade do sinal. Em macrocélulas, as características em larga escala do canal podem ser consideradas constantes em intervalos que variam de  $20\lambda$  a  $40\lambda$ , enquanto que em microcélulas o desvanecimento em larga escala pode ser perceptível a distâncias significativamente menores. É importante se fazer a distinção entre percursos em visada direta, como ao longo de uma rua, e percursos onde há sombreamento por obstruções, como edifícios. Ambientes com predomínio de visada direta (LOS – *line-of-sight*) devem ser tratados de forma diferente de ambientes que apresentam muitas obstruções (NLOS - *non line-of-sight*) para que se minimize o erro nas predições.

### **3.2** **Técnicas de traçado de raios**

Em ambientes micro-celulares e pico-celulares, particularmente em regiões urbanas densas formadas por corredores de ruas ou em ambientes interiores (*indoor*) é possível e conveniente utilizar técnicas de traçado de raios para um cálculo mais preciso do nível de sinal e para a obtenção do perfil de retardos do sinal recebido. As duas principais técnicas de traçado de raios são o método das imagens e o método da força bruta, que inclui dois subconjuntos de métodos de lançamento de raios, denominados “*ray shooting*” e “*tube shooting*”.

### 3.2.1. Método das imagens

O método das imagens localiza fontes artificiais no cenário de forma a modelar as reflexões em paredes planas [35,37,38]. O método das imagens determina o exato caminho de propagação sem introduzir erros.

A figura 3.6 mostra uma simples aplicação do método das imagens. Para a primeira superfície é criada uma imagem do transmissor. Para a segunda superfície criam-se duas imagens adicionais: a primeira imagem e uma imagem da primeira imagem. Este processo repete-se para todas as superfícies refletoras da base de dados e sua implementação é direta.

A desvantagem do método é que o tempo para mapear a imagem aumenta exponencialmente com o número de superfícies elementares do cenário [39], já que cada superfície refletora adicional duplica o número de imagens disponíveis para o receptor. Para cenários muito complexos o tempo de processamento pode tornar-se proibitivo.

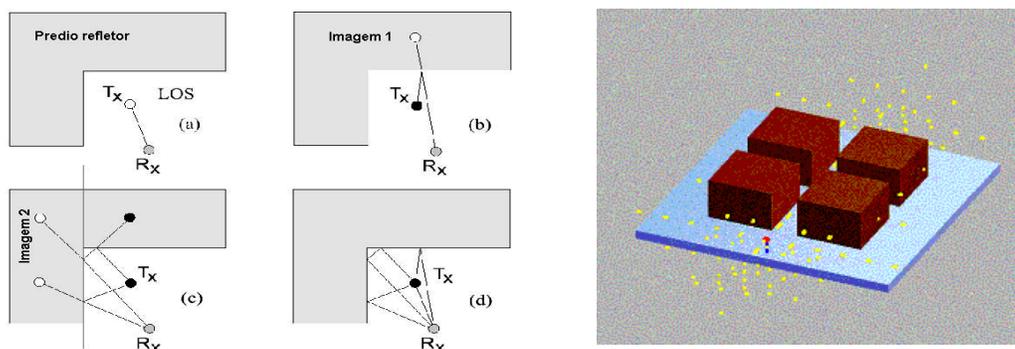


Figura 3.6: Determinação dos percursos de propagação: **(a)** Raio em visada (LOS); **(b)** Imagem relativa à primeira face; **(c)** Imagens relativas à segunda face; **(d)** percursos dos raios resultantes. **(e)** Fontes imagem (em amarelo, fonte transmissora em vermelho) para o cálculo de quatro reflexões.

### 3.2.2. Método da Força Bruta

O algoritmo de força bruta inicia-se no transmissor e envia centenas de raios de teste em todas as direções dentro do cenário. O algoritmo procura identificar os raios de teste que passam mais próximos da localização do receptor e utiliza estes raios para estimar o caminho exato de propagação percorrido por

uma onda multipercurso. A intensidade do campo recebido pode ser calculada utilizando coeficientes de reflexão e difração dados pelas teorias da ótica geométrica e teorias geométrica e uniforme de difração.

Numerosos esquemas do algoritmo de força bruta e implementações são possíveis, porém todos eles seguem três passos: lançamentos de raios teste, procura pelos raios mais próximos da localização do receptor e realização das operações necessárias para o cálculo dos campos e retardos de propagação.

A técnica de força bruta pode ser utilizada em cenários simples, mas é particularmente poderosa quando utilizada em cenários complexos em três dimensões [40]. Apesar dos cálculos de interseções e reflexões para centenas de raios serem grandes, o tempo de cálculo não depende tão fortemente da complexidade da base de dados como a técnica das imagens. Se a técnica da força bruta se combina com outras técnicas de discriminação espacial, os cálculos no tempo exibem uma dependência logarítmica do número de superfícies correspondentes aos dados do cenário na base de dados.

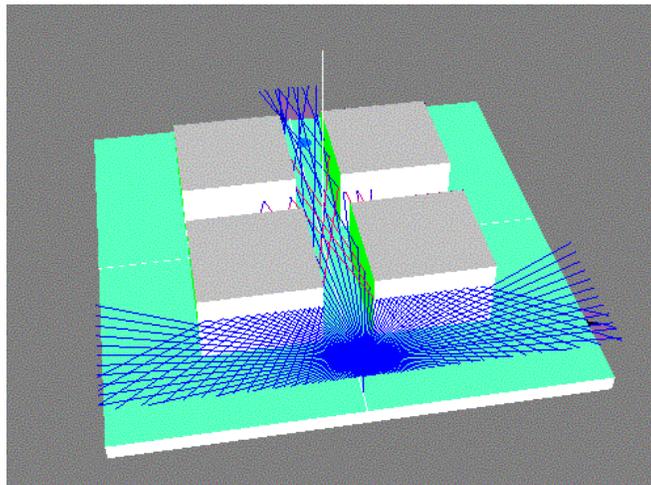


Figura 3.7. Lançamento de raios pelo método da força bruta com 4 reflexões

Muitos algoritmos de traçado de raios combinam a técnica das imagens com a técnica da força bruta. O exemplo mais comum da aplicação desta técnica misto é a predição da propagação em cenários urbanos tipo corredor [41]. Na aplicação desta técnica assume-se que o transmissor e o receptor encontram-se abaixo do prédio mais baixo, que as paredes dos prédios são completamente planas e que a superfície em que se acha o cenário é

planar. A predição da propagação então se reduz a duas dimensões, sendo problema é visualizado de cima. O método de imagens compensa a perda desta terceira dimensão, assumindo que além de cada caminho 2D também existe a reflexão no terreno [42,43,44,45].

### 3.2.3. Métodos de Recepção

Uma vez que os raios são traçados no espaço, o programa deverá receber os raios em pontos de interesse do espaço para medir os níveis de potência e retardos de propagação. Um método comum e muito usado na interpretação da informação dos raios é o método da esfera de recepção. Este método assume lançamento de raios uniformemente desde uma esfera geodésica em um cenário composto por superfícies planas ou segmentos representando superfícies de terrenos [46]. Estas suposições simples fazem que este método seja muito usado, apesar de que apresentar problemas de dupla contagem quando a esfera de recepção é muito grande.

A dificuldade com este esquema de recepção é a escolha do tamanho adequado da esfera. Se as esferas são pequenas existirão raios de valor significativo que não são computados. Se as esferas são muito grandes, raios fisicamente equivalentes chegarão ao receptor produzindo contagem dupla.

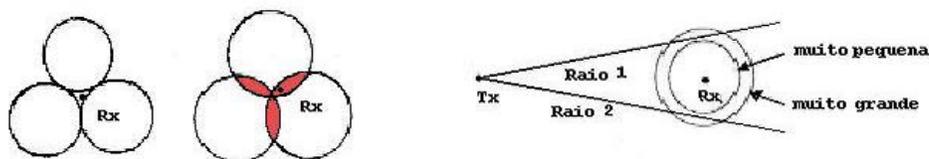


Figura 3.8. Mudança de tamanhos da esfera de recepção

Uma possível solução a este problema é o uso de esferas de recepção adaptativas. Para cada ponto de recepção é feita uma projeção perpendicular  $d$  do ponto de recepção ao segmento do raio. Calcula-se também a distância  $L$  do ponto de transmissão a ponto de recepção. Uma região circular de raio  $gL/2$  é definida ao redor do ponto de recepção, sendo  $g$  o ângulo de incremento no lançamento do raio. Todos os raios que passam dentro desta região de recepção são considerados como capazes de sensibilizar ao receptor.

Logo, se  $d < gL/2$  o raio contribui para o sinal no receptor; se  $d \geq gL/2$ , o raio não atinge ao receptor.

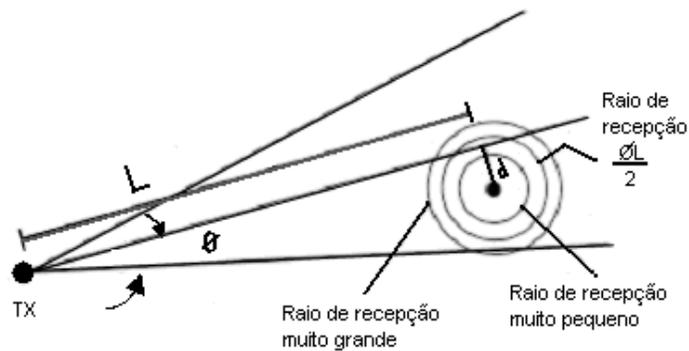


Figura 3.9. Determinação da esfera de recepção.

Para raios refletidos ou difratados, o tamanho da esfera de recepção é proporcional ao comprimento desdobrado (unfolded) do percurso de um raio. A figura 3.10 mostra um exemplo bidimensional do ajuste do tamanho das esferas de recepção de forma a receber um só raio a partir de uma frente de onda refletida.

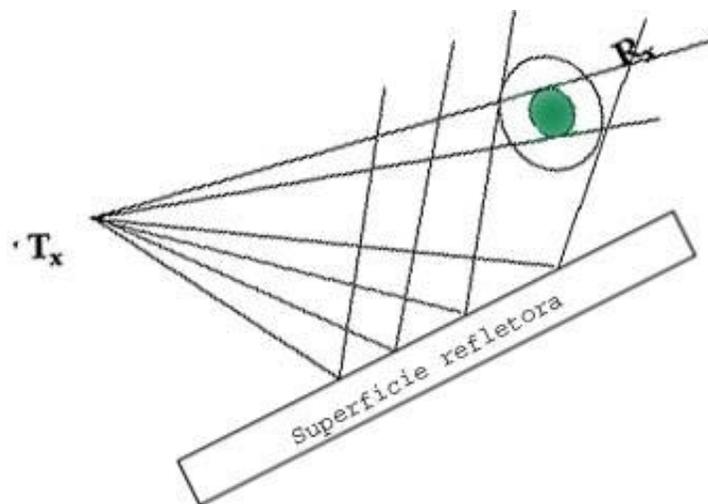


Figura 3.10. Ajuste das esferas de recepção para sinal LOS e ondas refletidas

Outros métodos de recepção, em especial para evitar o problema da dupla contagem são apresentados em [45], onde se utiliza o método de frentes de ondas distribuídos usando funções de peso.

### 3.3

#### Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os conceitos sobre o canal de propagação em sistemas móveis, com ênfase no ambientes microcelulares. É possível distinguir dois comportamentos distintos de um sinal de comunicações móveis celulares. O desvanecimento em pequena escala e o desvanecimento em larga escala. As flutuações associadas ao multipercurso apresentam variação ao logo de distâncias da ordem do comprimento de onda são denominadas desvanecimento de pequena escala. As flutuações associadas à difração ou sombreamento ocorrem ao logo de distâncias da ordem de vários comprimentos de onda e são denominadas desvanecimento de larga escala.

Em ambientes micro-celulares a propagação pode ser descrita através de modelos de raios, como os modelos de dois raios, quatro raios, seis raios e dez raios.

Para ambientes mais complexos, em que efeitos de difração devem ser considerados, é necessário utilizar técnicas de traçado de raios. As duas principais técnicas de traçado de raios são o método das imagens e o método da força bruta.

O método das imagens localiza fontes artificiais no cenário de forma a modelar as reflexões em paredes planas. O método das imagens determina o exato caminho de propagação sem introduzir erros. O algoritmo de força bruta inicia-se no transmissor e envia centenas de raios de teste em todas as direções dentro do cenário. O algoritmo procura identificar os raios de teste passam mais próximos da localização do receptor e utilizam estes raios para estimar o caminho exato de propagação percorrido por uma onda multipercurso. A dificuldade com este esquema de recepção é a escolha do tamanho adequado da esfera de recepção. Se as esferas são pequenas existirão raios de valor significativo que não são computados. Se as esferas são muito grandes, raios fisicamente equivalentes chegarão ao receptor produzindo contagem dupla.

A solução a este problema é o uso de esferas de recepção adaptativas. Em geometrias tridimensionais as esferas adaptativas reduzem, mas não eliminam o problema de multiplicidade de raios recebidos.