

3

O Canal Rádio Móvel

O canal de radiopropagação, pela sua natureza aleatória e dependente da faixa de frequências utilizada, não é de fácil modelagem, exigindo estudos teóricos e dados estatísticos para sua caracterização.

Para esta caracterização devem ser considerados os mecanismos de propagação, que respondem pelo valor mediano do sinal recebido a uma determinada distância do transmissor, e os efeitos de propagação, responsáveis pelas variações aleatórias do nível de sinal em relação a este valor mediano. Os mecanismos de propagação predominantes na faixa de frequência usada para sistemas celulares são visibilidade, reflexão e difração [2]. O efeito de propagação mais importante é o multipercurso, pois o sinal resultante recebido é devido à composição de inúmeras versões do sinal original transmitido, que percorrem diferentes percursos determinados, em grande parte, pelas reflexões e difrações múltiplas que sofrem até chegar ao receptor. Outro efeito de propagação é o que se manifesta através da flutuação do nível de sinal com a distância devido ao bloqueio devido a obstruções geradas pelo relevo ou criadas pelo homem. Esse efeito é conhecido por sombreamento.

As flutuações que reduzem o nível do sinal recebido abaixo do seu valor mediano para uma determinada distância do transmissor são o que se denomina desvanecimentos e podem ser de pequena escala, usualmente chamados desvanecimentos rápidos, ou de larga escala, usualmente chamados desvanecimentos lentos). O correto entendimento dos mecanismos e efeitos de propagação é básico para a estimativa do desempenho do sistema e cálculo de cobertura das células.

3.1. Efeitos de Sombreamento e Multipercurso

Em sistemas de comunicações móveis celulares, a faixa de frequências empregada, o ambiente onde as comunicações ocorrem e a mobilidade da unidade do usuário fazem que o sinal resultante no receptor seja fruto da composição de ondas eletromagnéticas que percorrem diversos percursos distintos entre transmissor e receptor, através de diferentes mecanismos de propagação [2]. No que se refere à frequência, as faixas de UHF alocadas para sistemas móveis celulares são favoráveis à propagação do sinal transmitido através de mecanismos de reflexão, difração, espalhamento e visada direta.

Quanto aos ambientes onde as comunicações se realizam, nas áreas mais povoadas, principalmente nas grandes áreas urbanas, edifícios representam obstáculos nos quais a onda propagante pode refletir-se ou difratar-se, conforme indicado na figura (3.1) abaixo.

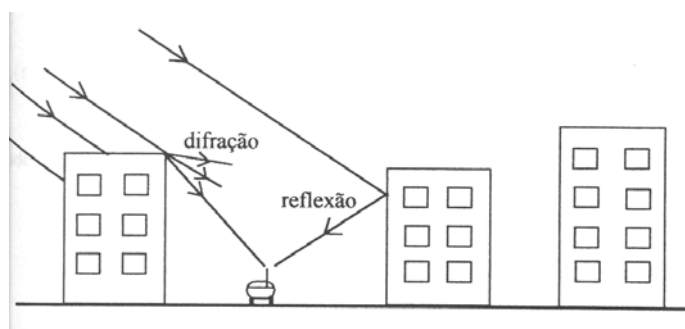


Figura 3.1 - Cenário de Multipercurso

Como a unidade móvel está, em geral, imersa nas obstruções, ela recebe raios através dos mecanismos de reflexão e difração, fortemente condicionados pelo ambiente, e apenas eventualmente raios diretos na condição de visibilidade. A mobilidade do terminal do usuário faz com que, a cada instante, o móvel esteja recebendo uma diferente combinação de ondas propagantes.

As flutuações rápidas estão associadas aos deslocamentos de curta distância do móvel, que provocam grandes variações de fase dos sinais interferentes de multipercurso [2].

Os vários raios refletidos no ambiente urbano são os responsáveis por estas flutuações rápidas. No receptor, os campos associados aos diferentes percursos somam-se vetorialmente. As quedas do nível de sinal recebido devidas ao multipercurso é conhecida por desvanecimento em pequena escala.

Espacialmente, desvanecimentos rápidos ou de pequena escala ocorrem entre distâncias em torno de meio comprimento de onda. O desvanecimento em pequena escala pode ser compreendido tanto espacialmente, pelo deslocamento do terminal do usuário, como temporalmente, analisando-se o tempo entre desvanecimentos sucessivos em uma estação em movimento ou mesmo em repouso, quando ocorre movimento de espalhadores em torno da mesma.

Como cada percurso do sinal sujeito a multipercurso possui um comprimento diferente, o sinal recebido é composto por um conjunto de sinais com retardos mútuos relativos, sofrendo um “espalhamento no tempo”. Em sistemas digitais, este efeito provoca interferência entre símbolos, limitando a taxa máxima de símbolos que podem ser utilizados no canal.

A distribuição de Rayleigh é apropriada para os casos em que as estações móveis recebem apenas 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 de Rayleigh não mais descreve adequadamente o envelope do sinal recebido. Neste caso, a distribuição de Rice é usada. Sendo sua fdp definida por:

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + r_s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rr_s}{\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

onde:

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

r_s = parâmetro relativo à amplitude da componente dominante

σ = relativo ao desvio padrão das componentes do sinal

Também foi definido por Rice um fator que relaciona a potência da componente dominante com a potência das componentes de multipercurso. O fator, denominado fator de Rice, é dado por:

$$k = 10 \log \frac{r^2}{2\sigma^2} [dB] \quad (3.2)$$

A figura (3.2) abaixo mostra como, variando K , é possível se recair nas distribuições de Rayleigh e Normal.

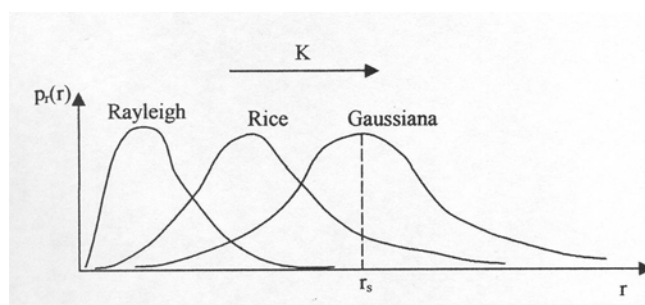


Figura 3.2 - Distribuições de Rayleigh, Gaussiana e Normal

Pode-se observar que, para pequenos valores de K , a distribuição de Rice tende para Rayleigh. Esse resultado é esperado, pois valores pequenos de K indicam que a contribuição de potência da componente mais forte não é significativa. Portanto, não há uma componente dominante e a distribuição é de Rayleigh. Por outro lado, se K é muito grande, a distribuição tende ser Normal. Pode-se compreender esse comportamento, observando que, para K muito grande, há predomínio da componente direta (ou alguma outra componente, desde que seja muito superior às outras), de forma que o multipercurso tenha influência desprezível. O sinal apresentará menos oscilações, estando sujeito apenas ao efeito das obstruções, causadoras de sombreamento. A distribuição de Rice pode ser vista como uma distribuição abrangente que, para extremos dos valores de K , degenera-se ou em uma distribuição de Rayleigh ou em uma distribuição Normal.

3.2. Propagação em Regiões Urbanas

Como discutido acima, na maioria dos casos de interesse prático, o terreno sobre o qual se dá a propagação apresenta topografia variada, vegetação e construções distribuídas de forma aleatória. Embora o cálculo da perda de propagação possa ser realizado, ainda que com precisão limitada, utilizando métodos numéricos (como traçado de raios) ou soluções para aproximações da equação de onda (como a equação parabólica), os métodos mais utilizados para cálculo de cobertura são empíricos ou semi-empíricos. Estes métodos fornecem o valor mediano da perda de propagação em função de parâmetros como a altura das antenas, frequência de operação, distância entre transmissor e receptor, características do relevo e grau de urbanização. Alguns métodos semi-empíricos consideram uma descrição mais detalhada do ambiente urbano incluindo largura de ruas, sua orientação relativa ao enlace entre transmissor e receptor e altura média dos prédios.

3.2.1. Modelos de Predição Empíricos

Os modelos empíricos são obtidos a partir de campanhas de medidas em uma ou mais regiões, modelamento dos resultados obtidos e apresentação do resultado final (modelo) através de ábacos ou expressões que fornecem o valor mediano da atenuação. Modelos dessa categoria, em especial os modelos dados por uma expressão final analítica, apresentam a vantagem de serem, em geral, de fácil aplicação e implementação computacional.

Por outro lado, sendo baseados em medições realizadas em locais específicos, modelos empíricos tendem a não fornecer resultados muito confiáveis quando aplicados a regiões que difiram significativamente da região original das medidas. A precisão destes modelos pode, deve ser refinada, através de ajuste de seus parâmetros com base em medidas nas regiões em que serão aplicados.

3.2.1.1.

Modelo de Hata (Okumura – Hata)

O modelo de Hata é uma formulação empírica do modelo gráfico de Okumura. A atenuação em áreas urbanas pode ser calculada por [2]:

$$L_{urbana} = 69.55 + 26.16 \times \log f - 13.82 \times \log h_t - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \times \log h_t) \times \log d \quad (3.4)$$

onde:

L = atenuação em dB

f = frequência em MHz – $150 \leq f \leq 1500$ MHz

d = distância em km – $1 \text{ km} \leq d \leq 20 \text{ km}$

h_t = altura do transmissor em metros – $30 \text{ m} \leq h_t \leq 200 \text{ m}$

$a(h_r)$ = fator de correção em dB

h_r = altura do receptor em metros – $1 \text{ m} \leq h_r \leq 10 \text{ m}$

- fator de correção para (3.2) cidades pequenas e médias :

$$a(h_r) = (1.1 \log f - 0.7) h_r - (1.56 \log f - 0.8) \quad (3.5)$$

- fator de correção para cidades grandes :

$$a(h_r) = 8.29(\log 1.54 h_r)^2 - 1.1 \quad \text{para } f \leq 300 \text{ MHz} \quad (3.6)$$

$$a(h_r) = 3.2(\log 11.75 h_r)^2 - 4.97 \quad \text{para } f \geq 300 \text{ MHz}$$

Para obter a perda de propagação em áreas suburbanas e rurais a equação para área urbana pode sofrer modificações:

$$L_{suburbana} = L_{urbana} - 2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5.4 \quad (3.7)$$

$$L_{rural} = L_{urbana} - 4.78(\log f)^2 + 18.33 \log f - 40.94 \quad (3.8)$$

3.2.1.2.

Modelo estendido de Hata para PCS (COST-231):

Este modelo é a extensão do modelo de Hata para a faixa de PCS (Personal Communication System), desenvolvido pelo programa COST, de colaboração da comunidade europeia nas áreas de ciência e tecnologia. A atenuação pode ser calculada por [2]:

$$L = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_t - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log h_t) \log d + C_M \quad (3.9)$$

onde:

L = atenuação em dB

f = frequência em MHz – $1500 \leq f \leq 2000$ MHz

d = distância em km – $1 \text{ km} \leq d \leq 20 \text{ km}$

h_t = altura do transmissor em metros – $30 \text{ m} \leq h_t \leq 200 \text{ m}$

$a(h_r)$ = fator de correção em dB

C_M = fator de correção

h_r = altura do receptor em metros – $1 \text{ m} \leq h_r \leq 10 \text{ m}$

- fator de correção para cidades pequenas e médias:

$$a(h_r) = (1.1 \log f - 0.7)h_r - (1.56 \log f - 0.8) \quad (3.10)$$

- fator de correção para cidades grandes:

$$a(h_r) = 8.29(\log 1.54 h_r)^2 - 1.1 \quad \text{para } f \leq 300 \text{ MHz} \quad (3.11)$$

$$a(h_r) = 3.2(\log 11.75 h_r)^2 - 4.97 \quad \text{para } f \geq 300 \text{ MHz}$$

$C_M = 0 \text{ dB}$ para cidades de tamanho médio e áreas suburbanas

$C_M = 3 \text{ dB}$ para centros metropolitanos

3.2.1.3.

Modelo de Walfish Ikegami (COST 231)

Este modelo estatístico é aplicável tanto em células grandes quanto em microcélulas, em terrenos planos e urbanos. Esse modelo gera uma boa predição para perda em regiões com alta densidade de prédios, como grandes e médias cidades.

É um modelo baseado em importantes parâmetros urbanos como densidade de prédios, altura média dos prédios e largura das ruas.

Além de considerar a influência da rua onde o móvel está localizado, o modelo de Walfish - Ikegami inclui a contribuição da perda devido ao fato de o sinal transmitido passar por diversos prédios até chegar ao móvel (difração por múltiplos obstáculos) [2].

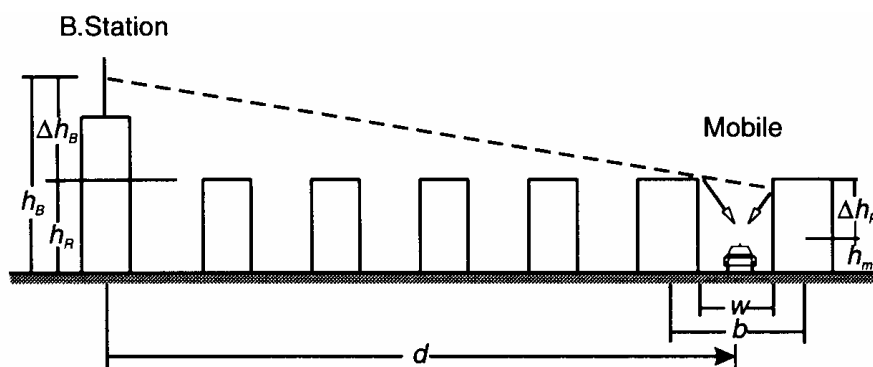


Figura 3.3 - Parâmetros para Modelo de Walfish – Ikegami

Onde:

h_b = altura da antena da estação base acima do solo (m)

h_m = altura da antena do móvel acima do solo (m)

h_r = altura média dos prédios (m) ($h_r > h_m$)

w = largura da rua onde o móvel está localizado (m)

b = distância entre os centros dos prédios (m)

d = distância entre a base e o móvel (Km)

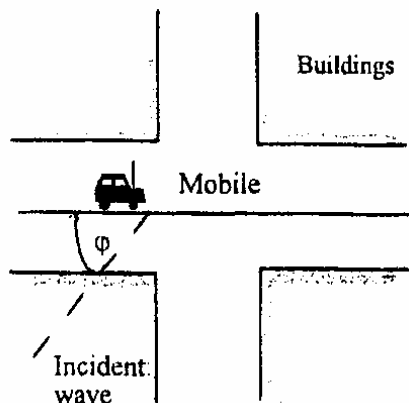


Figura 3.4 - Parâmetros do Modelo – parte 2

ϕ : ângulo entre a onda incidente no móvel e o eixo central da rua onde o móvel está localizado;

$\Delta h_b = h_b - h_r$: altura da antena acima da altura média dos prédios (m);

$\Delta h_r = h_r - h_m$: altura média dos prédios acima da altura da antena do móvel (m).

A expressão geral para este modelo de propagação é:

$$L_b = L_{fs} + L_{rst} + L_{msd} \quad (3.12)$$

L_{fs} é a perda em espaço livre, dada por:

$$L_{fs} = 32.4 + 20 \log f(MHz) + 20 \log d(Km) \quad (3.13)$$

L_{rts} é a perda por difração entre o topo dos prédios e a rua onde o móvel está localizado. Essa perda tem a seguinte expressão:

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log(\Delta h_r) + L_{ori} \quad (3.14)$$

Se $L_{rts} < 0 \text{ dB}$, o valor $L_{rts} = 0 \text{ dB}$ será usado.

L_{ori} = considera a orientação relativa entre o transmissor e a rua onde o móvel se encontra.

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.3574 \varphi & 0 < \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075 (\varphi - 35^\circ) & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4 - 0.11 (\varphi - 55^\circ) & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (3.15)$$

L_{mds} = é a estimativa da perda por difração em múltiplos obstáculos entre a estação base e o móvel.

$$L_{mds} = L_{bsh} + K_a + K_d \log(d) + K_f \log(f) - 9 \log(b) \quad (3.16)$$

Os parâmetros da expressão (3.15) são assim calculados:

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_b), \text{ se } h_b \leq 0, L_{bsh} = 0 \quad (3.17)$$

K_a representa o aumento da perda quando a estação móvel está abaixo dos prédios adjacentes.

$$K_a = \begin{cases} 54 & \Delta h_b \geq 0 \\ 54 - 0.8 \Delta h_b & \Delta h_b < 0 \text{ e } d \geq 0.5 \\ 54 - 0.8 \Delta h_b (d / 0.5) & \Delta h_b < 0 \text{ e } d < 0.5 \end{cases} \quad (3.18)$$

K_d controla a dependência entre a perda por difração em múltiplos obstáculos e a distância.

$$K_d = \begin{cases} 18 & \Delta h_b \geq 0 \\ 18 - 15 \Delta h_b / h_r & \Delta h_b < 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

K_f controla a dependência entre a perda por difração em múltiplos obstáculos e a frequência.

$$K_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para cidades com tamanho médio e área suburbanas,} \\ \text{com moderada densidade de vegetação} & \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para grandes metrópoles} \end{cases} \quad (3.20)$$

O modelo pode ser aplicado dentro das seguintes condições:

- frequência entre 800 e 2000 MHz
- altura da estação base entre 4 e 50 metros
- altura da estação do móvel entre 1 e 3 metros
- distância entre a estação base e o móvel entre 0.02 e 5 Km

Se o ambiente urbano é desconhecido, os seguintes parâmetros deverão ser utilizados:

- $b = 20 - 50$ m;
- $w : b / 2$;
- $\varphi: 90^\circ$;
- $hr : 3\text{m} \times \text{número de andares} + \text{altura do telhado (m)}$

O modelo analisado é considerado eficiente, pois possui duas configurações diferentes, uma para espaço livre e outra não espaço livre. Possui uma desvantagem, pois necessita de um banco de dados muito grande.

A estimativa deste modelo está de acordo com as medidas obtidas para a situação onde a estação base possui altura maior que a dos prédios.

O erro médio fica muito grande quando a altura da estação base se aproxima da altura dos prédios. Além disso, o desempenho do modelo é ruim para situações em que a altura da estação base é menor do que a altura dos prédios.

O modelo não considera perda por multipercurso e a estimativa da perda piora quando o terreno não é plano nem homogêneo.

3.2.1.3. Modelos para micro-células

De maneira geral, estes podem ser expressos da seguinte forma [2]:

$$L = a + b \log f + c \log d' + e \log d \quad [dB] \quad (3.3)$$

onde:

- a – constante [dB] determinada empiricamente ou a partir de modelos canônicos
- b – fator de atenuação com a frequência (relativo ao expoente de perda com a frequência)
- c – fator necessário quando o modelo utiliza uma distância de referência (d/d_0), e/ou quando o modelo utiliza mais de um valor para e
- e – fator de atenuação com a distância (relativo ao expoente de perda com a distância)
- f – frequência da portadora [MHz]
- d - distância entre transmissor (T_x) e receptor (R_x) [m]
- d' - distância de referência (d_0) ou distância de ponto de quebra, conforme descrito na apresentação do fator c [m]