

3.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar pontos importantes a respeito da propagação das para radioenlaces ponto-a-ponto nas faixas de UHF e SHF. Os tópicos abordados neste capítulo são:

- Propagação no espaço livre;
- Zonas de Fresnel e atenuação por obstáculo;
- Propagação na Troposfera;
- Modelo de referência para análise de desempenho em radioenlaces ponto-a-ponto;
- Atenuação provocada pela chuva.

O conteúdo de cada tópico não tem a pretensão de esgotar o assunto, mas apenas apresentar as características intrínsecas da propagação que influenciam no desempenho dos radioenlaces ponto-a-ponto a partir da faixa de UHF. Para um estudo mais detalhado de propagação, recomenda-se recorrer às publicações citadas nas *Referências Bibliográficas* apresentadas no final do capítulo.

3.2. PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE

Até aqui foram apresentadas as propriedades das ondas eletromagnéticas como frente de onda plana, Entretanto, em sistemas de rádio comunicação, onde a propagação de ondas eletromagnéticas ocorre no espaço livre e/ou através da atmosfera terrestre, pressupõe o uso de transmissores e receptores ligados às suas antenas de transmissão e recepção, respectivamente. A relação entre a potência de recepção e a antena de transmissão é estabelecida, usualmente, assumindo-se que uma transmissão a partir de uma fonte omnidirecional que irradia uniformemente sobre 4π esterradianos, isto é, uma fonte omnidirecional gera frente de ondas esféricas. A densidade de potência $p(d)$ sobre uma esfera hipotética distante d metros da fonte é relacionada com a potência de transmissão P_{Ti} em Watts por meio de

$$p(d) = \frac{P_{Ti}}{4\pi d^2} \quad (3.1)$$

uma vez que $4\pi d^2$ é a área da esfera. A potência total, P_R , obtida por uma antena de recepção pode ser escrita como

$$P_{Ri} = p(d)A_{er} = \frac{P_{Ti}A_{er}}{4\pi d^2} \quad (3.2)$$

onde o parâmetro A_{er} é a área efetiva da antena de recepção, definida por

$$A_{er} = \frac{\text{potência total recebida}}{\text{densidade de fluxo de potência incidente}} \quad (3.3)$$

conforme mostrado na Figura 3.1. Se a antena de recepção também é um radiador isotrópico, então a área de recepção é determinada por

$$A_{er} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (3.4)$$

onde λ é o comprimento de onda da portadora.

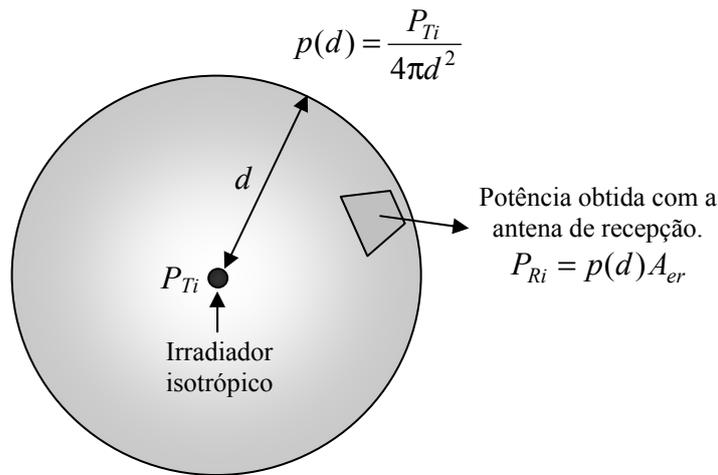


Figura 3.1 – Potência recebida em função da distância da fonte.

Substituindo (3.4) em (3.2) e substituindo o comprimento de onda pela velocidade da luz dividida pela frequência pode-se determinar a relação entre a potência transmitida e a potência recebida, também conhecida como perda no espaço livre, L_e , ou seja,

$$A_e = \frac{P_{Ti}}{P_{Ri}} = \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2 \quad (3.5)$$

Para a determinação da perda no espaço livre em dB e valores de d e f em km e GHz , respectivamente, a Equação 3.46 torna-se

$$A_e = 92,44 + 20 \log(d \cdot f) \quad (3.6)$$

Exemplo 3.1

Considere um enlace de 36.000 km da terra para um satélite geoestacionário que opera em 4 GHz. Determine a atenuação no espaço livre considerando que as antenas de transmissão e de recepção são antenas isotrópicas.

Solução:

A atenuação no espaço livre pode ser determinada aplicando-se diretamente (3.6):

$$A_e = 92,44 + 20 \log(df) = 92,44 + 20 \log(36.000 \times 4)$$

$$A_e = 195,61 \text{ dB}$$

* * *

3.3. DIFRAÇÃO E ZONAS DE FRESNEL

A propagação das ondas eletromagnéticas em um meio ilimitado e sem perda considerando a presença de obstáculos pode ser entendida a partir do princípio de Huygens. Este princípio pode ser resumido segundo os dois pontos apresentados a seguir [2].

1. Cada elemento de uma frente de onda em um determinado instante de tempo pode ser considerado o centro de uma fonte secundária que gera frentes de ondas esféricas.
2. A posição da frente de onda em qualquer posição no tempo é a envoltória de todas as frentes de ondas esféricas.

Este princípio está ilustrado na Figura 3.2 e explica o fenômeno da difração.

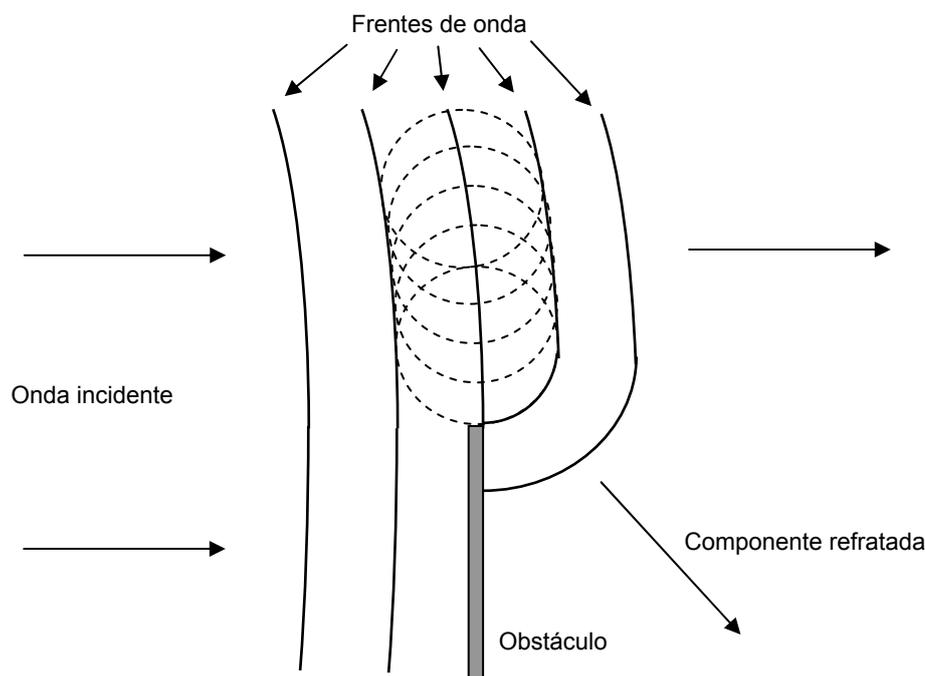


Figura 3.2 - Princípio de Huygens e difração.

Uma consequência direta do princípio de Huygens são as zonas de Fresnel. As zonas ou elipsóides de Fresnel podem ser entendidos como uma consequência do princípio de Huygens. De acordo com a Figura 3.3, um campo eletromagnético no ponto R é o somatório dos campos produzidos por re-irradiação a partir de uma área circular e perpendicular ao eixo de propagação considerando o deslocamento desta área do ponto de transmissão T até o ponto de recepção R . Assim, os círculos projetados sobre o plano perpendicular que contém a área correspondem aos lugares geométrico dos pontos com $(d' + \lambda/2)$, $(d' + 2\lambda/2)$, ... , $(d' + n$

$\lambda/2$), chamados respectivamente de primeira zona de Fresnel, segunda zona de Fresnel, ... , enésima zona de Fresnel [1]. Nota-se que os círculos projetados sobre o plano perpendicular ao eixo de propagação formam elipsóides que são os lugares geométricos dos pontos de mesma fase do campo eletromagnético gerado por T , na medida em que o plano se desloca do ponto T para o ponto R .

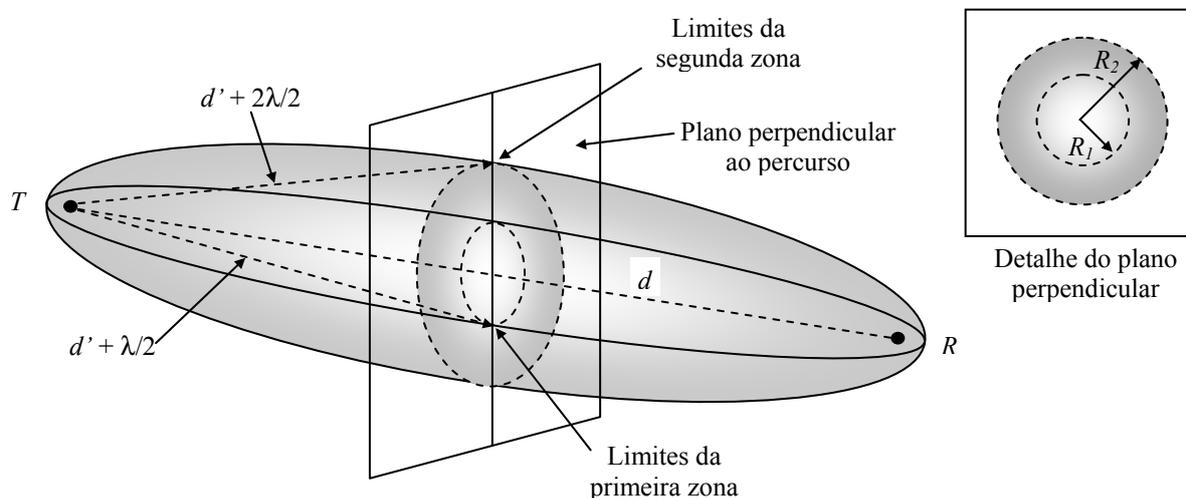


Figura 3.3 - Zonas de Fresnel.

O espaço de propagação é considerado livre de obstáculos quando pelo menos 0,6 do raio da primeira zona de Fresnel (R_1), abaixo da linha de visada, não é invadido por qualquer obstáculo ao longo do percurso. Desta forma o raio aproximado da enésima zona de Fresnel, considerando-se a geometria apresentada na Figura 3.3, pode ser obtido a partir de

$$R_n \cong \sqrt{n\lambda \left(\frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right)}, \quad (3.7)$$

onde d_1 e d_2 são as distâncias do ponto T e do ponto R até a posição do obstáculo. Para a obtenção do raio da primeira zona de Fresnel em metros em função da frequência em GHz e das distâncias em km, a Equação 3.7 torna-se

$$R_1 \cong 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}}. \quad (3.8)$$

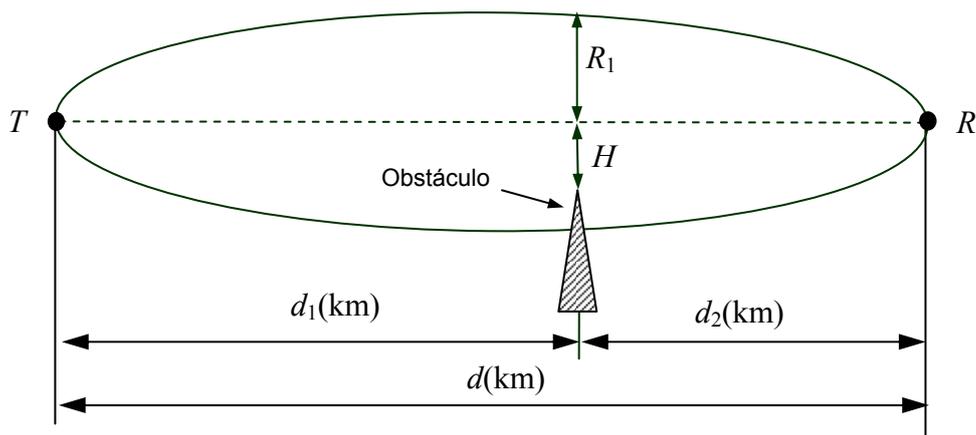


Figura 3.4 - Raio da 1ª Zona de Fresnel na posição do obstáculo.

As perdas por difração em radioenlaces terrestres dependem do tipo de terreno e da vegetação. Para um dado percurso com um único obstáculo as perdas por difração variam de acordo com o formato do obstáculo, sendo que as perdas serão menores para obstáculos com o topo agudo, chamados de *gume de faca*, e maiores para enlaces transhorizonte onde o obstáculo é a própria curvatura da terra.

A atenuação, em dB, para um único obstáculo, do tipo *gume de faca*, no percurso entre o transmissor e o receptor pode ser determinada de forma aproximada pela seguinte equação:

$$A_o(V_1) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(V_1 - 0,1)^2 + 1} + V_1 - 0,1 \right) \quad (3.9)$$

válida para valores de V_1 maiores do que $-0,78$ [3]. O valor de V_1 é simplesmente a relação entre a distância da extremidade do obstáculo até a linha de visada H e o raio da primeira zona de Fresnel R_1 , ou seja,

$$V_1 = \frac{\pm H}{R_1}. \quad (3.10)$$

Quando o obstáculo ultrapassa a linha de visada, H é tomado positivo, caso contrário H é negativo, conforme mostrado na Figura 3.5.

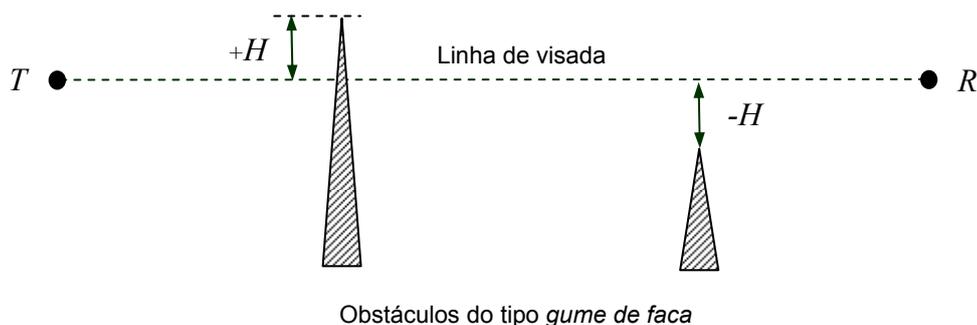


Figura 3.5 - Valores de H em relação à linha de visada.

EXEMPLO 3.2

Considere um radioenlace com extensão de 50 km que apresenta um obstáculo do tipo gume de faca exatamente no meio do percurso. Admita que o cume do obstáculo esteja a 25 metros abaixo da linha de visada. Determine a influência deste obstáculo para as seguintes frequências de operação:

- a) 135 MHz
- b) 900 MHz
- c) 2 GHz

Solução:

- a) Para 135 MHz

$$R_1 \cong 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}} = 17,3 \sqrt{\frac{25 \times 25}{0,135 \times 50}}$$

$$R_1 \cong 166,67 \text{ m}$$

$$V_1 = \frac{H}{R_1} = \frac{-25}{166,67} \cong -0,15$$

$$A_o(V_1) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(V_1 - 0,1)^2 + 1} + V_1 - 0,1 \right) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(-0,15 - 0,1)^2 + 1} - 0,15 - 0,1 \right)$$

$$A_o(V_1) = 4,75 \text{ dB}$$

- b) Para 900 MHz

$$R_1 \cong 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}} = 17,3 \sqrt{\frac{25 \times 25}{0,9 \times 50}}$$

$$R_1 \cong 64,43 \text{ m}$$

$$V_1 = \frac{H}{R_1} = \frac{-25}{64,43} \cong -0,388$$

$$A_o(V_1) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(V_1 - 0,1)^2 + 1} + V_1 - 0,1 \right) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(-0,388 - 0,1)^2 + 1} - 0,388 - 0,1 \right)$$

$$A_o(V_1) = 2,81 \text{ dB}$$

- c) Para 2 GHz

$$R_1 \cong 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}} = 17,3 \sqrt{\frac{25 \times 25}{2 \times 50}}$$

$$R_1 \cong 43,25 \text{ m}$$

$$V_1 = \frac{H}{R_1} = \frac{-25}{43,25} \cong -0,58$$

$$A_o(V_1) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(V_1 - 0,1)^2 + 1} + V_1 - 0,1 \right) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(-0,58 - 0,1)^2 + 1} - 0,58 - 0,1 \right)$$

$$A_o(V_1) = 1,37 \text{ dB}$$

* * *

3.4. PROPAGAÇÃO NA TROPOSFERA

As comunicações feitas próximas à superfície da Terra a partir de UHF ocorrem pelo que se convencionou designar propagação por meio de ondas terrestres. Para o espectro de frequência considerado aqui, a componente mais importante das ondas terrestres é a onda espacial, com trajetória acima da superfície, constituídas, por sua vez pela onda direta e pela onda refletida. A onda direta é formada pela ligação entre a antena transmissora e a antena receptora, sem nenhuma influência de obstáculos que possam influenciar na propagação. Este tipo de comunicação é freqüentemente chamado como *sistema em visada direta*. No entanto, a presença da superfície terrestre pode dar origem à onda refletida que pode afetar fortemente o desempenho de radioenlaces, em particular, radioenlaces digitais. As ondas diretas e as ondas refletidas são de fundamental importância para as comunicações em UHF e SHF [1]. Um detalhamento maior sobre este tipo de propagação e suas conseqüências depende do entendimento do comportamento da camada mais baixa da atmosfera, apresentada nos próximos itens.

3.4.1. CARACTERÍSTICAS DA TROPOSFERA

A parte da atmosfera terrestre de maior interesse para o estudo da propagação próxima da superfície a partir de UHF é a troposfera, que se estende desde o nível do mar até aproximadamente 15 km [1]. A trajetória descrita pela propagação de uma onda eletromagnética, entre duas antenas em visada direta, depende, fundamentalmente, da variação da temperatura, variação do vapor d'água, etc. No caso dos radioenlaces terrestres, este meio corresponde à parte mais baixa da troposfera. Como a frente de onda é o lugar geométrico dos pontos de mesma fase, e a direção de propagação é perpendicular à frente de onda, uma onda eletromagnética plana se propaga em linha reta em um meio homogêneo, o que, tipicamente, não ocorre na troposfera. A densidade da troposfera depende de sua temperatura, pressão e umidade. A propagação de ondas eletromagnéticas em meios onde a densidade é não uniforme, faz com que diferentes pontos da frente de onda se propaguem com diferentes velocidades, tornando a trajetória dependente dessa não uniformidade (refração atmosférica).

Para uma onda propagando-se no ar, o índice de refração é apenas uma pequena fração maior que a unidade. Assim, é conveniente utilizar uma grandeza mais adequada para representar o índice de refração para ondas eletromagnéticas no ar, denominada *refratividade rádio*, ou simplesmente *refratividade* [4][5].

A refratividade N é definida como sendo o valor do índice de refração da atmosfera que excede a unidade, em partes por milhão, e descrita por

$$N = (n - 1) 10^6. \quad (3.11)$$

A refratividade para enlaces troposféricos, em frequências abaixo de 100 GHz, é determinada por

$$N = 77,6 \times \frac{P}{T} + 3,732 \times 10^5 \frac{e}{T^2}; \quad (3.12)$$

onde P é a pressão da atmosfera seca, em mbar, T é a temperatura absoluta, em kelvin (K), e e é a pressão do vapor d'água, em mbar. O valor de N varia com a altitude, uma vez que a pressão, temperatura e umidade também variam com a altitude. Pressão e umidade normalmente diminuem exponencialmente com a altitude, enquanto a temperatura varia linearmente com a altitude a uma taxa de entre $-6^\circ\text{C}/\text{km}$ a $-9^\circ\text{C}/\text{km}$, dependendo da região [1]. A umidade e a temperatura, entretanto, variam sob determinadas condições, resultando em variações da refratividade, que, tipicamente, assume valores na faixa de 200 a 500 unidades-N, próximo da superfície da Terra. Em geral, a atmosfera apresenta uma dependência exponencial de N com a altitude. Para a atmosfera típica, a refratividade pode ser escrita como

$$N(h) = N_o \times \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right); \quad (3.13)$$

onde h e h_0 são, respectivamente, a altitude e a escala de altitude, ambas em km, e N_o é o valor médio da refratividade da atmosfera extrapolada para o nível do mar. Para propósitos de referência, pode-se adotar $h_0 = 7,35$ km e $N_o = 315$ [7]. Assim sendo, (3.13) torna-se

$$N_s = 315 \times \exp(-0,136h_s); \quad (3.14)$$

onde N_s é a refratividade na superfície da terra e h_s é a altitude da superfície da terra em relação ao nível do mar.

Para efeito dos estudos das degradações provocadas pela troposfera em um radioenlace com visada direta, o valor absoluto da refratividade não é de grande importância. Entretanto, as variações do valor da refratividade podem afetar substancialmente a trajetória, ou as trajetórias, de uma frente de onda eletromagnética. Assim, é conveniente definir o *gradiente do índice de refratividade*, G , ou simplesmente *gradiente de refratividade*, em unidades-N/km. Embora o gradiente de refratividade varie exponencialmente com a altitude, ele pode ser aproximado por um gradiente linear nas primeiras centenas de metros acima do nível do mar, onde normalmente situam-se as trajetórias dos radioenlaces com visada direta, conforme apresentado a seguir:

$$G = \frac{dN}{dh}. \quad (3.15)$$

Sob condições atmosféricas onde a troposfera é homogênea ou *bem misturada*, este valor é uma constante. Quando a homogeneidade da atmosfera muda com o tempo, o gradiente de refratividade também muda, afetando as condições de propagação.

A curvatura da trajetória de uma frente de onda é dependente do gradiente de refratividade à qual a frente de onda é submetida ao longo do percurso. Desta forma, pode-se admitir que o raio descreve um arco com raio ρ , que é inversamente proporcional ao gradiente do índice de refração no percurso, descrito aproximadamente por

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{dn}{dh} \cdot \frac{1}{n} \cong -\frac{dn}{dh}. \quad (3.16)$$

Por sua vez, a Terra não apresenta uma superfície plana. Seu perfil pode ser representado por um arco cujo raio médio, r , é igual a 6.371 km. Então, para uma análise precisa da visibilidade entre antenas, este fato deve ser levado em consideração.

Para facilitar a análise da visibilidade, pode-se considerar o arco descrito pela frente de onda como sendo um segmento de reta, desta forma, o arco que representa a curvatura da superfície da Terra deve ser modificado, de acordo com a refratividade do percurso. Essa nova curvatura da superfície da Terra é obtida a partir de um novo raio denominado *raio efetivo da Terra*. Portanto, o raio efetivo da Terra é definido como sendo um raio hipotético de uma Terra esférica sem atmosfera, onde a propagação de ondas eletromagnéticas em visada direta descreve uma trajetória retilínea, conforme mostrado na Figura 3.6. O raio efetivo da Terra, R , é obtido pelo produto do raio da Terra, r , por um fator denominado *fator do raio efetivo da Terra*, k , ou simplesmente fator k , então,

$$R = k \cdot r. \quad (3.17)$$

A relação entre o raio efetivo da Terra e o raio da trajetória é obtida de acordo com a expressão, que define uma Terra efetiva para a qual a trajetória dos raios é vista como retilínea:

$$\frac{1}{k \cdot r} = \frac{1}{r} - \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R}. \quad (3.18)$$

Consequentemente, o valor de k é obtido a partir do gradiente do índice de refração ou do gradiente de refratividade, isto é,

$$k = \frac{1}{1+r \cdot \frac{dn}{dh}} = \frac{1}{1+r \cdot \frac{dN}{dh} \cdot (10)^{-6}} = \frac{1}{1+r \cdot G \cdot 10^{-6}} \quad (3.19)$$

onde $dN/dh = G$, conforme definido anteriormente. O valor de k depende do clima da região considerada, situando-se, tipicamente, entre 1 e 2. O valor de referência para G , igual a (-40 unidades-N/km) é o valor definido para uma *atmosfera padrão*, que resulta em $\rho \cong 4r$.

$$\frac{1}{k_e \cdot r} = \frac{1}{r} - \frac{1}{4 \cdot r} = \frac{3}{4 \cdot r} \Rightarrow k = \frac{4}{3}. \quad (3.20)$$

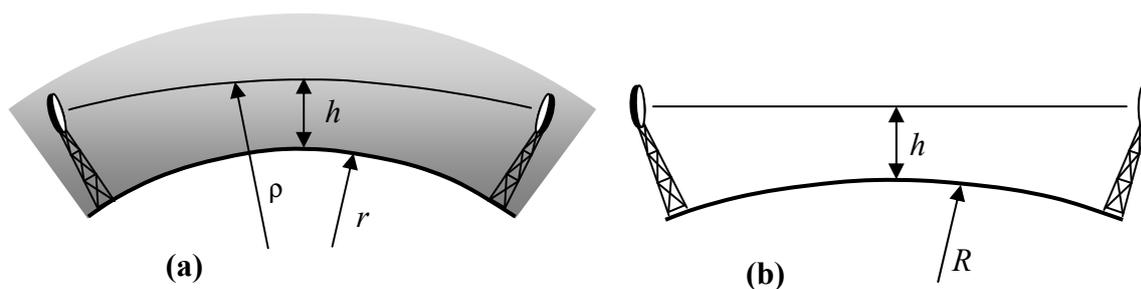


Figura 3.6 - (a) Terra com raio real r e raio da trajetória ρ e
(b) Terra com raio efetivo R e $\rho = \infty$.

3.4.2. O PAPEL PARA O TRAÇADO DE PERFIS

Para a verificação da influência dos obstáculos em um radioenlace é necessário fazer um levantamento topográfico da região ao longo da rota escolhida. Em seguida, desenha-se um corte vertical desta região, segundo uma escala apropriada, em um papel em que a curvatura da Terra é mostrada de acordo com o seu raio efetivo R . Para este papel são transferidos todos os dados do relevo entre a antena transmissora e a antena receptora. Desta forma pode-se analisar a influência dos obstáculos e de outros fatores que possam influenciar no desempenho do sistema. Conforme já apresentado pela Figura 3.6 (b), o perfil lançado no papel para o traçado do perfil permite que a linha de visada seja traçada como uma reta.

Isso pode ser realizado considerando-se uma *curva de referência*, que corresponde à superfície lisa da terra com raio efetivo a' , corrigido em relação ao raio geométrico de acordo com a refratividade do meio. A curvatura da Terra, segundo um raio efetivo, pode ser traçada considerando-se o modelo apresentado na Figura 3.7. Essa curvatura é traçada a partir de uma *linha de base* que consiste de uma reta tangente a um ponto da superfície da terra, localizado exatamente no meio do percurso. Para as dimensões envolvidas, pode-se considerar que $y = y'$ e que o valor de y varia em função da distância x segundo a expressão [1]

$$y \cong \frac{x^2}{2a'}. \quad (3.21)$$

A expressão (3.21) representa a *lei do perfil terrestre*, que obedece a uma variação parabólica.

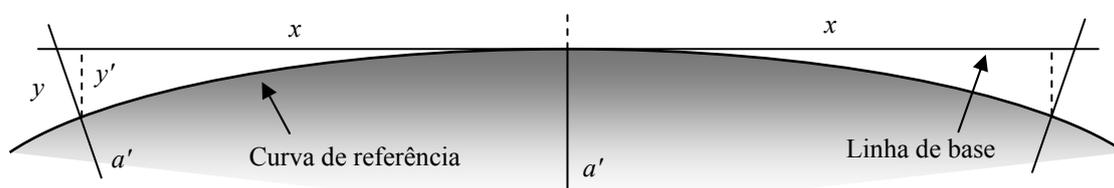


Figura 3.7 - Modelo para a determinação da *lei do perfil terrestre*.

De acordo com a Figura 3.7, observa-se que x representa a metade da extensão de um enlace. Para melhor visualização do perfil topográfico ao longo da rota, é conveniente utilizar escalas diferentes para os valores x e y . Desta forma pode-se, por exemplo, adotar para cada

centímetro, 5,0 km para a escala horizontal e 50 metros para a escala vertical, conforme mostrado na Figura 3.8.

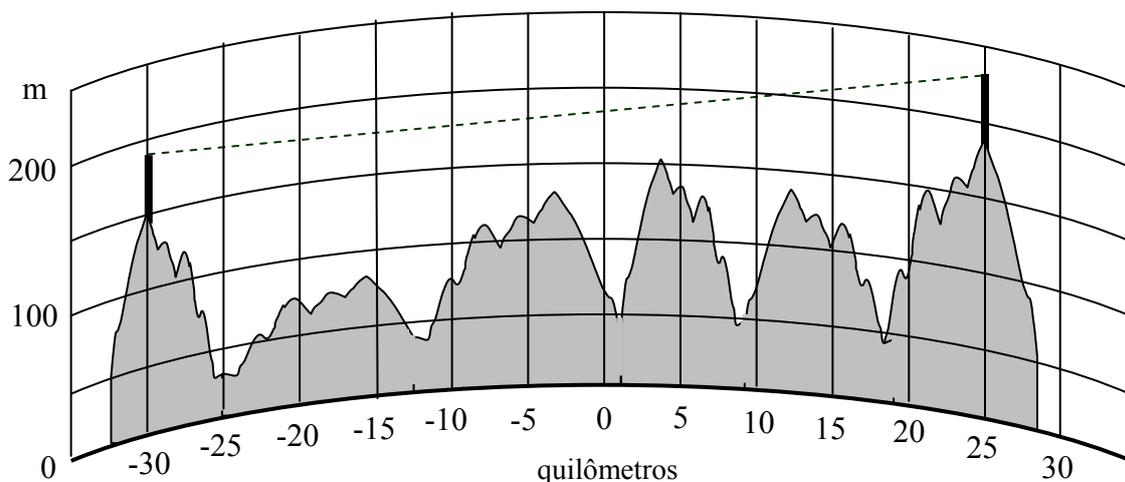


Figura 3.8 - Exemplo de perfil topográfico desenhado sobre o papel de traçado do perfil.

Para facilitar a determinação da influência de obstáculos ao longo do percurso, o Anexo 3.1 apresenta um programa em MathCad que traça o perfil topográfico levando-se em conta a refratividade da troposfera, traça a linha de visada e também a seção transversal do primeiro elipsóide de Fresnel.

3.4.3. CRITÉRIO PARA RADIOVISIBILIDADE

O critério prático muito aceito como indicador de que um radioenlace está livre da influência de obstáculos é satisfazer, concomitantemente, as seguintes condições:

- a) Para $k = 2/3$ não haja qualquer obstáculo penetrando o elipsóide com raio $0,6R_1$, e, concomitantemente;
- b) Para $k = 4/3$ não haja qualquer obstáculo penetrando o elipsóide com raio R_1 .

3.4.4. CONDIÇÕES ANÔMALAS DE PROPAGAÇÃO

De acordo com a Equação (3.12), a refratividade N depende da pressão atmosférica, da temperatura e da umidade. As condições anômalas de propagação são provocadas por mudanças físicas da atmosfera. Essas mudanças serão apresentadas em termos de variação do gradiente de refratividade que, dependendo das circunstâncias, pode apresentar valores positivos ou muito mais negativos que -40 unidades- N/km [4][6].

□ Gradientes Positivos

Observando (3.12), valores positivos para o gradiente de refratividade podem ocorrer quando um forte gradiente negativo de temperatura ou gradiente positivo de umidade ou ambos ao mesmo tempo acontece. Diversos fenômenos meteorológicos podem provocar essas alterações, tais como [6]:

- o avanço de ar frio e úmido sobre a Terra quente e seca, especialmente em regiões costeiras;
- a elevação do ar quente provocada pela chegada de uma massa de ar superficial seca e fria (frente fria); ou
- a convecção de calor a partir de uma superfície extremamente quente, limitada por uma camada superior, mais fria e úmida, apresentando refratividade normal.

□ **Gradientes Negativos (< -40 unidades-N/km)**

Considerando ainda (3.56) e (3.59), gradientes muito negativos de refratividade requerem gradientes positivos de temperatura (inversão térmica) e/ou forte gradiente negativo de umidade. Alguns fatores meteorológicos podem produzir gradientes de refratividade tão baixo quanto -157 unidades-N/km, que podem provocar a formação de dutos troposféricos. Os dutos podem ser de superfície e/ou elevados.

• **Dutos de Superfície**

Um dos principais mecanismos de formação dos dutos de superfície é a evaporação. Tais dutos podem formar-se sobre baixadas quentes e úmidas ou sobre o mar devido ao acentuado gradiente negativo de umidade. Em algumas áreas alagadas pode haver a formação de dutos semipermanentes, entretanto, suas existências e espessuras dependem da estação do ano, condições geográficas e hora do dia. Forte deslocamento de ar frio sobre superfície úmida e quente é um mecanismo de formação de duto muito importante em regiões costeiras. Dutos de superfície sobre a Terra, podem se formar de diversas formas, entretanto, geralmente, esses dutos são de curta duração.

• **Dutos Elevados**

Dutos elevados ocorrem por diversos outros motivos. Em particular, a presença constante de nuvens estratos-cúmulos, como por exemplo, nas regiões subtropicais, propiciam a formação de dutos semipermanentes elevados. Estes dutos podem formar-se até 3 km acima da superfície da Terra, no entanto, sob o ponto de vista da propagação de microondas em enlaces ponto-a-ponto, apenas as primeiras poucas centenas de metros a partir da superfície terrestre são de interesse. Os vários mecanismos de inversões térmicas também levam à formação de dutos elevados. Regiões onde o vento é intenso são pouco propensas à formação de dutos, por apresentarem atmosfera bem *misturada*.

3.4.5. FAIXA DE VARIAÇÃO DO GRADIENTE DE REFRAÇÃO

A faixa de variação do gradiente de refratividade pode se estender dentro de uma vasta gama de valores. Valores como -314 unidades-N/km, ou menores, caracterizam super-refração. Valores positivos, tais como 78 unidades-N/km, ou maiores, caracterizam sub-refração. A Tabela 3.5 apresenta alguns valores de G e de k e os tipos de refração correspondentes. A Figura 3.15 ilustra alguns casos de refração [6][7]. Suas conseqüências são apresentadas na Seção 3.3.5.

Tabela 3.1 - Valores de G , k e os tipos de refração [4][6][7].

G (unidades-N/km)	k	Raio da trajetória	Tipo de refração
78	2/3	ρ invertido	Sub-refração
0	1	$\rho = \infty$	Sem refração
-40	4/3	$\rho > r$	Refração típica
-79	2	$\rho > r$	
-157	∞	$\rho = r$	Super-refração
-314	-1	$\rho < r$	

3.4.6. DESVANECIMENTOS

Desvanecimentos são variações, ao longo do tempo, da amplitude, fase e/ou polarização do sinal recebido [7]. Tais variações não são mutuamente exclusivas e, em última instância, provocam atenuações temporais no nível de potência de recepção. Nos enlaces fixos em visada direta, operando com frequências abaixo de 10 GHz, geralmente as condições de propagação através da troposfera são relativamente estáveis durante a maior parte do tempo, fazendo com que as flutuações do sinal sejam pequenas em torno de um valor médio. Entretanto, conforme apresentado anteriormente, existe um bom número de razões para que, periodicamente ou não, as características de propagação sejam alteradas em função das mudanças das condições geoclimáticas. Consequentemente, desvanecimentos severos podem fazer com que a qualidade do sinal recebido fique abaixo de um padrão mínimo aceitável, levando o sistema para a situação de inoperância (*outage*).

Dependendo das condições de propagação, o desvanecimento pode ser dependente ou não da frequência. O desvanecimento não-seletivo é aquele em que todos os componentes espectrais do sinal transmitido são igualmente atenuados. Por sua vez, o desvanecimento seletivo em frequência afeta de maneira desigual os componentes do espectro do sinal transmitido.

□ Desvanecimentos Não-seletivos

Desvanecimentos não-seletivos podem ser provocados por desvio da trajetória da frente de onda entre as antenas, conforme mostrado na Figura 3.9 (b), (c) e (d). A Figura 3.9 (e) representa uma situação de blecaute, provocada por super-refração por duto. Para enlaces em que o desvanecimento não-seletivo é dominante, deve-se prever uma margem de desvanecimento que é função de um valor aceitável de probabilidade de inoperância. Ou seja, em geral, a degradação de desempenho provocada pelo desvanecimento não-seletivo é evitada por meio do aumento do ganho das antenas e/ou potência de transmissão.

O desvanecimento não-seletivo também pode ser provocado por propagação por multipercurso e pode ainda, sob condições específicas, causar desvanecimento seletivo simultâneo. As Figuras 3.10 (a) e (b) apresentam os espectros de um sinal modulado sem desvanecimento não-seletivo e com desvanecimento não-seletivo, respectivamente.

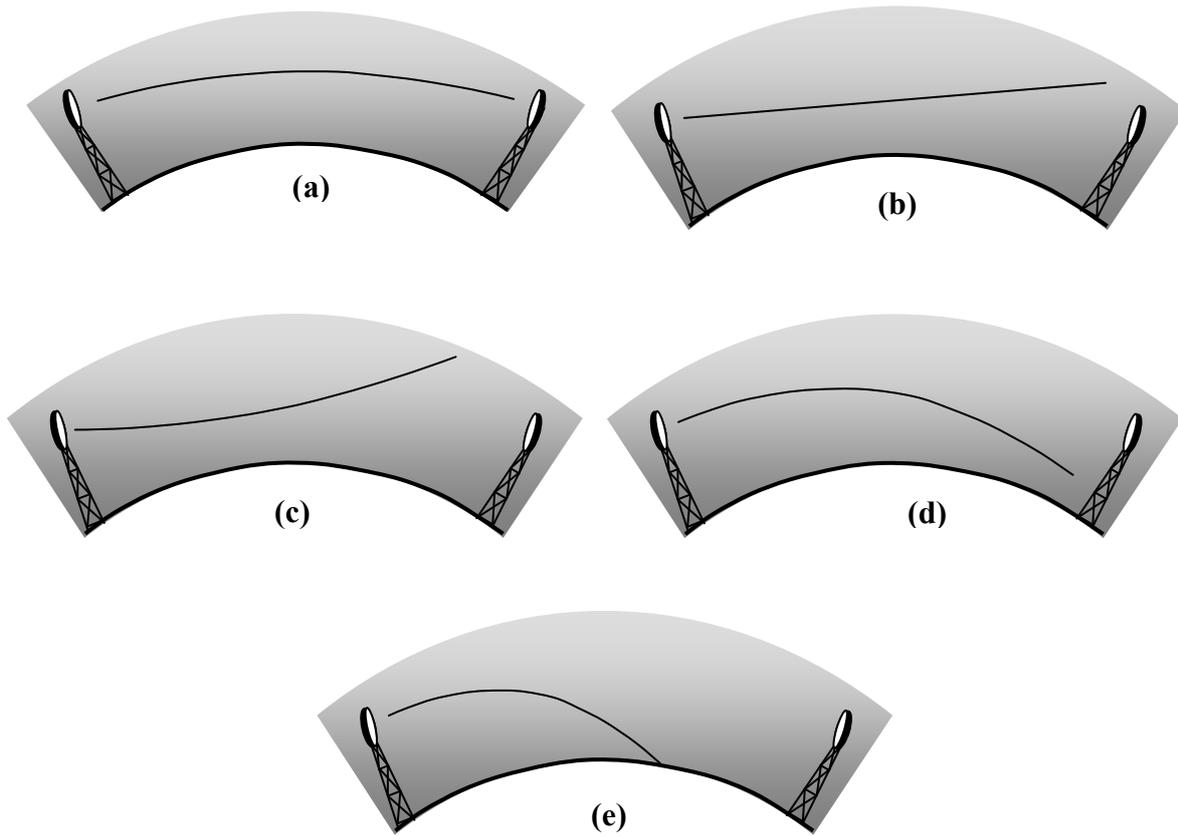


Figura 3.9 - (a) Refração padrão ($G = -40$ unidades-N/km); (b) Ausência de refração ($G = 0$); (c) Sub-refração ($G > 0$); (d) Super refração ($G < -79$ unidades-N/km); (e) Super refração ($G < -157$ unidades-N/km) – situação de blecaute.

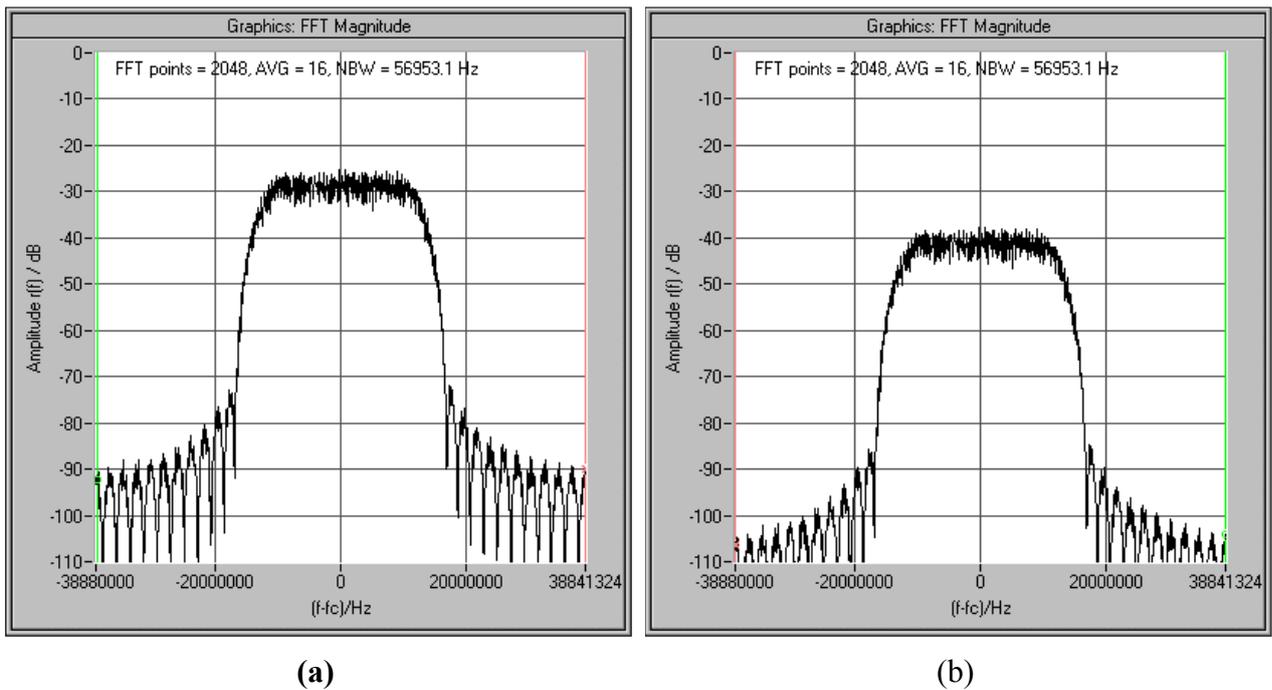


Figura 3.10 - Espectro de um sinal modulado: (a) sem desvanecimento não-seletivo e (b) com desvanecimento não-seletivo de, aproximadamente, 12 dB.

□ Desvanecimentos Seletivos

Desvanecimentos seletivos são provocados por propagação por multipercursos. Eles ocorrem sob condições específicas de atraso e amplitude dos sinais que se propagam pelos percursos secundários em relação ao sinal que se propaga pelo percurso principal. Propagação por multipercurso pode ocorrer por diversos motivos, entre os quais se destacam as reflexões, as refrações em função das mudanças das condições geoclimáticas ou ainda uma combinação de ambos. Desvanecimentos provocados por propagação por multipercursos devidos às reflexões especulares, muitas vezes pode ser evitada por meio de um roteamento terrestre adequado e esta deve ser a primeira opção durante o planejamento de uma rota, sempre que as condições permitirem. Desvanecimentos seletivos provocados por reflexão especular são, em geral, muito severos. Por esse motivo, quando a geometria do enlace favorece a reflexão especular, a escolha e o posicionamento das antenas podem tornar-se críticos, e o uso de algum tipo de diversidade pode tornar-se necessário [6]. A Figura 3.11 apresenta alguns tipos de propagação por multipercursos.

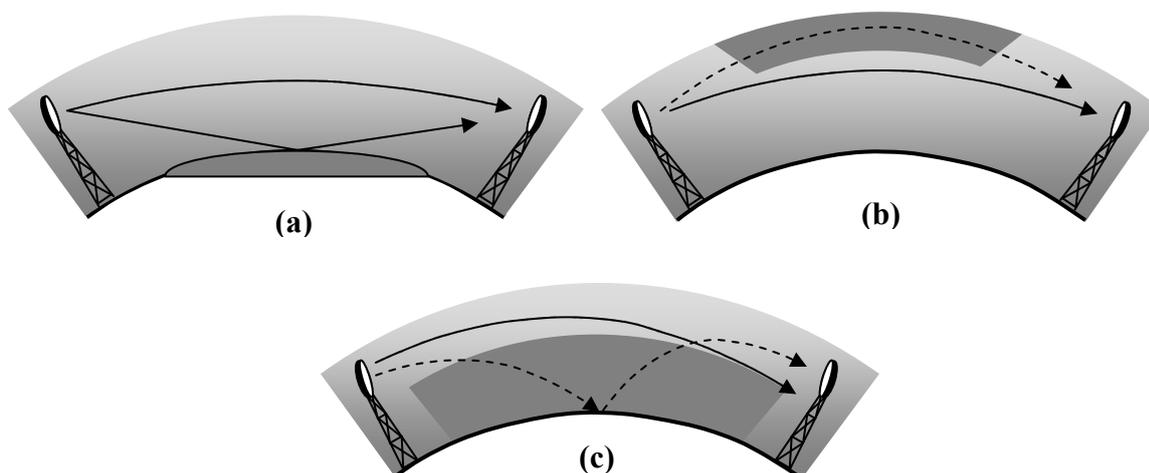


Figura 3.11 - (a) Multipercurso por reflexão especular; (b) Multipercurso por duto elevado; (c) Multipercurso por reflexão provocada por duto de superfície.

Basicamente, o desvanecimento seletivo ocorre porque uma mesma frente de onda, percorrendo caminhos diferentes, atinge a antena de recepção em tempos diferentes. A combinação destes sinais pode modificar as características do sinal transmitido, tornando sua resposta de amplitude dependente da frequência e sua resposta de fase não linear com a frequência, dentro da largura de faixa de interesse. Em sistemas de faixa larga, ou altas taxas de transmissão, essas atenuações têm o comportamento de um filtro rejeita-faixa, apresentando uma atenuação em alguns componentes do espectro de frequências do sinal transmitido, conforme ilustrado na Figura 3.12. A distorção provocada por efeito do desvanecimento seletivo contribui fortemente para o aumento da interferência intersimbólica, com conseqüente aumento da taxa de erro, em radioenlaces digitais.

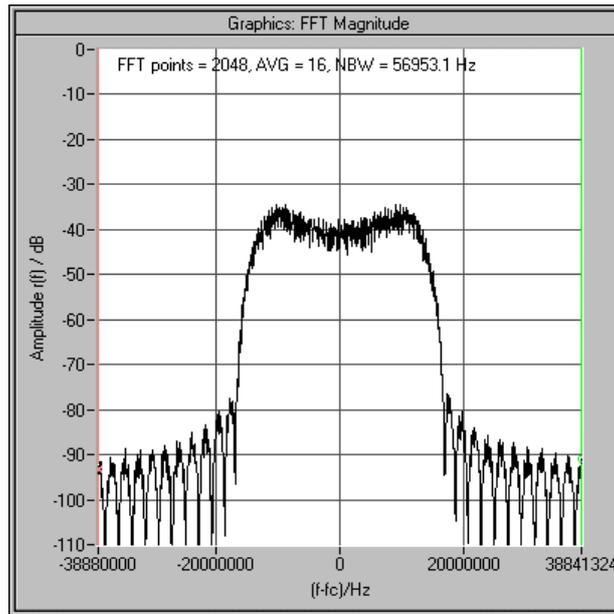


Figura 3.12 - Espectro de um sinal modulado sob efeito de um desvanecimento seletivo no centro do canal.

Finalmente, é oportuno salientar que a existência do desvanecimento seletivo está quase sempre associada à presença de um desvanecimento não-seletivo simultâneo, entretanto, a recíproca não é verdadeira. No passado acreditava-se que os desvanecimentos seletivos eram produzidos, em grande parte, pela combinação do percurso direto com um percurso secundário devido a dutos elevados, conforme mostrado na Figura 3.11 (b). Atualmente, no entanto, é largamente aceito que os desvanecimentos seletivos, em geral, estão associados a reflexões não especulares devido a uma super-refração, combinadas com um feixe principal desalinhado, conforme mostrado na Figura 3.11 (c) [6]. Isso explica a ocorrência simultânea do desvanecimento seletivo e do desvanecimento não-seletivo. No entanto, geralmente, seus efeitos são analisados separadamente.

* * *

3.5. MODELO DE REFERÊNCIA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO

Para radioenlaces terrestres ponto-a-ponto com visada direta a condição de propagação por múltiplos percursos pode ser simplificada para dois ou três raios que, fundamentalmente representam um sinal direto e um ou dois sinais refletidos. O modelo apresentado a seguir é o modelo de três raios simplificado ou modelo de Rummler [8], cuja função de transferência é descrita como [5][6][9][10][11]:

$$H(\omega) = a \cdot \{1 - b \cdot \exp[-j(\omega - \omega_0)\tau]\}, \quad (3.22)$$

onde a é a variável que representa o desvanecimento não-seletivo, b representa a amplitude relativa entre os raios principal e secundário, ω é a frequência angular, ω_0 é a frequência angular em que ocorre o mínimo da função (*notch*) e τ é o tempo de atraso entre o raio secundário e o raio direto. Na forma trigonométrica, (3.22) torna-se

$$H(\omega) = a\{[1 - b\cos(\omega - \omega_o)\tau] - j[b\sin(\omega - \omega_o)\tau]\} \quad (3.23)$$

A variação da amplitude, em função da frequência, é dada pelo módulo de (3.23), ou seja,

$$|H(\omega)| = a \cdot \sqrt{[1 + b^2 - 2b\cos(\omega - \omega_o)\tau]} \quad (3.24)$$

que é uma função periódica que apresenta um mínimo quando $\cos[(\omega - \omega_o)\tau] = 1$. Logo, um mínimo ocorre sempre que

$$(\omega_n - \omega_o)\tau = \pi \pm 2\pi n \quad \text{para } n = 0, 1, 2 \dots \quad (3.25)$$

Consequentemente, a diferença entre dois mínimos pode ser obtida fazendo

$$(\omega_n - \omega_o)\tau = \begin{cases} \pi & \text{para } n = 0 \\ 3\pi & \text{para } n = 1 \end{cases} \quad (3.26)$$

que resulta em

$$(\omega_1 - \omega_0)\tau = 2\pi \quad (3.27)$$

Portanto,

$$\omega_1 - \omega_0 = \Delta\omega = \frac{2\pi}{\tau} \quad (3.28)$$

A diferença de frequência angular entre dois mínimos, $\Delta\omega$, é definida como *largura de faixa de coerência do canal* [5].

EXEMPLO 3.3

Considere os parâmetros apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Conjunto de dados para o traçado das funções de transferência do canal.

Parâmetro	Valor
Faixa de frequência (f)	4,5 GHz a 7 GHz
Posição do notch (f ₀)	5 GHz
Desvanecimento não-seletivo (a)	0,365
Relação de amplitude entre raios (b)	0,7
Atraso entre raios (τ)	0,67 ns

Trace a curva de resposta de amplitude para o canal com modelo de dois raios e determine o intervalo entre dois mínimos da função.

Solução:

Através de (3.24) pode-se traçar a curva de resposta de amplitude do canal, apresentada por conveniência em função da frequência, em GHz, na Figura 3.13.

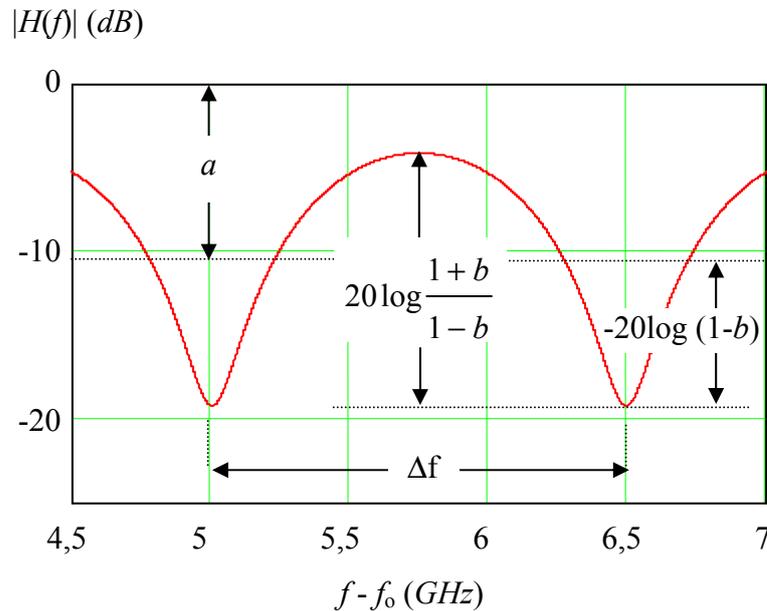


Figura 3.13 - Resposta de amplitude do canal de acordo com a Equação (3.24) [5][6][8].

De acordo com a curva da Figura 3.13, os valores das frequências onde os mínimos ocorrem são 5 GHz e 6,5 GHz. De acordo com (3.28), tem-se

$$\omega_1 - \omega_0 = \Delta\omega = \frac{2\pi}{\tau} \quad \text{ou}$$

$$f_1 - f_0 = \Delta f = \tau^{-1} = (0,67 \times 10^{-9})^{-1}$$

$$\Delta f \cong 1,5 \text{ GHz}$$

Este resultado está coerente com o espaçamento obtido entre os mínimos da Figura 3.13 e permite concluir que, se a largura de faixa do sinal transmitido for da ordem de grandeza da largura de faixa de coerência do canal, então o sistema estará vulnerável aos efeitos do desvanecimento seletivo.

* * *

A resposta de fase para o modelo apresentado pode ser obtida a partir da Equação (3.23), resultando em,

$$\varphi(\omega) = -\arctan\left\{ \frac{[b \cdot \text{sen}(\omega - \omega_o)\tau]}{[1 - b \cdot \text{cos}(\omega - \omega_o)\tau]} \right\} \quad (3.29)$$

EXEMPLO 3.4

Considere os parâmetros apresentados na Tabela 3.2. Trace a curva de resposta de fase para o canal com modelo de dois raios e determine as posições espectrais onde a fase varia mais abruptamente com a frequência.

Solução:

Através de (3.29) pode-se traçar a curva de resposta de fase para o canal, apresentada por conveniência em função da frequência, em GHz, na Figura 3.14.

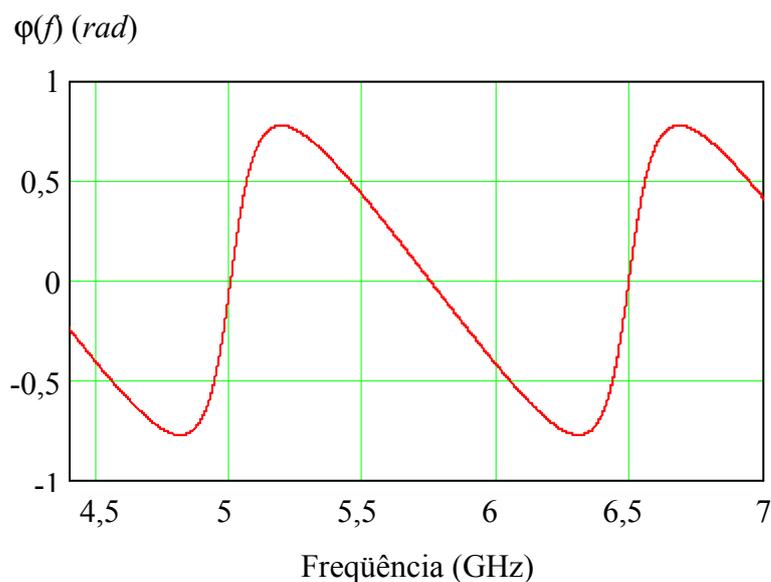


Figura 3.14 - Resposta de fase do canal de acordo com a Equação (3.29) [5][6][8].

De acordo com a curva da Figura 3.14, os valores das frequências onde a resposta de fase varia de forma mais abrupta são 5 GHz e 6,5 GHz, coincidindo com as posições dos mínimos observadas no Exemplo 3.4.

* * *

Note que, de acordo com os parâmetros usados nos Exemplos 3.3 e 3.4, ou seja, $b < 1$ e $\tau > 0$, o raio secundário possui amplitude menor e está atrasado em relação ao raio principal. Para esta condição, a resposta de fase é dita *mínima*. As definições de resposta de fase mínima e fase não-mínima têm origem no diagrama de pólos e zeros, obtido através da função de transferência.

A função de transferência do modelo de três raios simplificado pode ser desenhada no diagrama de pólos e zeros como uma série infinita de zeros, conforme mostrada na Figura 3.15 [5]. De acordo com esta figura, a condição de fase mínima ocorre quando a seqüência infinita de zeros está à esquerda do eixo imaginário e o ângulo de fase é ν . Já a condição de fase não-mínima ocorre quando a seqüência infinita de zeros está à direita do eixo imaginário e o ângulo de fase é ν' . Note que independentemente do valor da frequência angular, ω , o ângulo, ν sempre será menor que ν' . Esta é a razão para a denominação “fase mínima” e “fase

não-mínima”. Estatisticamente, as situações de fase mínima e fase não-mínima ocorrem para 60% e 40% dos casos, respectivamente [8]. As condições que determinam as respostas de fase mínima e não-mínima estão resumidas na Tabela 3.3 [5].

A partir das respostas de amplitude e de fase do modelo de referência é possível definir parâmetros que quantifiquem a robustez de um determinado esquema de modulação quanto às distorções provocadas por um *notch*. Os dois parâmetros mais usados para demonstrar o grau de robustez provocado por um *notch* são a área de assinatura S e a margem de desvanecimento dispersivo DFM . Ambos os parâmetros baseiam-se em uma curva definida como *curva de assinatura do sistema de recepção*. Estes conceitos são apresentados no capítulo a seguir.

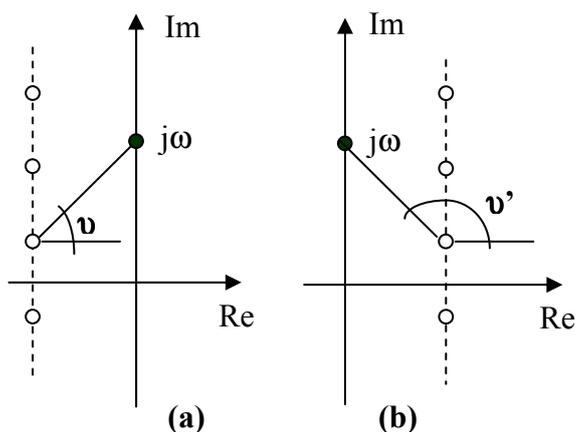


Figura 3.15 - Diagrama de pólos e zeros para: (a) Condição de fase mínima e (b) não-mínima.

Tabela 3.3 - Condições para fase mínima e não-mínima.

Tipo	Condições	
Fase mínima	$\tau > 0$	$0 < b < 1$
	$\tau < 0$	$b > 1$
Fase não-mínima	$\tau > 0$	$b > 1$
	$\tau < 0$	$0 < b < 1$

3.6. ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA (REC. ITU-R P.838-3) [12]

A partir de frequências de transmissão de 8,5 GHz, a chuva pode produzir atenuações significativas. Essas atenuações são diretamente proporcionais a taxa de chuva, R_p , em mm/h. O índice p se refere a porcentagem máxima do tempo do pior mês que essa taxa de chuva pode ocorrer. Isso significa que taxas de chuvas maiores podem ocorrer em períodos menores e vice-versa. Segundo a REC. ITU-R P.838, a atenuação provocada por chuva, em radioenlaces terrestres, pode ser determinada calculando-se inicialmente a atenuação específica, γ_R , em dB/km, a partir da expressão

$$\gamma_R = kR_p^\alpha. \tag{3.30}$$

Note que k e α são valores dependentes da frequência e da polarização da onda e podem ser calculados conforme apresentado a seguir [12].

$$k = 10^{\sum_{j=1}^4 a_j \exp\left[-\left(\frac{\log_{10}(f-b_j)}{c_j}\right)^2\right] + m_k \log_{10} f + c_k} \quad (3.31)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp\left[-\left(\frac{\log_{10}(f-b_j)}{c_j}\right)^2\right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (3.32)$$

Sendo f a frequência em GHz; k o valor para k_H ou para k_V e α o valor α_H ou α_V . Os valores para $a_j, b_j, c_j, m_k, c_k, m_\alpha, c_\alpha$ podem ser obtidos das tabelas apresentadas a seguir.

Tabela 3.4 - Coeficientes para k_H

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5.33980	-0.10008	1.13098	-0.18961	0.71147
2	-0.35351	1.26970	0.45400		
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

Tabela 3.5 - Coeficientes para k_V

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80595	0.56934	0.81061	-0.16398	0.63297
2	-3.44965	-0.22911	0.51059		
3	-0.39902	0.73042	0.11899		
4	0.50167	1.07319	0.27195		

Tabela 3.6 - Coeficientes para α_H

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.14318	1.82442	-0.55187	0.67849	-1.95537
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		

Tabela 3.7 - Coeficientes para α_V

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.07771	2.33840	-0.76284	-0.053739	0.83433
2	0.56727	0.95545	0.54039		
3	-0.20238	1.14520	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

Para uma consulta rápida alguns valores de k e α são apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Valores de k e de α em função da frequência e das polarizações H e V .

f (GHz)	k_H	k_V	α_H	α_V
8	0,004567	0,003996	1,3275	1,3129
9	0,006916	0,006056	1,3044	1,2937
10	0,01006	0,008853	1,2747	1,2636
12	0,01882	0,01680	1,2168	1,1994
15	0,03689	0,03362	1,1549	1,1275
20	0,07504	0,06898	1,0995	1,0663
25	0,1237	0,1125	1,0604	1,0308
30	0,1864	0,1673	1,0202	0,9974
35	0,2632	0,2341	0,9789	0,9630

Ainda com relação à Equação (3.30), R_p é a taxa de chuva que excede uma porcentagem de tempo p . As ondas transmitidas com polarização horizontal apresentam atenuação por chuva maior do que aquelas transmitidas com polarização vertical.

Uma vez que a chuva ocorre em forma de células, e o tamanho da célula depende da taxa de chuva, é necessário determinar a distância efetiva do enlace, que representa a média estatística da extensão do enlace que estará sujeito à chuva. Essa distância efetiva pode ser obtida a partir de um fator de encurtamento, r , sobre a distância, d , em km, conforme apresentado a seguir.

$$d_{ef} = d \cdot r \quad (3.33)$$

onde

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (3.34)$$

sendo

$$d_0 = 35 \cdot e^{-0,015 \cdot R_{0,01}} \quad (3.35)$$

onde $R_{0,01}$ é a taxa de chuva que excede a 0,01% do tempo. Quando $R_{0,01}$ ultrapassar 100 mm/h, deve-se limitar o valor de $R_{0,01}$ a 100 mm/h. A atenuação estimada no percurso que excede 0,01% do tempo é dada por

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot d_{ef} \quad (3.36)$$

Para outras porcentagens de tempo, p , diferentes de 0,01% compreendidas na faixa de 0,001% até 1%, a atenuação pode ser deduzida a partir das seguintes expressões:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 \cdot p^{-(0,546+0,043 \cdot \log_{10} p)} \quad \text{para latitudes } \geq 30^\circ \text{ N ou S} \quad (3.37)$$

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,07 \cdot p^{-(0,855+0,139 \cdot \log_{10} p)} \quad \text{para latitudes } < 30^\circ \text{ N ou S} \quad (3.38)$$

A Figura 3.16 mostra os valores da atenuação por chuva em função da frequência para duas situações distintas: uma para um enlace com 20 km de extensão sob chuva com taxa de 60 mm/h e a outra para um enlace com 65 km de extensão sob uma chuva com taxa de 120 mm/h. A polarização considerada foi a horizontal.

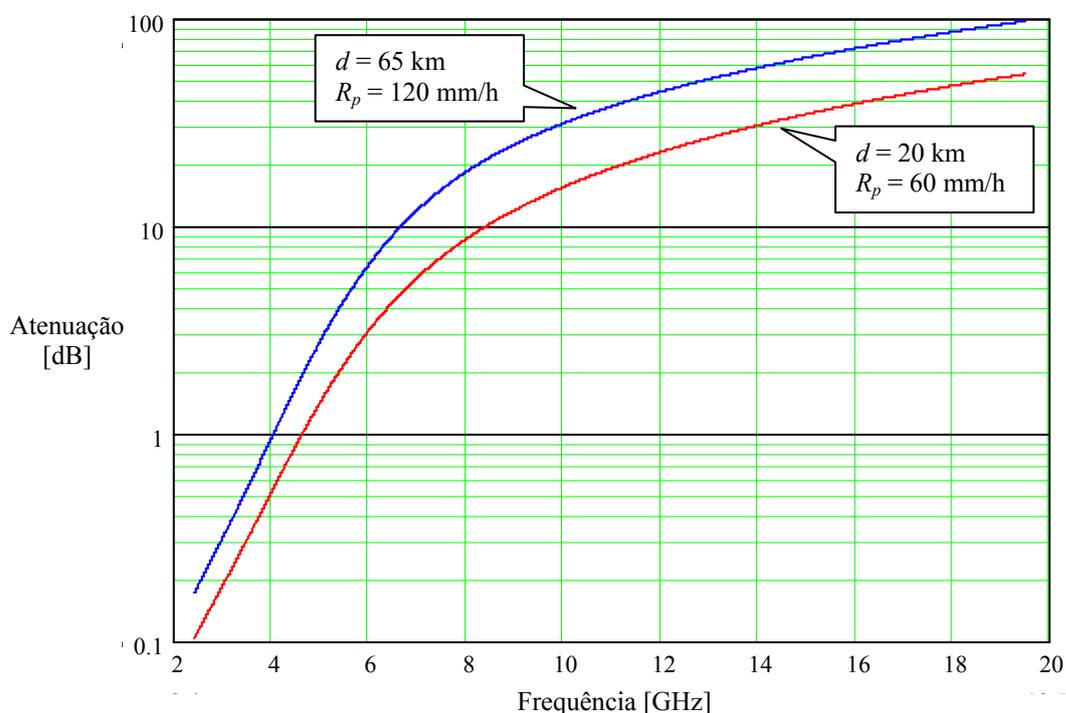
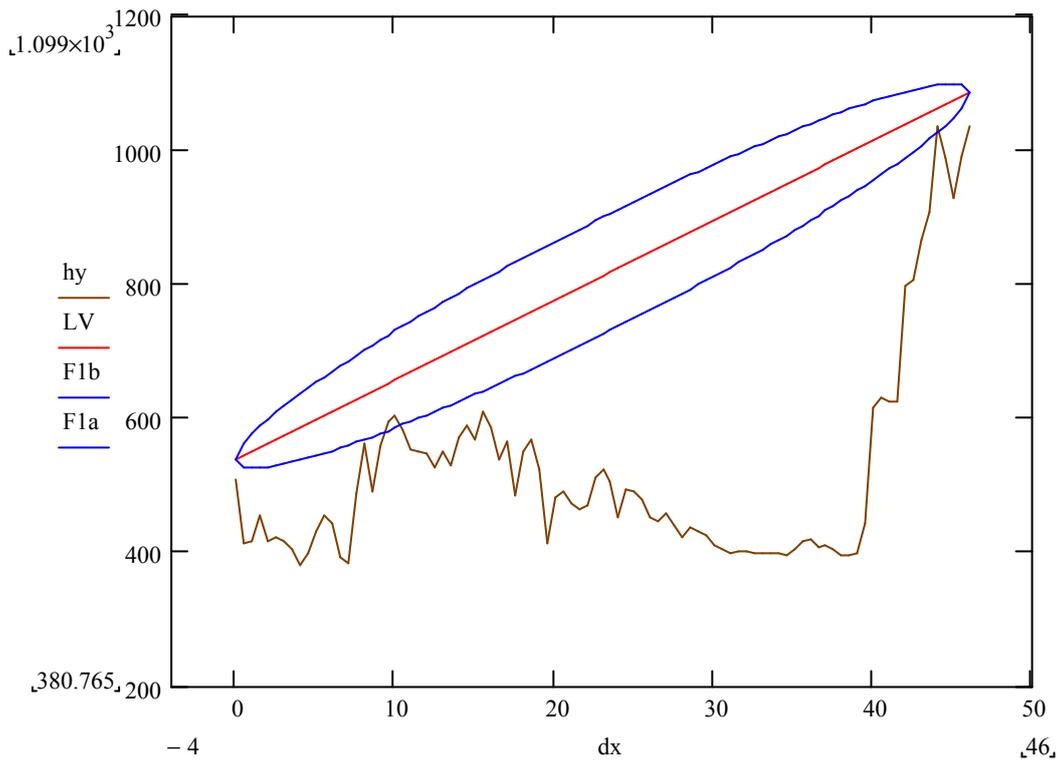


Figura 3.16 - Atenuação provocada por chuva em função da frequência para as condições apresentadas na figura em polarização horizontal.

De acordo com a Figura 3.16, as atenuações devido à chuva até a frequência de 8 GHz, para uma ampla gama de valores de distância e taxa de chuva, fica limitada na faixa entre 9 e 11 dB. Esses valores de atenuações são, geralmente, muito menores do que aqueles produzidos pelos desvanecimentos planos e não influenciam significativamente no desempenho dos radioenlaces que operam abaixo de 8 GHz. Entretanto, observa-se que para enlaces com 20 km e taxa de chuva de 60 mm/h, a atenuação por chuva ultrapassa 20 dB a partir da frequência de operação de 11 GHz. Nestes casos, deve-se considerar, para fins de dimensionamento de radioenlaces, o pior caso entre atenuações produzidas por desvanecimento e atenuações produzidas por chuva.

* * *



* * *

EXERCÍCIOS

- 3.1. Considere três radioenlace que operam na mesma frequência de 900 MHz. Determine a influência de um obstáculo cujo topo está 10 metros abaixo da linha de visada, no centro de cada um dos enlaces cujas extensões são 30 km, 50 km e 70 km.
- 3.2. Determine as atenuações devido à chuva para as condições apresentadas a seguir:
- a) Polarização Horizontal; $f = 15$ GHz; $d = 10$ km e $R_p = 100$ mm/h
 - b) Polarização Vertical; $f = 15$ GHz; $d = 10$ km e $R_p = 100$ mm/h
 - c) Polarização Horizontal; $f = 15$ GHz; $d = 20$ km e $R_p = 100$ mm/h
 - d) Polarização Horizontal; $f = 15$ GHz; $d = 20$ km e $R_p = 50$ mm/h

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RIBEIRO, J. A. J. *Propagação das ondas eletromagnéticas: princípio e aplicações*. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2004. 390 p.
- [2] SAUDERS, S. R. *Antennas and propagation for wireless communications systems*. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 409 p.
- [3] ITU – Recommendation ITU-R P.526-9 – *Propagation by diffraction*. Geneva, International Telecommunication Union, 2005.
- [4] ITU – Recommendation ITU-R PN.310-9 – *Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media*. Geneva: International Telecommunication Union, 1994.
- [5] MANNING, T. *Microwave radio transmission – design guide*. Norwood, MA: Artech House, 1999.
- [6] IVANEK, F. ed. *Terrestrial digital microwave communications*. Norwood, MA: Artech House, 1989.
- [7] ITU – Recommendation ITU-R P.453-9 – *The radio refractive index: its formula and refractivity data*. Geneva, International Telecommunication Union, 1999.
- [8] RUMMLER, W. D. et alii – Multipath fading channel models for microwave digital radio. *IEEE Communications Magazine*, 24 (11) : 30-42, November, 1988.
- [9] ITU – Recommendation ITU-R P.834-3 – *Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation*. Geneva, International Telecommunication Union, 1999.
- [10] SIEMENS – *Digital telecommunication Part 4 – Radio relay and Satellite Communication* – Berlin; Munich, Siemens Aktiengesellschaft, 1993.
- [11] ITU – Recommendation ITU-R P.530-13 – *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. Geneva, International Telecommunication Union, 2009.
- [12] ITU – Recommendation ITU-R P.838-3 - *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*. Geneva, International Telecommunication Union, 2005.