



Propagação Radioelétrica

2017/II

Profa. Cristina

Módulo II

Fenômenos de Propagação

Efeitos da Refração na Propagação

Fenômenos de Propagação

Quando uma onda se propaga e encontra certo meio, como um obstáculo ou uma superfície que separa duas regiões, esta interage com ele, o que gera alguns comportamentos específicos.

De uma forma geral, os fenômenos básicos que devem ser destacados quando se considera o ambiente de propagação são: reflexão, refração, difração e espalhamento ou difusão.

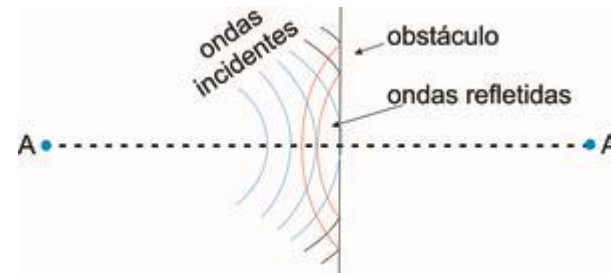
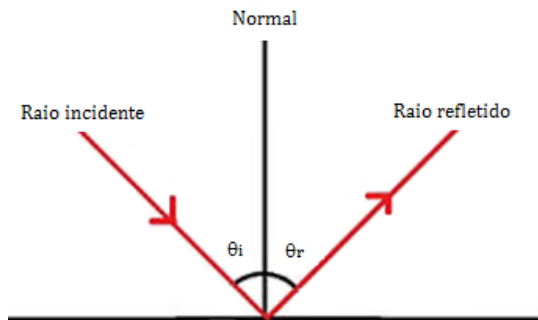
- Reflexão: Ocorre reflexão quando uma onda atinge determinada superfície e volta a propagar-se no meio de origem.
- Refração: Ocorre refração quando a onda muda de meio de propagação.
- Difração: Ocorre difração quando uma onda contorna obstáculos.
- Dispersão ou Espalhamento: Ocorre quando o meio onde se propaga a onda possui obstáculos com dimensões da ordem ou inferior ao comprimento de onda.

Fenômenos de Propagação

- Quando a onda eletromagnética incide na superfície de separação de dois meios, parte da energia é refletida e parte é transmitida, penetrando no segundo meio.
- As parcelas correspondentes de energia são calculadas através dos coeficientes de reflexão e transmissão (ou refração).
- Tais coeficientes dependem das propriedades elétricas dos meios em questão (permissividade elétrica e condutividade), da polarização da onda, da frequência e do ângulo de incidência sobre a superfície de separação, a qual deve ter dimensões muito maiores do que o comprimento de onda.
- Estes fenômenos são usualmente analisados pela óptica geométrica, sendo de fundamental importância nos enlaces em visibilidade.

Reflexão

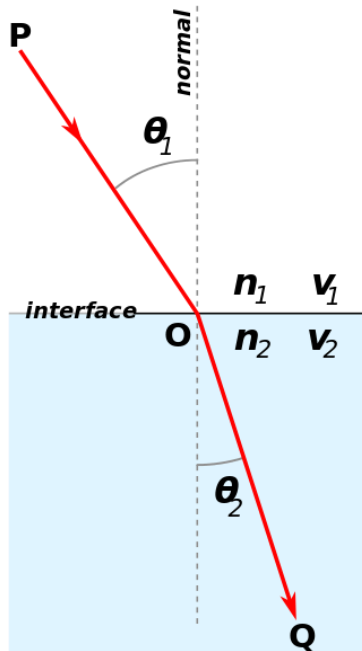
- A reflexão acontece quando uma onda atinge uma região que separa dois meios e retorna, se propagando no mesmo meio anterior.
- Desta forma, não há alteração na velocidade de propagação (que só depende do meio), nem na frequência (que só depende da fonte).
- Assim, o comprimento de onda da onda incidente é igual ao comprimento de onda da onda refletida.
- Na reflexão, o ângulo θ_i formado entre a onda incidente e a direção perpendicular à superfície, chamada de direção NORMAL, é idêntico ao ângulo θ_r formado pela direção normal e pela onda refletida.



As ondas refletidas no solo e nas paredes dos prédios fazem variar a intensidade do sinal recebido relativamente à onda que se propaga em espaço livre.

Refração

- A refração acontece quando uma onda atinge uma região que separa dois meios e a atravessa, passando a se propagar no outro meio.
- Desta forma, há alteração na velocidade de propagação (já que esta só depende do meio), o que gera uma alteração no comprimento de onda, mas sem que haja alteração na frequência. Isso vem acompanhado, na maioria dos casos, de uma alteração na direção de propagação da onda.



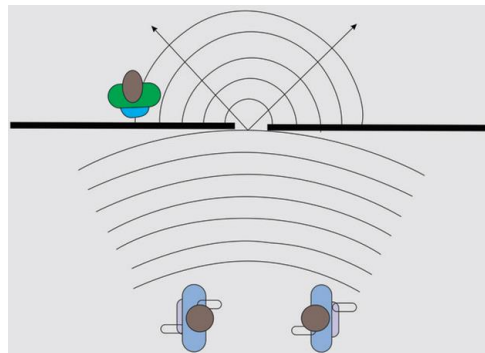
- Na refração, o ângulo θ_1 formado entre a onda incidente e a direção perpendicular à superfície, chamada de direção normal, é relacionado ao ângulo θ_2 formado pela direção normal e pela onda refratada.
- Essa relação é chamada de Lei de Snell-Descartes, e é assim expressa: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$. onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos dois meios.

Difração

- Quando uma frente de onda encontra um obstáculo, este reflete parte da energia da onda e transmite outra parte.
- Difração é o fenômeno responsável pela existência de energia na região de não visibilidade de um obstáculo.
- A intensidade do campo difratado apresenta um valor sempre inferior ao que seria obtido em espaço livre.
- Se tivermos uma porção da frente de onda desobstruída, os pontos dessa frente de onda se comportam como pequenas fontes pontuais de onda, gerando ondas do outro lado do obstáculo e que tendem a se espalhar do outro lado.

Difração

- Esse fenômeno chama-se difração, e esse princípio recebe o nome de PRINCÍPIO DE HUYGENS.
- A difração é mais intensa quando o comprimento de onda tem valor próximo ou maior do que as dimensões dos objetos utilizados para a observação.

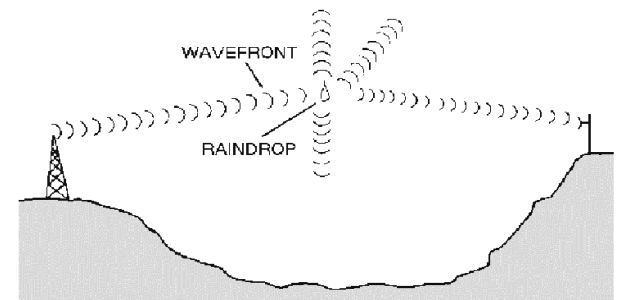


Através da difração pelo relevo do terreno e por construções existentes nas áreas urbanas e suburbanas das cidades pode-se cobrir áreas de sombra de um transmissor.

Dispersão ou Espalhamento

- Este fenômeno acontece quando o meio onde se propaga a energia possui obstáculos com dimensões da ordem ou inferior ao comprimento de onda.
- Relativamente aos fenômenos da reflexão e da difração, a análise teórica do espalhamento é bem mais complexa de ser estruturada, razão pela qual os modelos empregados na prática são, em geral, empíricos, obtidos a partir de dados experimentais.
- O meio responsável pelo espalhamento sempre possui condutividade, portanto, dependendo da frequência, observa-se adicionalmente certa absorção da onda em propagação.
- Quando a densidade dos objetos dispersantes se torna suficientemente grande, passam a comportar-se como um meio de propagação com um índice de refração característico.

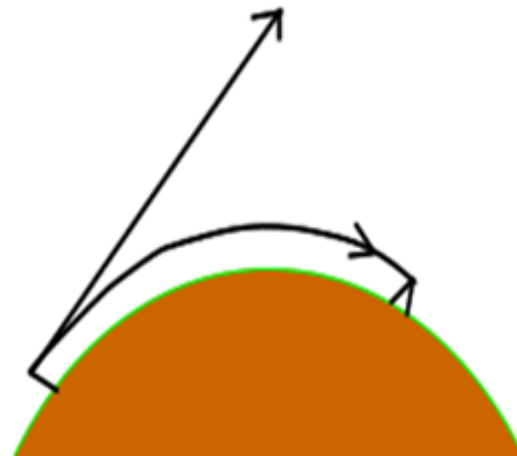
O espalhamento pela vegetação, por fios da rede elétrica, por sinais de trânsito, chuva, etc., são exemplos que acontecem em áreas urbanas e suburbanas.



Efeitos da Refração na Propagação

Efeitos da Refração na Propagação

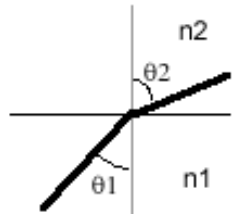
- Quando a propagação se dá no espaço livre, na ausência de atmosfera, ou em uma atmosfera homogênea, o caminho percorrido pela onda é em linha reta.
- No entanto, quando a propagação se dá através da atmosfera real da Terra, as variações no índice de refração atmosférico causarão encurvamento no percurso da onda, conforme ilustra a figura a seguir.
- Esta flexão permite que as ondas de rádio se propaguem além do horizonte visível.



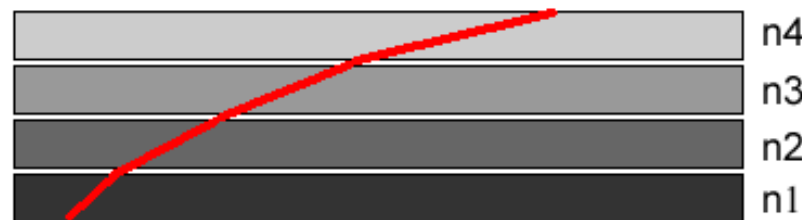
Efeitos da Refração na Propagação

- A refração na troposfera depende das variações no espaço do índice de refração n .
- Normalmente, o índice de refração cai com o aumento da altitude.
- O índice de refração governa a velocidade de propagação em um meio.
- Se o índice de refração cair com altura, o frente de onda será refratada progressivamente para baixo, conforme mostra a figura.

Snell's Law



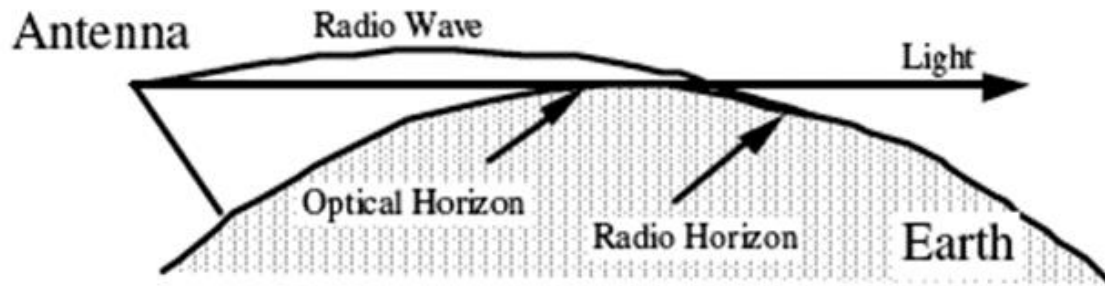
$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



$$n_1 > n_2 > n_3 > n_4$$

Efeitos da Refração na Propagação

- A refração atmosférica ocorre em função da não homogeneidade da troposfera.
- Em função da refração, o horizonte de rádio é maior que o horizonte óptico, conforme ilustra a figura abaixo.
- No contexto de propagação, estamos interessados na curvatura relativa da onda de rádio em comparação com a curvatura da Terra.



- Normalmente, o índice de refração na troposfera cai lentamente com a altitude, e a refração resultante faz com que o horizonte de rádio tenha um alcance 1.33 vezes maior do que o horizonte geométrico.
- A proporção entre o horizonte de rádio e o horizonte da Terra é, portanto, expressa pelo fator $k = 4/3$.

Efeitos da Refração na Propagação

- Anteriormente, vimos que a distância típica máxima de transmissão de onda direta depende da altura das antenas transmissoras e receptoras, sendo expressa por

$$d_{[km]} = \sqrt{2r} (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) = 3.57 (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$$

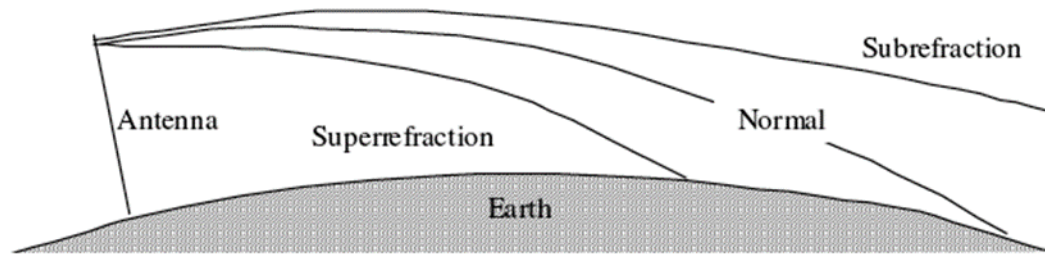
- No entanto, a equação acima não considera as condições de refração atmosférica.
- Para considerar as condições de atmosfera não homogênea, é necessário introduzir o fator $k = 4/3$ na equação para determinação da linha de visada, conforme

$$d_{[km]} = \sqrt{2rk} (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) = 4.12 (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}),$$

com $r = 6370 \text{ km}$ e $k = 4/3$.

Efeitos da Refração na Propagação

As condições atmosféricas podem ter um efeito dramático sobre a refração.



- Super-refração:
Ocorre quando a curvatura devida à refração é maior do que o normal, reduzindo assim o horizonte de rádio.
Esse fenômeno ocorre quando a temperatura aumenta, mas a umidade diminui com a altitude.
- Sub-refração:
Ocorre quando a curvatura devida à refração é menor do que o normal.
Esse fenômeno ocorre quando a temperatura diminui, mas a umidade aumenta com a altitude.
Em casos extremos, o sinal de rádio pode ser refratado para o espaço.

Efeitos da Refração na Propagação

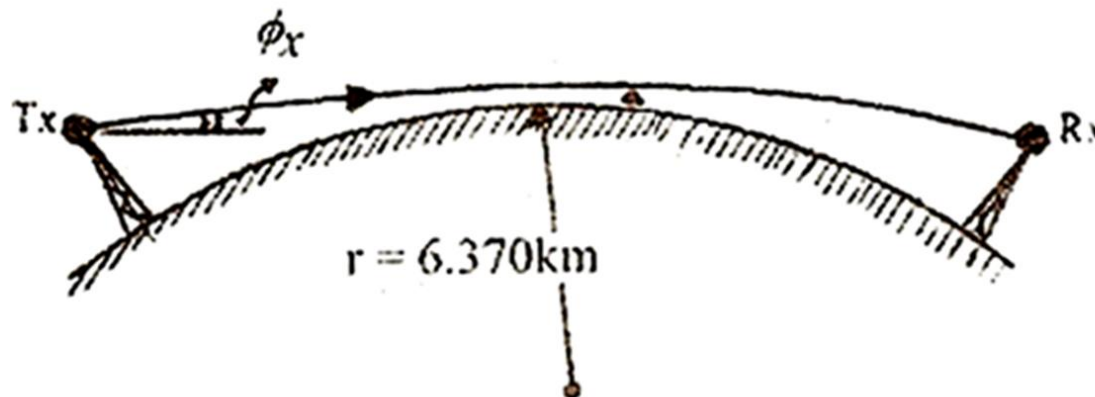
Na atmosfera padrão, as ondas se propagam na troposfera com raio de curvatura dado por

$$R_x = \frac{26641n_x}{\cos \phi_x}$$

onde:

ϕ_x → é o ângulo formado entre o percurso da onda com uma linha tangente à terra,

n_x → é o índice de refração da região (camada da troposfera).



Refratividade da Atmosfera

- O índice de refração é definido como a relação entre a velocidade de propagação da onda de rádio no espaço livre, e a velocidade de propagação da onda de rádio num meio específico.
- A partir do Índice de Refração define-se a Refratividade, N , como

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

- Para uma atmosfera padrão, e próximo à superfície da terra, o índice de refração do ar tem um valor muito próximo da unidade, aproximado por $n = 1.0003$ e, portanto,

$$N = (1.0003 - 1) \times 10^6 \cong 300.$$

Refratividade da Atmosfera

O Índice de Refração do ar n , portanto, a Refratividade, dependem principalmente da pressão atmosférica P (milibares), da temperatura T (Kelvin) e da pressão parcial do vapor de água e (milibares), através da seguinte relação:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2}$$

dry term *wet term*

Esta expressão pode ser usada para todas as radio frequências.
Para $f > 100GHz$, o erro é menor que 0.5% [ITU].

Gradiente de Refratividade

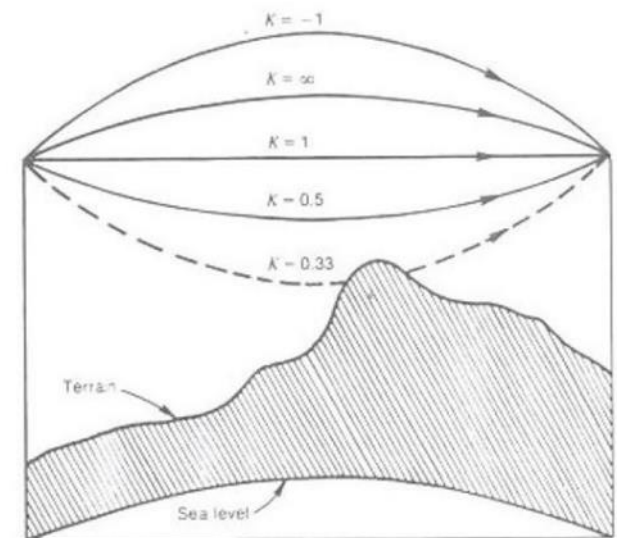
Provavelmente o valor de maior interesse no planejamento de rádio enlaces é o Gradiente de Refratividade.

Dado que a Refratividade varia com a altura, pode-se obter o Gradiente de Refratividade, G , expresso por

$$G = \frac{dN}{dh} = \left(\frac{-N}{7} \right) e^{-h/7}, \quad \text{onde } h \text{ é a altura, em metros, com relação ao nível do mar e } N \text{ é a Refratividade.}$$

Efeitos refrativos na curvatura do raio - o fator k

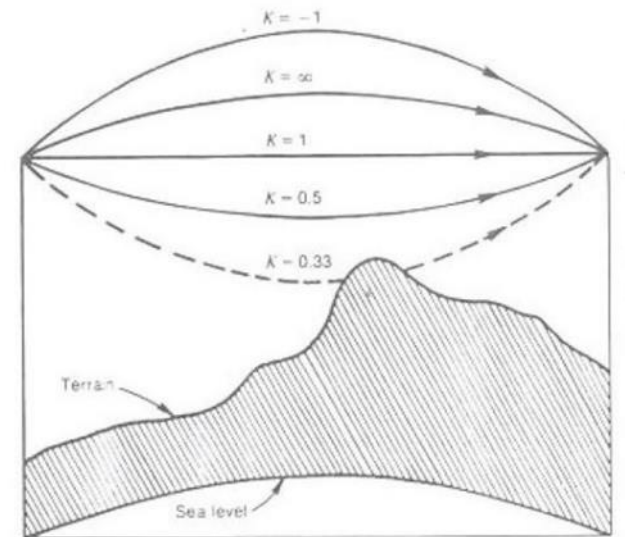
- O fator k é um fator de escala (normalmente assumido como constante para um percurso particular), que ajuda a quantificar a curvatura do percurso da onda.
- Enlaces de rádio que são descritos como em linha de visada (LoS), sugerem que as comunicações são limitadas pelo horizonte ótico (i.e. $k = 1$).
- Na maioria dos casos, os enlaces de rádio não são limitados à propagação em linha de visada.
- De fato, muitas vezes pode-se alcançar comunicações além do horizonte ótico por cerca de 15% (i.e. $k = 1.33$).



Efeitos da Refração na Propagação

- Numa atmosfera homogênea, a curvatura ou refração é contínua, fazendo com que o percurso de propagação tenda a seguir a curvatura da terra.
- Esta curvatura pode ser diretamente relacionada ao raio de duas esferas. A primeira esfera é a terra com raio de 6370 Km, e a segunda esfera é a esfera formada pela curvatura do percurso de propagação, sendo o centro, o próprio centro da terra.
- O fator k pode é chamado fator do raio efetivo da terra e pode, então, ser definido como a relação entre o raio r da curvatura de propagação e o raio efetivo da terra r_0 , ou

$$k = r/r_0$$



Efeitos da Refração na Propagação

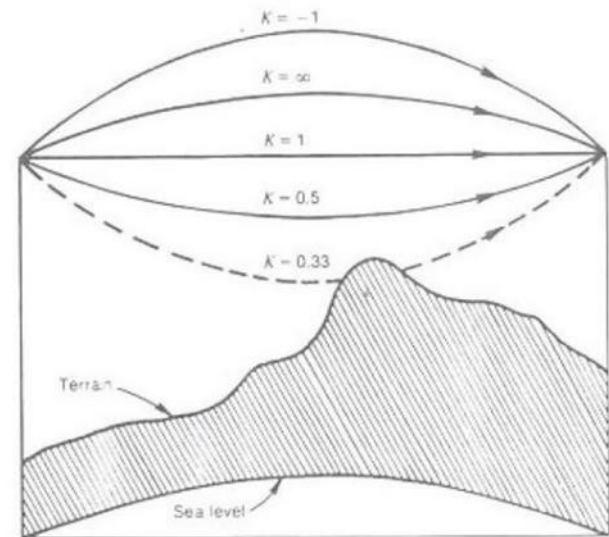
- Para uma atmosfera não homogênea, a proporção entre o horizonte de rádio e o horizonte da Terra (fator k) pode ser obtida a partir do Gradiente de Refratividade, conforme

$$\frac{1}{k} = 1 + r_0 \frac{dN}{dh}$$

onde:

r_0 é o raio efetivo da Terra (6370 km)









h é a altura acima da superfície.



Efeitos da Refração na Propagação

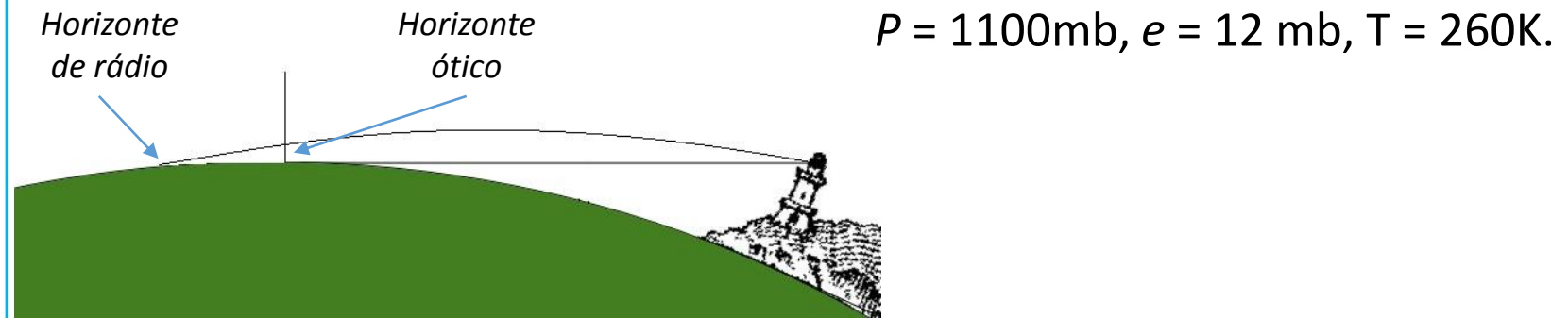
A Tabela a seguir apresenta algumas formas de refração na troposfera, devidas às diferentes distribuições do índice de refração. Na Tabela,

- $\frac{dN}{dh}$ é o gradiente de variação da refratividade com a altura;
- R é o raio do percurso da onda eletromagnética;
- r é o raio efetivo da Terra;
- k é o fator do radio efetivo da Terra.

Forma de Refração	$\frac{dN}{dh} [m^{-1}]$	k	$R [10^6 m]$	$r [10^6 m]$	Trajectoria Real	Trajectoria Equivalente
<u>Negativa:</u> N aumenta com o aumento de h . R é negativo e a trajetória é inclinada para cima. A onda de rádio se propaga afastando-se da superfície da Terra. Não ocorre frequentemente.	>0	<1	<0	<6.37		
<u>Padrão:</u> N decresce com aumento de h . R é maior do que o raio da Terra ($R = 25000 km > r = 6370 km$). A trajetória da onda é linear.	-0.04	$4/3$	2.5	8.5		
<u>Crítica:</u> É uma situação limite, onde N decresce com h , de modo que o valor de R é idêntico ao raio da Terra. O raio efetivo é infinito e, em consequência, a superfície da Terra é plana.	-0.157	∞	6.37	∞		
<u>Super-refração:</u> N decresce acentuadamente com o aumento de h . R é menor que o raio da Terra. O raio efetivo da Terra tem curvatura invertida ($r < 0$).	<0.157	<0	<6.37	<0		

Efeitos da Refração na Propagação - Exemplo

Determine a distância de uma torre de 50m de altura, instalada a 2km acima do nível do mar, até o horizonte de rádio, dadas as seguintes condições atmosféricas no nível do mar:



Dados:

$$P := 1100 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$$

$$e_p := 12 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$$

$$T := 260\text{K}$$

$$r := 6370\text{km}$$

$$h := 2.050\text{km}$$

$$h_t := 50\text{m}$$

Efeitos da Refração na Propagação - Exemplo

Refratividade:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2}$$

$$N := 77.6 \cdot 10^3 \frac{\text{K}}{\text{bar}} \cdot \frac{P}{T} + 3.73 \cdot 10^8 \frac{\text{K}^2}{\text{bar}} \cdot \frac{ep}{T^2}$$

$$N = 394.521$$

Gradiente de Refratividade:

$$G = \frac{dN}{dh} = \left(\frac{-N}{7} \right) e^{-h/7}$$

$$\text{GR} := -N \cdot \frac{e^{-h/7}}{7}$$

$$\text{GR} = -42.052$$

Efeitos da Refração na Propagação - Exemplo

Fator k :

$$\frac{1}{k} = 1 + r_0 \frac{dN}{dh} \qquad \text{dnh} := \frac{GR}{1 \cdot 10^6 \text{ km}} \qquad \text{dnh} = -4.205 \times 10^{-8} \frac{1}{\text{m}}$$

$$k := \frac{1}{(1 + r \cdot \text{dnh})} \qquad k = 1.366$$

Distância ao horizonte:

$$d_{[km]} = \sqrt{2rk} (\sqrt{h_t}) \qquad d := \sqrt{2 \cdot k \cdot r \cdot h_t} \qquad d = 29.497 \text{ km}$$