

## **CAPÍTULO 3 - CONCEITUAÇÕES ESTATÍSTICAS E DETERMINÍSTICAS**

Neste capítulo serão apresentadas conceituações estatísticas de pequena e larga escala que serão amplamente utilizadas neste trabalho. Em seguida, serão apresentados os modelos de camadas superpostas desenvolvidos por Tamir e por Lang, para ambientes de floresta.

### **3.1 ESTATÍSTICAS DE PEQUENA ESCALA E DE LARGA ESCALA**

O sinal recebido por um Sistema de Comunicações Móveis Celulares sofre a influência de um grande número de fatores tornando difícil o tratamento determinístico do mesmo, sendo mais adequado, portanto, o tratamento estatístico e a interpretação dos resultados como eventos aleatórios que ocorrem com uma dada probabilidade. Estudos experimentais realizados tem mostrado que, ao contrário do que se supõe, para pequenas áreas a variabilidade do sinal não segue a distribuição de Rayleigh[1]. Para as grandes áreas, a distribuição de Suzuki tem sido utilizada. O Campo de Santana, onde foram realizadas as medições, apresenta uma pequena área e, portanto, os efeitos do desvanecimento lento não são significativos, podendo ser desprezados. Assim sendo, neste trabalho não será enfatizado este tipo de desvanecimento.

Para se determinar o sinal recebido por uma estação móvel, é necessário que se conheça o seu valor médio, numa área relativamente pequena, e também a sua variabilidade em torno dessa média, o que significa dizer que as flutuações do campo recebido na área em questão ficarão perfeitamente definidas pela caracterização desta variabilidade. As variações do sinal recebido são basicamente de dois tipos [1]:

*-Variações em larga escala ( ou desvanecimento lento ), que são provocadas pelas modificações das características do ambiente, tais como*

relevo, edificações, vegetação, em função do deslocamento da unidade móvel;

*-Variações em pequena escala ( ou desvanecimento rápido )* , que aparecem combinadas com as variações em **larga** escala e são caracterizadas por flutuações profundas do sinal recebido devido à propagação por multipercurso nas imediações da unidade móvel.

Para que se possa caracterizar completamente os desvanecimentos rápidos em uma pequena área de interesse e, em consequência, prever em qual percentagem de área o sinal terá o nível adequado para a recepção, é necessário que se faça uma grande quantidade de medições de variabilidade do sinal nesta área, uma vez que a propagação por multipercurso é não-estacionária por natureza.

Não é uma tarefa simples realizar uma caracterização em larga escala a partir de caracterizações de pequena escala, contudo, tem sido observado que muitos canais rádio-móveis possuem características de desvanecimento que são estacionárias num curto período de tempo ( “ WSS- Wide Sense Stationary ” ) ou para pequenos deslocamentos da unidade móvel ( da ordem de poucas dezenas de comprimentos de onda ). Esta estacionariedade aplica-se, também, no domínio da frequência e, neste caso, os canais são chamados de “ WSSUS - Wide Sense Stationary with Uncorrelated Scatters ”, [2].

As modificações do meio-ambiente em função do deslocamento do móvel resultam na não-estacionariedade das características estatísticas do multipercurso. Como o Campo de Santana, onde foram realizadas as medições de interesse deste trabalho, pode ser considerado uma pequena área para fins de estudos estatísticos, os efeitos do desvanecimento lento no sinal recebido podem ser desprezados e, em consequência, os

desvanecimentos rápidos deverão ser os principais causadores das variações do sinal em torno de sua média. As estatísticas de pequena e larga escala serão vistas a seguir.

### 3.1.1 ESTATÍSTICA DE PEQUENA ESCALA

Uma unidade ou usuário móvel raramente está em linha-de-visada com a estação rádio-base e, em consequência, o sinal recebido é composto de sinais refletidos, refratados e difratados no meio que o circunda. Isto provoca a mudança das características do sinal resultante e conduz à conclusão que a função densidade de probabilidade da envoltória do sinal segue a distribuição de Rayleigh para fases uniformemente distribuídas. Esta distribuição é dada pela seguinte expressão, [3,4]:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad x > 0 \quad (3.1)$$

Portanto, o modelo de espalhamento descreve a estatística local da envoltória do sinal recebido em função de um único parâmetro  $\sigma$  (valor modal). O valor médio e o valor médio quadrático são dados pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} \overline{x} &= \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \\ \overline{x^2} &= 2\sigma^2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Para facilitar a comparação da distribuição de Ráyleigh com medidas experimentais, que são normalmente realizadas em escala logarítmica, é possível reescrevê-la nesta escala através da transformação  $y = 20 \log x$ :

$$p(y) = \frac{1}{2M\sigma^2} \exp\left[\frac{y}{M} - \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(\frac{y}{M}\right)\right] \quad (3.3)$$

$$\text{onde } M = \frac{10}{\ln 10} = 4.34$$

A média e o valor médio quadrático são dados pelas seguintes expressões:

$$\overline{y} = M[\ln(2\sigma^2) - \gamma]$$

$$\overline{y^2} = M^2 \left\{ [\ln(2\sigma^2) - \gamma]^2 + \frac{\pi^2}{6} \right\} \quad (3.4)$$

Nas equações acima,  $\gamma = 0.5772$  é a constante de Euler. As relações entre os momentos acima dados pelas expressões (3.2) e (3.4) são:

$$\overline{y} = 20 \log \overline{x} - 1.46 \quad [dB]$$

$$\overline{y^2} = \left( 10 \log \overline{x^2} - 2.51 \right)^2 - 31 \quad [dB^2] \quad (3.5)$$

Em algumas circunstâncias, entretanto, particularmente quando há visada direta entre o transmissor e o receptor ou uma reflexão especular de grande intensidade, é possível que haja um sinal dominante e os desvanecimentos profundos deverão ocorrer em menor escala. Nestes

casos, a melhor distribuição para a envoltória do sinal é a Riceana, que é dada pela seguinte expressão[5]:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xs}{\sigma^2}\right) \quad x > 0 \quad (3.6)$$

onde  $s$  é a amplitude do sinal dominante e  $I_0(.)$  é a função modificada de Bessel de primeiro tipo e ordem zero. É possível expressar a distribuição Riceana em função de seu fator  $K = s^2/2\sigma^2$ , devido às interpretações físicas que possibilita [6,7]. Este fator é definido pela relação entre a potência do sinal dominante e a potência dos sinais espalhados. É importante notar que se  $K \rightarrow 0$  a distribuição Riceana tende para a distribuição de Rayleigh e se  $K \gg 1$  tende para a distribuição Gaussiana.

Seus valores médio e médio quadráticos são dados pelas seguintes expressões:

$$\overline{x} = \exp\left(-\frac{K}{2}\right) \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[ (1+K)I_0\left(\frac{K}{2}\right) + KI_1\left(\frac{K}{2}\right) \right]$$

$$\overline{x^2} = s^2 + 2\sigma^2 \quad (3.7)$$

onde  $I_1(.)$  é a função modificada de Bessel de primeiro tipo e primeira ordem. Em escala logarítmica tem-se:

$$p(y) = \frac{1}{2M\sigma^2} \exp\left\{\frac{y}{M} - \frac{1}{2\sigma^2} \left[ s^2 + \exp\left(\frac{y}{M}\right) \right] \right\} I_0\left[\frac{s}{\sigma^2} \exp\left(\frac{y}{2M}\right)\right] \quad (3.8)$$

Outras distribuições são também utilizadas para modelar o desvanecimento multipercurso, como a distribuição de Nakagami [8] que representa a envoltória do sinal recebido por uma distribuição Qui-quadrada central com  $m$  graus de liberdade e é dada pela seguinte expressão:

$$p(x) = 2 \left( \frac{m}{\Omega} \right)^m \frac{x^{2m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right) \quad m > \frac{1}{2}, \quad x > 0 \quad (3.9)$$

onde  $\Gamma(\cdot)$  é a Função Gama e os valores médios quadráticos são dados pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} \overline{x} &= \frac{1}{\Gamma(m)} \sqrt{\frac{\Omega}{m}} \Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right) \\ \overline{x^2} &= \Omega \end{aligned} \quad (3.10)$$

As distribuições de Rice e Nakagami podem ser relacionadas [9] pelos seus parâmetros através da seguinte expressão  $m = (K + 1)^2 / (2K + 1)$ . Note que a distribuição de Rayleigh é um caso especial da distribuição de Nakagami com  $m=1$ .

Em escala logarítmica tem-se:

$$p(y) = \frac{1}{M\Gamma(m)} \left( \frac{m}{\Omega} \right)^m \exp\left[ \frac{my}{M} - \frac{m}{\Omega} \exp\left(\frac{y}{M}\right) \right] \quad (3.11)$$

onde:

$$\overline{y} = M \left[ \ln \left( \frac{\Omega}{m} \right) + \psi(m) \right]$$

$$\overline{y^2} = M^2 \left\{ \left[ \ln \left( \frac{\Omega}{m} \right) + \psi(m) \right]^2 - \zeta(2, m-1) \right\} \quad (3.12)$$

Nas expressões acima  $\psi(m)$  é a função Digamma e  $\zeta(z, q)$  é a função Zeta de Riemann.

### 3.1.2 ESTATÍSTICA DE LARGA ESCALA

Conforme foi visto anteriormente, as variações em larga escala do sinal recebido, também conhecidas como sombreamento, são provocadas pelas modificações das características do ambiente em função do deslocamento da unidade móvel e são melhor representadas pela distribuição log-normal, que é dada pela expressão abaixo:

$$p(\overline{x}) = \frac{1}{x \xi \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-\left( \ln \overline{x}/x_0 \right)^2}{2\xi^2} \right] \quad (3.13)$$

onde:

$$\langle \overline{x} \rangle = x_0 \exp(\xi^2/2)$$

$$\left\langle \frac{1}{x^2} \right\rangle = x_0^2 \exp(2\xi^2) \quad (3.14)$$

Utilizando-se a escala logarítmica tem-se:

$$p(\bar{y}) = \frac{1}{v\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(\bar{y}-\mu)^2}{2v^2}\right] \quad (3.15)$$

onde:

$$\langle \bar{y} \rangle = \mu = 2M \ln x_0 + A$$

$$\left\langle \frac{1}{\bar{y}^2} \right\rangle - \langle \bar{y} \rangle^{-2} = v^2 = 4M^2 \xi^2 \quad (3.16)$$

onde  $A$  é uma constante.

Nas situações em que são conhecidas as distribuições devidas aos desvanecimentos lento e rápido, a distribuição de Suzuki [10,11], que considera a distribuição de Rayleigh para o desvanecimento rápido condicionando seu valor médio a ser log-normalmente distribuído, pode ser utilizada para combinar os dois efeitos.

Segundo Suzuki, combinando as equações (3.1) e (3.13) tem-se:

$$p(x|\sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma\xi\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(\ln \sigma/\sigma_0)^2}{2\xi^2}\right]$$

onde  $\sigma$  foi utilizado como o termo que representa o desvanecimento rápido ao invés de  $\bar{x}$ , definido na equação (3.2). Utilizando-se a regra de probabilidade condicionada tem-se:

$$p(x) = \int_0^{\infty} p(x|\sigma)p(\sigma)d\sigma \quad (3.17)$$

$$p(x) = \int_0^{\infty} \frac{xM}{10\lambda\sigma^3\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left[\frac{-(\log \sigma/\sigma_0)^2}{2\lambda^2}\right] d\sigma \quad (3.18)$$

onde  $M\xi/10 = \lambda$ , e

$$\bar{x} = \sigma_0 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(\frac{100\lambda^2}{2M^2}\right) \quad (3.19)$$

$$\bar{x}^2 = 2\sigma_0^2 \exp\left[\frac{200\lambda^2}{M^2}\right]$$

Usando-se a transformação logarítmica e a sugestão de Lorentz [12], tem-se:

$$p(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{M} \exp\left[\frac{(y-y_{oR})}{M} - \exp\left(\frac{y-y_{oR}}{M}\right)\right] \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(y_{oR}-y_{os}+\frac{s^2}{2M})^2}{2s^2}\right] dy_{oR} \quad (3.20)$$

onde:

$$y = 20 \log x$$

$$\begin{aligned}
y - y_0 &= 10 \log \frac{x^2}{x^2} \\
y_{oR} &= 10 \log(2\sigma^2) \\
y_{os} &= 10 \log[2\sigma_0^2 \exp(200\lambda^2/M^2)] \\
s &= 20\lambda
\end{aligned}
\tag{3.21}$$

Os parâmetros são determinados utilizando-se a média da envoltória do sinal e o valor médio quadrático:

$$\begin{aligned}
\lambda &= \frac{M}{10} \sqrt{\ln\left(\frac{\overline{\pi x^2}}{4 \overline{x^2}}\right)} \\
\sigma_0 &= \sqrt{\frac{8}{x^2} \frac{x}{\pi}}
\end{aligned}
\tag{3.22}$$

## 3.2 MODELOS DE CAMADAS SUPERPOSTAS

### 3.2.1 MODELO IDEALIZADO DE TAMIR

A necessidade de se caracterizar a propagação das ondas de rádio em ambientes cobertos por florestas tem motivado a realização de inúmeros testes experimentais. O principal objetivo a ser atingido é o desenvolvimento de técnicas de previsão da atenuação de propagação num enlace onde o receptor está separado do transmissor num percurso parcialmente ou completamente coberto por vegetação. As atenuações envolvidas nestas situações são derivadas da caracterização da floresta como uma camada dissipativa, sobreposta a um condutor imperfeito (a terra).

O modelo básico de camadas [14-20] está ilustrado na figura 3.1, onde os dipolos de TX e de RX estão localizados em  $(0, z_0)$  e  $(x, z)$ , respectivamente. Os meios são caracterizados pelo índice de refração  $n$  para floresta e  $N$  para o solo.

Estudos anteriores realizados por Brekhovskikh [14] mostraram que para grandes distâncias o campo eletromagnético se comporta como uma onda lateral que pode ser descrita por um raio que começa na fonte T e incide sobre a interface ar-floresta com um ângulo crítico de reflexão total  $\theta_c = \sin^{-1}(1/n)$ . A onda é refratada para o ar e se propaga ao longo da interface ar-floresta. A energia retorna para o interior da floresta com um ângulo crítico de reflexão, atingindo o receptor ao longo do raio BR. O percurso total da onda lateral é dado por TABR, conforme está mostrado na figura 3.2, onde se observa que a maior parcela do percurso (AB) fica na superfície de separação ar-floresta, onde a onda lateral é bem menos atenuada.

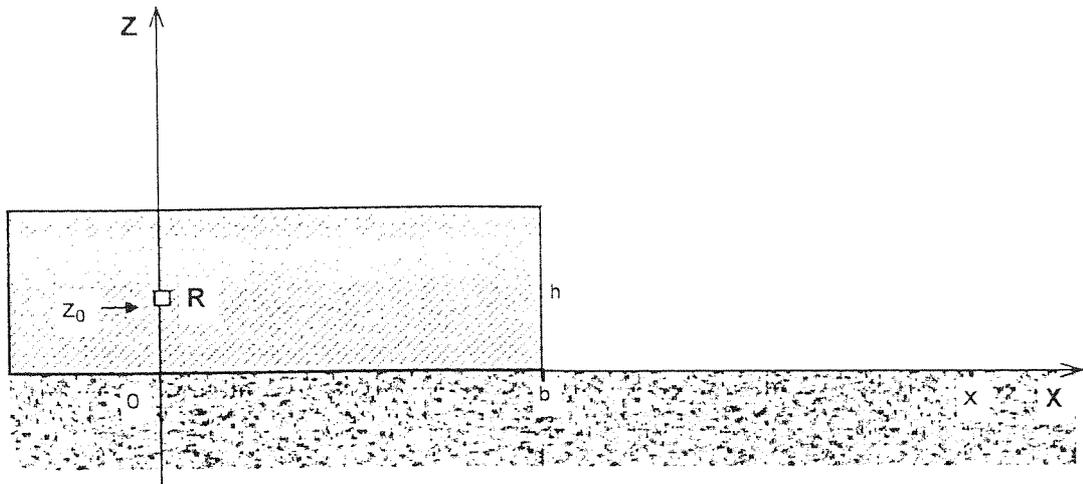


Fig. 3.1 Modelo Básico de Camadas

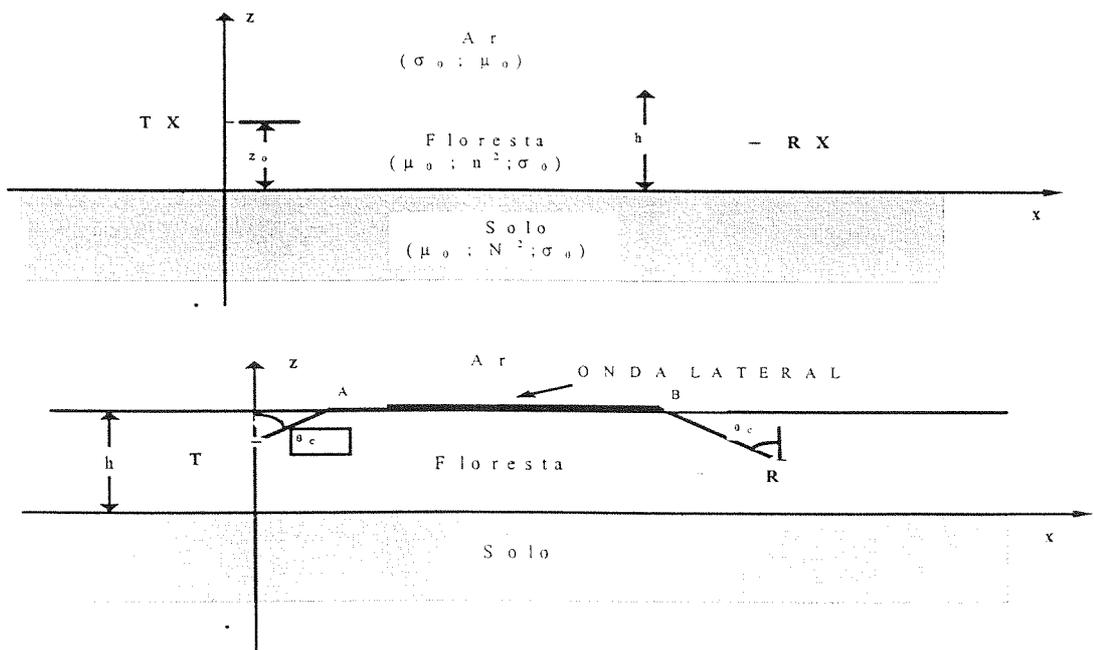


Fig. 3.2 - Geometria ar-floresta-solo e a onda lateral

Se o transmissor ou o receptor estiverem fora da floresta, o sinal não necessariamente chegará ao receptor por onda lateral e sim por refração e reflexões da onda. Dependendo da localização do receptor, quatro situações canônicas existem, cada qual caracterizada por um tipo diferente de mecanismo de propagação, conforme mostra a figura 3.3. Estas situações correspondem ao ponto de recepção colocado: I – No interior da camada de vegetação; II - No ar, acima da vegetação; III - A uma altura relativamente grande, acima da região descoberta e IV - A uma altura relativamente pequena, acima da região descoberta. Para o interesse deste trabalho, o campo na região I não é pertinente e portanto não será considerado.

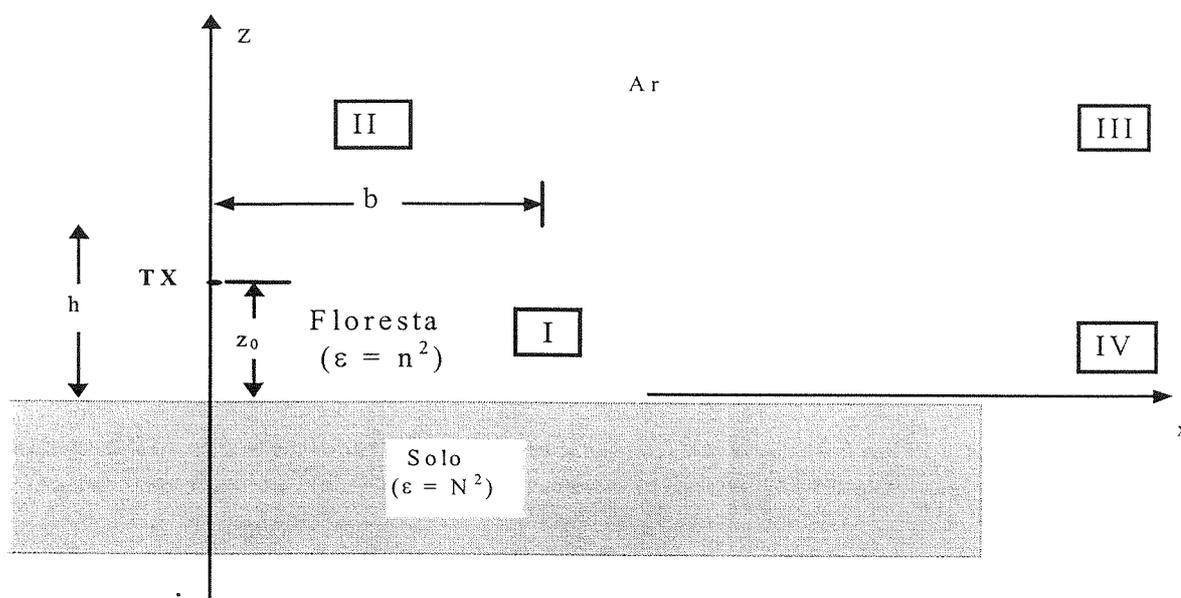


Fig.3.3 – As quatro situações canônicas para o modelo Ar-Floresta- Solo

A seguir serão apresentadas as expressões para o campo elétrico nas regiões II, III e IV acima definidas.

### 3.2.1.1- CAMPO NA REGIÃO II

Para o ponto de observação R colocado acima da floresta, a geometria utilizada é apresentada na figura 3.4. Neste caso, para grandes distâncias ( $r \gg h$ ), contribuições de primeira ordem do ponto de sela[14] conduzem aos seguintes resultados, obtidos da ótica-geométrica:

$$E_{11}^{(0)} = \frac{120\pi i I a p}{m \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \frac{1 + B(\theta, z_0)}{1 - \gamma(\theta) B(\theta, h)} \cdot \frac{e^{ik[r + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}(h - z_0)]}}{\lambda r} \cos \theta \quad (3.23)$$

onde  $r$  e  $\theta$  estão indicados na figura 3.4,  $Ia$  é o momento-dipolo,  $k = 2\pi/\lambda$  é o número de onda no ar e:

$$\gamma(\theta) = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - m \cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} + m \cos \theta} \quad (3.24)$$

$$p = \begin{cases} 1, & \text{para a polarização horizontal} \\ \sin^2 \theta, & \text{para a polarização vertical} \end{cases}$$

$$F(\theta, z) = \frac{1 + B(\theta, z)}{1 - B(\theta, h)} \quad (3.25)$$

$$B(\theta, z) = \Gamma(\theta) e^{2ikz\sqrt{n^2-1}} \quad (3.26)$$

$$\Gamma(\theta) = \frac{M(n^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} - m(N^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}}{M(n^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} + m(N^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (3.27)$$

$M=m=1,$  para a polarização horizontal

$M=N^2 ; m=n^2$  para a polarização vertical

O termo  $\Gamma(\theta)$  é um coeficiente de reflexão no solo ( em  $z=0$  ) para uma onda plana incidente com um ângulo  $\theta$  num meio coberto por vegetação.

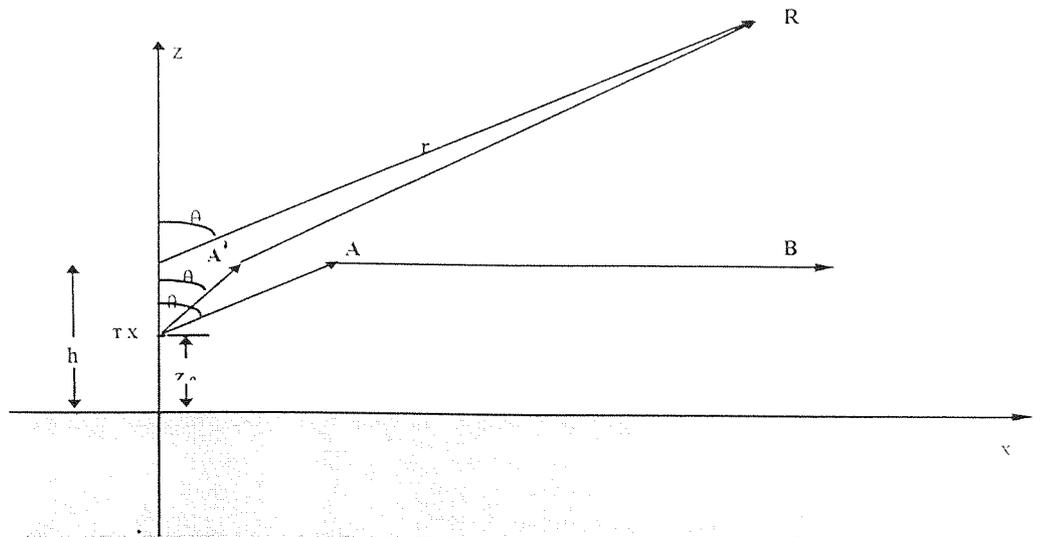


Fig. 3.4 – Geometria de raios para a região II

O campo  $E_{II}^{(0)}$  representa uma onda refratada, como mostra o raio TA'R da figura 3.4, que é uma das componentes do campo total  $E_{II}$ . O fato deste campo ser obtido através da ótica geométrica é evidenciado pela sua dependência com  $r^{-1}$  e pela exponencial da equação 3.23. Em particular nota-se que  $E_{II}^{(0)}$  é proporcional a  $\cos \theta$  e, portanto, desaparece na interface floresta-ar ( $z=h$ ,  $\theta=90^\circ$ ). Para pontos na vizinhança  $\theta = 90^\circ$  uma contribuição de segunda ordem[14] é produzida e é dada por:

$$E_{II}^{(1)} = E_{II}^{(0)} \frac{im \sin \theta}{kr\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} F(\theta, h) \tan \theta. \quad (3.28)$$

Observa-se que  $E_{II}^{(1)}$  é exatamente igual à onda lateral [14] para todos os pontos ao longo da interface floresta-ar ( $z = h$ ) e, conseqüentemente, pode ser entendido como uma continuação da onda lateral na região acima da vegetação, conforme está indicado pelo raio pontilhado BR na figura 3.4. Como este campo varia com  $r^{-2}$  enquanto que  $E_{II}^{(1)}$  varia  $r^{-1}$ ,  $E_{II}^{(1)}$  é significativo, apenas, para ângulos próximos de  $\theta = 90^\circ$  e, neste caso,  $\cotg\theta \cong \cos\theta = H/r \ll 1$ , onde  $H = (z - h)$ . Introduzindo estas aproximações nas equações acima,  $E_{II}^{(0)}$  e  $E_{II}^{(1)}$  ficam de magnitude similar na altura  $H_c$  acima do topo das árvores; dada por:

$$H_c / \lambda = |mF(90^\circ, h) / 2\pi(n^2 - 1)^{1/2}| \quad (3.29)$$

A altura  $H_c$  pode ser entendida como um plano horizontal posicionado acima do topo das árvores. Conseqüentemente, a onda lateral  $E_{II}^{(1)}$  é dominante para  $H < H_c$ , considerando que o campo refratado  $E_{II}^{(0)}$  produz contribuições principais para alturas  $H = z - h > H_c$ .

### 3.2.1.2 - CAMPO NA REGIÃO III

O campo para alturas  $z \gg h + H_c$  acima do topo das árvores, localizadas na região III é dado pelo raio refratado conforme está mostrado no ítem anterior conforme está ilustrado na figura 3.5, onde pode ser observado que o raio TA'R se prolonga na região II. Neste caso, o campo  $E_{II}$  é dada por:

$$E_{III} = E_{II}(0) \quad (3.30)$$

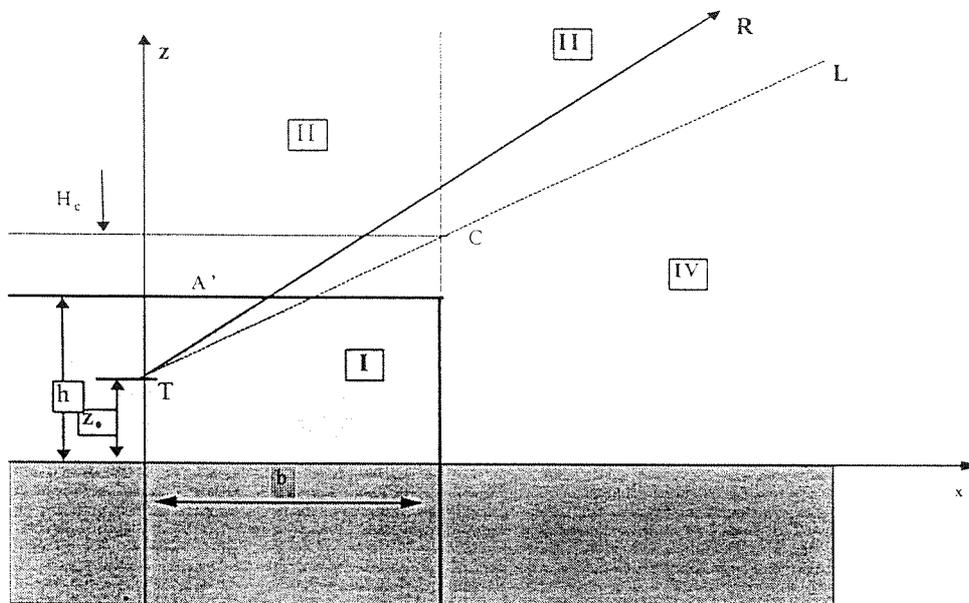


Fig. 3.5 – Geometria para determinação do campo na região III

Devido às várias aproximações envolvidas, o domínio de validade da equação 3.30 acima não fica perfeitamente definido. Entretanto, uma razoável

estimativa para a fronteira inferior da região III é dada pelo raio TCL mostrado na figura 3.5, que é aproximadamente horizontal.

### 3.2.1.3 - CAMPO NA REGIÃO IV

Para pontos de observação R perto ou abaixo do raio limite TCL mostrado na figura 3.5, o campo não pode ser obtido por extensão dos resultados anteriores. Isto acontece porque a região IV é uma região de sombra para as contribuições dos raios obtidos por ótica-geométrica e, conseqüentemente, o sinal chega nesta região por difração e reflexões no ambiente. No entanto, considerando que a camada de vegetação atua como um dielétrico “fraco” ( $n \cong 1$ ), simplificações podem ser feitas para se obter uma estimativa para a amplitude do campo na região IV.

Para se avaliar o campo recebido nesta região, é conveniente inverter-se o problema considerando-se o campo no ponto T produzido por um dipolo localizado num ponto R. Referindo-se à figura 3.6, o campo na vizinhança da borda da floresta (ponto B), é devido ao raio direto RB e ao raio refletido na superfície RGB. Nas situações práticas de interesse deste trabalho, h e z são muito menores que a distância x-b (se x - b for comparável a h e z, o campo em R será igual a  $E_1$ , porque  $x \cong b \gg h$ ). Para  $(x - b) \gg h$ , os dois raios BR e BGR são rasantes, isto é,  $\theta_1 \cong \theta_2 \cong 90^\circ$ . O campo na borda da floresta, ou seja, no ponto B, é dado pelas condições tangenciais. Este campo é função do comprimento dos raios RB e RGB, e  $\theta_2 \cong 90^\circ$ . Realizando-se algumas manipulações matemáticas conclui-se que  $E_{IV}$  varia essencialmente com  $(x - b)^2 \exp [jk(x - b)]$  para pontos de  $z_0 = h$ , na vizinhança de B. Isto significa que o campo  $E_{IV}$  se comporta como uma onda lateral como se a floresta se

prolongasse para a direita de B, naquela área descoberta. O campo na região IV pode ser determinado a partir da seguinte expressão[14]:

$$\begin{aligned}
 E_{IV} = & -60\pi i a \frac{1 + B(90^\circ, z_0)}{1 + B(90^\circ, h)} \frac{e^{ik[x + \sqrt{n^2 - 1}(h - z_0)]}}{x^2} \\
 & \cdot \left( \frac{r_0}{\lambda} \right) \left\{ \frac{p_1 r_0}{r_1} e^{-ikzh/r_0} + \frac{p_2 r_0}{r_2} e^{ikzh/r_0} \right. \\
 & \cdot \left. \left[ \Gamma(\theta_2) + i \frac{2M}{N^2 - 1} \frac{1}{kr_2} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

$$p_{1,2} = \begin{cases} 1, & \text{para a polarização horizontal} \\ \sin^2 \theta_{1,2}, & \text{para a polarização vertical} \end{cases}$$

onde:

$$\begin{aligned}
 \Gamma(\theta_2) &= \frac{M \cos \theta_2 - \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta_2}}{M \cos \theta_2 + \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta_2}} \\
 &\cong -1 + \frac{2M}{\sqrt{N^2 - 1}} \frac{z + h}{r_2} .
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

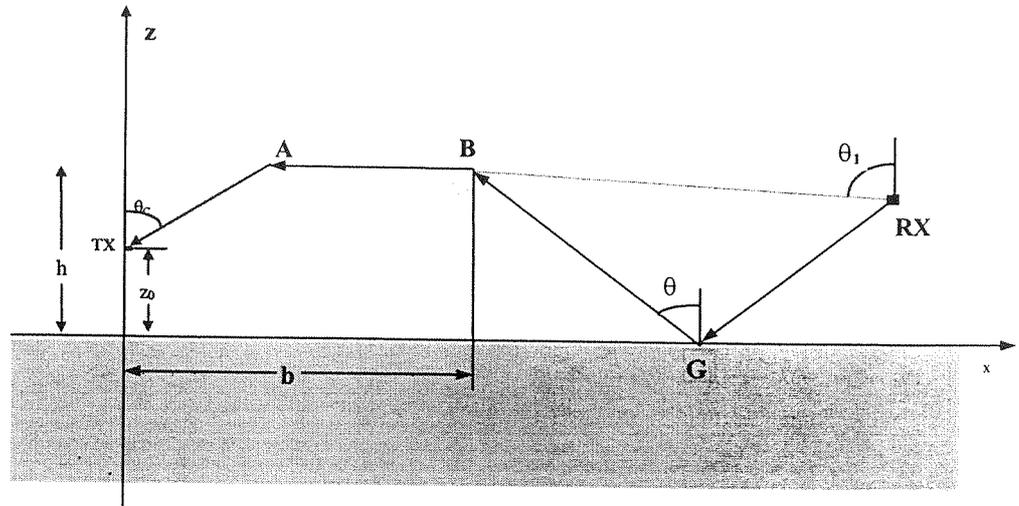


Fig. 3.6- Geometria para determinação do campo na região IV

### 3.2.2 MODELO IDEALIZADO DE LANG

O objetivo do trabalho desenvolvido por Lang[22] é o estabelecimento da relação entre o sinal recebido por um radar, após sua reflexão numa região coberta por vegetação, e as características da vegetação e do solo.

O modelo desenvolvido por Lang considera a vegetação composta por folhas que são modeladas por discos circulares dissipativos, com uma dada distribuição de orientação angular e utiliza uma aproximação de duas variáveis para modelar uma camada de folhas colocadas sobre a terra. Este modelo

emprega a técnica desenvolvida por Foldy [ 25] para determinar uma equação aproximada para o campo médio válido quando o volume fracional dos espalhadores é pequeno. Em função deste campo médio, é determinada uma constante dielétrica para a região de espalhamento, bem como sua profundidade de penetração.

O modelo de três camadas utilizado por Lang para determinação do espalhamento de ondas eletromagnéticas está apresentado na figura 3. 7 onde se observa que a camada de vegetação tem espessura  $d$ ,  $k$  é a onda plana incidente,  $\mathbf{h}^0$  e  $\mathbf{v}^0$  são os vetores polarização e  $\theta_0$  é o ângulo de incidência. A densidade dos espalhadores  $\rho$  é considerada constante.

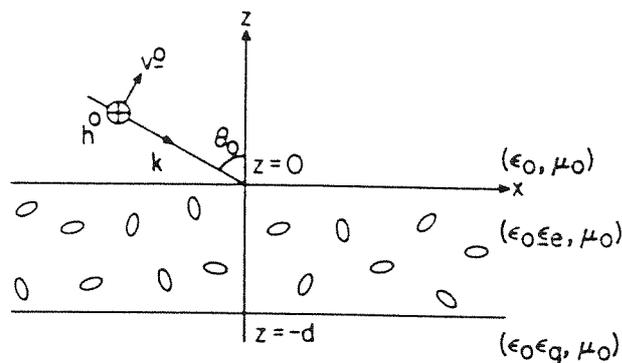


Fig. 3. 7 – Geometria de três camadas para o modelo de Lang

O conhecimento da profundidade de penetração (“skin depth”) proporciona um bom entendimento do comportamento do campo médio no interior da vegetação e pode ser determinado a partir da seguinte expressão:

$$\text{Profundidade de penetração} = \begin{cases} \frac{2 \cos \theta_0}{\delta k_0 \operatorname{Im} \bar{a}_{yy}}, & h \text{ polarization} \\ \frac{2 \cos \theta_0}{\delta k_0 (\operatorname{Im} \bar{a}_{xx} \cos^2 \theta_0 + \operatorname{Im} \bar{a}_{zz} \sin^2 \theta_0)} & v \text{ polarization} \end{cases} \quad (3.33)$$

onde:

$$\bar{a}_{xx} = \bar{a}_{yy} = (a_r \overline{\sin^2 \theta} + a_\theta \overline{\cos^2 \theta} + a_\phi) \quad (3.34)$$

$$\bar{a}_{zz} = a_r \overline{\cos^2 \theta} + a_\theta \overline{\sin^2 \theta}. \quad (3.35)$$

$\delta$  – é o volume ocupado pelas partículas (folhas), que é obtido multiplicando-se a densidade das partículas pelo seu volume.

No que pese o modelo de Lang ter sido desenvolvido para sensoriamento remoto em áreas de vegetação não-urbanas e considerando que as análises estatísticas realizadas, que serão apresentadas no capítulo 5, indicam que no interior da vegetação típica dos parques há a contribuição de sinais incoerentes, particularmente quando a antena de transmissão está colocada a baixas alturas, é possível que este modelo seja útil para caracterizar o campo recebido nestas situações. Entretanto, a comprovação experimental deste modelo, utilizando a massa de dados adquirida no Campo de Santana, não é possível pois, como será visto, em diversas situações aparece um raio dominante coerente.

## REFERÊNCIAS

- [1] J.D.Parsons and M.F.Ibrahim, "Signal strength prediction in built-up areas. Part 2: Signal variability", IEE Proceedings, **130**, Pt.F, No.5, pp. 385-391, 1983.
- [2] P.A.Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels", IEEE Transaction on Communication Systems, **CS-11**, pp. 360-393, 1963.
- [3] R.H.Clarke, "A statistical theory of mobile radio reception", Bell System Technical Journal, **47**, pp. 957-1000, 1968.
- [4] T.Aulin, "A modified model for the fading signal at a mobile radio channel", IEEE Transaction on Vehicular Technology, **VT-28**, pp. 182-203, 1979.
- [5] S.O.Rice, "Statistical properties of a sine wave plus random noise", Bell System Technical Journal, **27**, pp. 109-157, 1948.
- [6] W.C.Y Lee, *Mobile Communication Engineering*, McGraw-Hill, 1982.
- [7] T.S.Rappaport, *Wireless Communication Principles and Practice*, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [8] M.Nakagami, "The m distribution; a general formula of intensity distribution of rapid fading", Statistical Methods in Radio Wave Propagation, W.G.Hoffman, ed., Pergamon Press, pp. 99-124, 1960.
- [9] S.A.Abbas and A.U.Sheikh, "A Geometric Theory of Nakagami Fading Multipath Mobile Radio Channel with Physical Interpretations", IEEE VTS 46th Vehicular Technology Conference Proceedings, Vol. 2, pp 637-641, Atlanta USA, 1996.
- [10] H.Suzuki, "A statistical model for urban radio propagation", IEEE Transaction on Communication, **COM-25**, pp. 673-680, 1977.
- [11] F.Hansen and F.I.Meno, "Mobile radio fading - Rayleigh and log-normal superimposed", IEEE Transaction on Vehicular technology, **VT-26**, pp. 332-335, 1977.

- [12] R.W.Lorentz, "Theoretical distribution functions of multipath fading processes in the mobile radio and determination of their parameters by measurements", Technischer Bericht 455, **TBr 66**, Forschungsinstitut der Deutschen Bundespost, 1979. (in German)
- [13] A. Mehrotra, Cellular Radio: Analog and Digital Systems. USA.: Artech House, 1994
- [14] L. M. Brekhovskikh, Waves in Layered Media, New York: Academic Press, Inc., 1960.
- [15] T. Tamir and L. B. Felsen "On Lateral Waves in Slab Configuration and Their Relation to Other Wave Types," IEEE Trans. Antenna Propagat., pp. 410-422, 1965.
- [16] T. Tamir, "Nature and Optimisation of the Ground ( Lateral ) Wave Excited by Submerged Antennas ," proc. IEE, vol.113, NO. 8, pp. 1299-1310, 1966.
- [17] T. Tamir, "On Radio-Wave Propagation in Forest Environments," IEEE Trans. Antenna Propagat., pp. 806-817, 1967.
- [18] D. Dence e T. Tamir, "Radio Loss of Lateral Waves in Forest Environments," Radio Science, vol. 4, NO. 4, pp. 307-318, 1969.
- [19] T. Tamir, "Lateral Wave Applications to Radio Systems, " paper presented at Workshop on Radio Systems in Forested and/or Vegeted Environments, " US Army Communications Command, Fort Huachuca, Arizona, 1973.
- [20] T. Tamir, "Radio Wave Propagation Along Mixed Paths in Forest Environments," IEEE Trans. Antenna Propagat., vol. AP-25, NO. 4, 1977.
- [21] R. H. Lang, "Electromagnetic Backscattering from a Sparse Distribution of Lossy Scatterers," Radio Sci., vol.16, NO.1, pp 15-30, 1981.

- [22] R. H. Lang e J. S. Sidhu, "Electromagnetic Backscattering from a Layer of Vegetation: A Discrete Approach," IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sensing, vol. GE-21, NO.1, pp. 62-71, 1983.
- [23] M. A. Karam, A. K. Fung, R. H. Lang e N. S. Chauhan, "A Microwave Scattering Model for Layered Vegetation," IEEE Trans. Geosc. and Remote Sensing, vol.30, NO.4, 1992.
- [24] S. A. Torrico, H. L. Bertoni e R. H. Lang, "Theoretical Investigation of Foliage Effects on Path Loss for Residential Environments, " IEEE Trans. Antenna Propagat. pp. 854-858, 1996.
- [25] L. Foldy, "The multiple scattering of waves", Phys. Rev. , Vol. 67, no. 3, pp. 107-119, 1945.