

FACULDADES INTEGRADAS ESPÍRITA – FIES
INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO - IAE
CAMPUS DE PESQUISAS GEOFÍSICAS MAJOR EDESEL DE FREITAS
COUTINHO
ANGELO ANTONIO LEITHOLD
ONEIDE JOSÉ PEREIRA

**O COMPORTAMENTO DA IONOSFERA, FENÔMENOS DE PROPAGAÇÃO,
REFLEXÃO E REFRAÇÃO DAS ONDAS DE RÁDIO**

PAULA FREITAS - PR

2007

1. INTRODUÇÃO

A esfera terrestre tem uma coloração azul brilhante por causa da atmosfera. Na sua parte superior, a partir de 50~60 km até uma distância indeterminada, arbitrada em torno de 550~600 km até acima de 1.000 km, existe grande quantidade de íons gerados pelas influências das energias de partículas cósmicas e solares. Levando-se em conta a distribuição e densidade iônica, esta região da atmosfera é dividida por camadas e é sujeita a variações geográficas, temporais e à dinâmica terrestre e celeste. Exerce um efeito sobre as características de propagação das ondas eletromagnéticas abaixo de si e no próprio meio. A disposição dos elementos da atmosfera neutra está relacionada com seu peso molecular e atômico, por este motivo, acima da região de equilíbrio difusivo há uma tendência para que a ionosfera separe-se em camadas. Uma vez que a composição da atmosfera, a partir dos cem quilômetros de altitude varia, os gases estratificam-se. Por exemplo: O₂, O, N₂, N, absorvem radiações quantitativamente, uma vez que o nível de absorção varia conforme a densidade destes. A densidade de ionização varia proporcionalmente com a altura, gerando assim camadas diferentes de absorção distintas e variáveis. Nas zonas mais baixas os elétrons livres e íons desaparecem, pois sempre a recombinação prevalecerá sobre a ionização, devido à maior densidade de partículas. Nas zonas mais altas é muito baixa a densidade de gases, moléculas e átomos, a quantidade de radiação, ou seja, a energia vinda do espaço é muito alta, porém, não existem gases, átomos, ou moléculas livres o suficiente para ser ionizadas, portanto só haverá ionização à medida que mergulhamos na atmosfera, até uma certa profundidade. Por causa do descrito acima, a ionosfera se localiza na região superior da atmosfera, compreendida aproximadamente entre 50 a 1000 km e tem como característica principal a alta condutividade.

As formas como as ondas eletromagnéticas se propagam no espaço são bastante difíceis de se entender, embora haja uma tendência para o simplismo, como maneira de descrevê-las. Appleton, em meados da década de 1920, foi o pioneiro na tentativa de tal explicação. Nesta, o comprimento de onda é fundamental para descrever o comportamento da propagação de ondas de rádio, que podem seguir por diversos caminhos. Por exemplo, se há propagação sobre a superfície terrestre, esta pode ser chamada de onda de Terra. Se propagando em direção à ionosfera, pode refletir, e assim ser captada a grandes distâncias do ponto de emissão. Se o meio de propagação é a

atmosfera, é fundamental o conhecimento de suas características, pois nesta região existem íons e elétrons suficientes para afetar a propagação das ondas de rádio, e, em seu topo está localizada a Ionosfera.

2. PROPAGAÇÃO DE RADIOFREQUÊNCIA

A propagação de ondas eletromagnéticas na atmosfera/ionosfera, apresenta uma série de propriedades ainda não totalmente compreendidas, e devem satisfazer a resposta do meio aos campos das ondas (relações constitutivas), entre campo elétrico com o magnético, dadas pelas equações de Maxwell:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t \quad (4)$$

Onde \mathbf{D} é o vetor deslocamento ou densidade de fluxo (C/m^2), ρ é a densidade volumétrica de carga (C/m^3), \mathbf{B} é o vetor indução magnética ($Wb/m^2 = 10^4$ Gauss no sistema CGS), \mathbf{H} é o vetor campo magnético (A/m), \mathbf{J} é o vetor densidade de corrente (A/m^2) e o vetor \mathbf{E} é o campo elétrico (V/m).

As relações constitutivas podem ser escritas na seguinte forma:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (5)$$

$$\mathbf{J} = \underline{\sigma} \mathbf{E} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (7)$$

onde ϵ é a permissividade do meio (F/m), ϵ_0 é a permissividade no vácuo ($8,85$ picoF/m = $10^{-9}/36\pi$ Fm⁻¹), \mathbf{P} é o vetor polarização do meio (C/m^2), \mathbf{J} é o vetor densidade de corrente (A/m^2), $\underline{\sigma}$ é a matriz condutividade ($1/\Omega m$) e μ é a permeabilidade (Wb/Am).

A onda, estando num meio eletricamente neutro, sem cargas livres ($\rho = 0$), ϵ e μ são independentes do espaço e tempo, o rotacional de (4) leva a:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\partial (\nabla \times \mathbf{B}) / \partial t \quad (8)$$

Usando: $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$ na equação anterior, onde $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ e substituindo (7):

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu \partial(\nabla \times \mathbf{H})/\partial t \quad (9)$$

Substituindo (3) na equação anterior e usando (5) e (6), chega-se a:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu \partial(\sigma \mathbf{E} + \epsilon \partial \mathbf{E} / \partial t) / \partial t \quad (10)$$

Re-escrevendo, obtém-se a equação da onda, esta é igual para \mathbf{E} e \mathbf{H} , assim:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \epsilon \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 - \mu \sigma \partial \mathbf{E} / \partial t = 0 \quad (11)$$

Solucionando (11) como onda plana: $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \exp i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)$, sendo ω a frequência angular da onda, \mathbf{k} o vetor de onda, os operadores ∇ e $\partial / \partial t$ são:

$$\nabla \equiv i\mathbf{k} \quad (12)$$

$$\partial / \partial t \equiv -i\omega \quad (13)$$

Substituindo (11) chega-se em:

$$[-\mathbf{k}^2 + \mu \epsilon \omega^2 + i\omega \mu \sigma] \mathbf{E} = 0 \quad (14)$$

Sendo \mathbf{E} diferente de zero:

$$-\mathbf{k}^2 = \mu \epsilon \omega^2 + i\omega \mu \sigma \quad (15)$$

Num meio não condutor ($\sigma = 0$), a equação da onda fica:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \epsilon \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 = 0 \quad (16)$$

O vetor da onda fica:

$$\mathbf{k} = \omega (\mu \epsilon)^{1/2} \quad (17)$$

A velocidade de fase, que é a velocidade de propagação, para um ponto de fase constante numa onda progressiva num meio dielétrico ideal é uma constante. Assim, t e \mathbf{r} variam juntos:

$$(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t) = C \quad (18)$$

Derivando em relação ao tempo:

$$\mathbf{k} \cdot d\mathbf{r}/dt - \omega = 0 \quad (19)$$

resolvendo, substituindo por (17), a velocidade de fase, considerando \mathbf{k} ao longo do eixo Z:

$$v_{\text{fase}} = v_f = d\mathbf{r}/dt = \omega / k_z = 1/(\mu \epsilon)^{1/2} \quad (20)$$

é uma característica do meio e depende das μ e ϵ . No vácuo, a v_f é a velocidade da luz:

$$v_f = 1/(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2} = c \quad (21)$$

Os meios dielétricos ideais são caracterizados por valores específicos de suas velocidades de fase. Sendo os valores relacionados com a velocidade da luz no vácuo, o fator de velocidade é a velocidade relativa, assim:

$$v_{\text{rel}} = v_f / c = (\mu_0 \epsilon_0)^{1/2} / (\mu \epsilon)^{1/2} = 1/(\mu_r \epsilon_r)^{1/2} \quad (22)$$

Para meios ferromagnéticos $\mu_r \cong 1$, a velocidade de fase relativa é:

$$v_{\text{rel}} = 1/(\epsilon_r)^{1/2} \quad (23)$$

O índice de refração de um meio é a velocidade de fase relativa, assim:

$$\eta = 1/v_{\text{rel}} = (\mu_r \epsilon_r)^{1/2} \quad (24)$$

Nos meios ferromagnéticos μ_r é aproximadamente 1, assim:

$$\eta = (\epsilon_r)^{1/2} \quad (25)$$

A polarização de uma onda eletromagnética é $\rho = E_x/E_y$, ou seja, a relação dada pelas componentes x e y do campo elétrico da onda no seu plano, num dado ponto do espaço, pode ser linear (horizontal e vertical), circular (esquerda e direita) ou elíptica. Se uma onda plana se propaga na direção positiva do eixo z ($k \parallel \hat{z}$), num meio Anisotrópico e eletricamente neutro, onde o campo elétrico E é perpendicular ao vetor da onda k ($E_z = 0$), assim, só existe E_x e E_y . Nas Equações (4) e (3), sem o vetor densidade de corrente J ($\sigma = 0$), aplicados os operadores das equações (12) e (13):

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = \omega \mathbf{D} \quad (26)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = -\omega \mathbf{B} \quad (27)$$

fazendo o produto vetorial, substituindo os valores de D e B ($\mu = \mu_0$) de (5) e (7):

$$kH_y = \omega (\epsilon_0 E_x + P_x) \quad (28)$$

$$-kH_x = \omega (\epsilon_0 E_y + P_y) \quad (29)$$

$$-kE_y = \mu_0 \omega H_x \quad (30)$$

$$kE_x = \mu_0 \omega H_y \quad (31)$$

Substituindo (30) em (29):

$$\eta^2 = 1 + P_y / \epsilon_0 E_y \quad (32)$$

substituindo (31) em (28):

$$\eta^2 = 1 + P_x / \epsilon_0 E_x \quad (33)$$

Relacionando (32) com (33) obtêm-se a polarização da onda:

$$\rho = E_y/E_x = P_y/P_x \quad (34)$$

De (30) e (31) se obtêm:

$$E_y/E_x = -H_x/H_y = \rho \quad (35)$$

O tempo de atraso de fases (ϕ_1 e ϕ_2) de dois sinais de frequências separadas (f_1 e f_2) quando estas são transladadas a uma frequência de referência comum f_o é dado, em VHF por:

$$\begin{aligned}\phi_1\lambda_1 &= \int \mu_1 ds = \int ds - \frac{40.3}{f_1^2} \int N ds = S_1 - \frac{40.3}{q_1^2 f_o^2} \text{TEC} \\ \phi_2\lambda_2 &= \int \mu_2 ds = \int ds - \frac{40.3}{f_2^2} \int N ds = S_2 - \frac{40.3}{q_2^2 f_o^2} \text{TEC}\end{aligned}\quad (36)$$

q_1 e q_2 são inteiros, relacionando f_o com f_1 e f_2 , λ_1 e λ_2 são os comprimentos de onda, μ_1 e μ_2 são os índices de refração (real) e TEC é o conteúdo total de elétrons. Em VHF a refração é pequena, e assumindo que os caminhos reais de S_1 e S_2 são iguais, a diferença de fase medida sob a frequência f_o é dada por:

$$\Delta\phi = \frac{\phi_2}{q_2} - \frac{\phi_1}{q_1} = \frac{40,3\text{TEC}}{f_o c} \left(\frac{1}{q_1^2} - \frac{1}{q_2^2} \right) \text{ em ciclos} \quad (37)$$

ou

$$\Delta\phi = \frac{80,6\pi\text{TEC}}{f_o c} \left(\frac{1}{q_1^2} - \frac{1}{q_2^2} \right) = \frac{8,447 \times 10^{-7} \text{TEC}}{f_o} \left(\frac{1}{q_1^2} - \frac{1}{q_2^2} \right) \text{ em radianos} \quad (38)$$

Usando o método diferencial de atraso de grupo e dispersão de fase da frequência Δf , f_1 é comparada com a mesma modulação numa frequência maior f_2 . A modulação de fase ϕ_m é:

$$\phi_m = \frac{80,6\pi}{c} \Delta f \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \text{TEC} = 8,447 \times 10^{-7} \Delta f \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \text{TEC} \quad (39)$$

$$f_2^2 \gg f_1^2:$$

$$\phi_m \approx 8,447 \times 10^{-7} \Delta f / f_1^2 \quad (40)$$

3. PROPAGAÇÃO NA IONOSFERA

Grosso modo, a ionosfera é dividida em três regiões principais, sejam a D, E e F. A camada D, compreendida entre 50 a 90 km de altura, e que contém a camada de raios cósmicos ou camada C. A camada E, está compreendida entre 90 a 140 km de altura, é produzida pelos raios X “moles” (Soft X-Rays) do Sol, e tem esporadicamente uma camada ionizada relativamente mais densa, conhecida como camada E esporádica (Es). A camada F, tem geralmente a maior densidade de elétrons, está acima dos 140 km de altura, e é subdividida em duas camadas: F1 e F2, as quais são produzidas pela radiação EUV (extreme ultraviolet light). Sobre a região do Equador, e em certas ocasiões, acima da camada F2 se forma a camada F3, importante para a “reflexão” de ondas de rádio na faixa de VHF. As ondas de rádio são refratadas somente nas camadas E, F1, F2 e quando estão presentes, na Es e F3. As camadas D e C são importantes absorvedoras e atenuam as ondas de rádio que se propagam em si, figura 1.

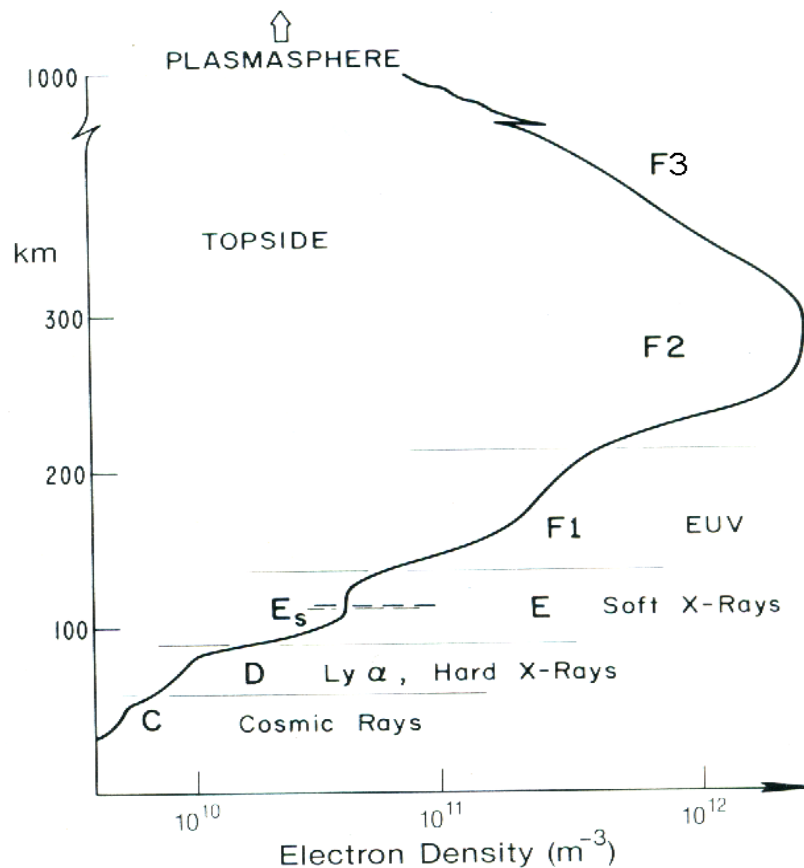


Figura 1: Estrutura da ionosfera em um dia de verão para uma latitude média.

FONTE MODIFICADA: Davies (1990, p.2).

A região mais importante para a propagação de HF é a F2, isso ocorre porque durante a noite, elementos da camada F1, que não recombinaram, passam a fundir com a F2, em função disso, ela está presente 24 horas por dia. Devida a sua altitude, a F2 permite caminhos longos de propagação, e é altamente refletora das partes mais altas da banda de HF. Os elétrons na região, por causa de sua alta energia, possuem tempo de vida maior, cerca de 20 minutos, em comparação aos seus tempos de vida nas outras regiões, cerca de 20 segundos para a camada E e de 1 minuto para a camada F1. O mecanismo de ionização ocorre porque os fótons ao colidir com átomos ou moléculas neutras e elétrons livres, geram, no primeiro caso elétrons livres e íons com carga positiva, no segundo, os elétrons são absorvidos por átomos e moléculas neutras, gerando assim íons negativos, a perda de elétrons ocorre durante qualquer horário. Os elétrons livres, ao se combinar com íons carregados positivamente formam partículas neutras, a este processo é dado o nome de recombinação. A variação da ionosfera portanto, é “modulada” pelas condições energéticas do meio, e este é o motivo pelo qual a comunicação em HF não ocorre na mesma frequência durante todo o dia. Sua variação é função das variações de energização do ciclo solar, estação do ano, latitude, longitude, hora, maré, etc. A escolha assim, do momento de comunicação deve ser em função das frequências ótimas de trabalho (FOT) para cada período.

Em outras frequências, por exemplo, SHF e UHF, quando a comunicação é entre a Terra e o Espaço, os principais efeitos da ionosfera incluem as absorções nas regiões C e D, a rotação de Faraday do plano de polarização da onda, dispersão por irregularidade, atraso de tempo, diferença de fase, frequência de ressonância, flutuações de amplitude ou cintilação, refração e efeitos relativísticos, embora existam muitos outros efeitos de menor importância. As frequências mais utilizadas estão compreendidas entre 1 e 10 GHz, por causa do efeito “noise window”, onde os ruídos são mínimos e a absorção atmosférica pode ser desprezada. A propagação é sempre influenciada pela concentração de elétrons ao longo da trajetória do sinal, e este efeito é mais notável quanto maior é a frequência. O diferencial de fase e a modulação de fase sofrem erros relativos por causa do atraso de propagação, este é predito por:

$$T = \left(\frac{40,3TEC}{cf^2} \right) = 1,343 \times 10^{-17} \text{ TEC} / f^2 \quad (41)$$

T é dado em segundos, f é a frequência em Hz e TEC é em elétrons m^{-2} . O erro angular ξ é relativo ao erro em distância ρ ($= cT$) é:

$$\xi \approx \frac{(R + a \sin \Delta) a \cos \Delta}{h_i (2a + h_i) + a^2 \sin^2 \Delta} \frac{\rho}{R} \approx \frac{(R + a \sin \Delta) \cos \Delta}{2h_i + a \sin^2 \Delta} \frac{\rho}{R} \quad (42)$$

Onde: h_i é a altura do centróide de maior densidade eletrônica, geralmente entre 300 a 450 km, a é o raio da Terra, Δ é o ângulo de elevação verdadeiro, R é a distância Terra-satélite. Para ângulos de incidência próximos ao zênite na presença de um gradiente horizontal de TEC, o erro angular é:

$$\xi = 40,3 f^{-2} dTEC / dx \quad (43)$$

Em HF (3 a 30 MHz, chegando a 50 MHz), a propagação de ondas eletromagnéticas no plasma ionosférico, se comporta analogamente como ondas sônicas dentro de fluidos de diferentes densidades. Ora refletindo, ora refratando, ora sem oferecer resistência alguma.

Num plasma com "N" colisões elétron - partículas (íons, átomos, moléculas, elétrons, etc), levando-se em conta o movimento térmico dos elétrons, pode-se dizer que tem ora características fluidas, ora características sólidas, pois o plasma não é líquido, nem sólido, tampouco gasoso. A densidade iônica pode ser definida como uma quantidade de elétrons e íons por metro cúbico. Para observar o efeito da reflexão das ondas de rádio, são desprezados os efeitos térmicos e gravitacionais. Dependendo da hora do dia ou da insolação, a quantidade de energia eletromagnética provinda do Sol, principalmente nas bandas de raios-X e ultravioleta, altera a dinâmica das camadas, alterando inclusive a condutividade e permissividade. Em algumas situações o comportamento da ionosfera pode ser semelhante a um condutor elétrico, ou mesmo como se fosse uma placa metálica (comportamento raro), cuja superfície alterasse sua geometria, ora ondulando, ora planificando. Este comportamento faz a camada iônica "sintonizar", ou seja, ressonar em determinadas frequências, onde uma vez se comportando como tal, pode perfeitamente refletir determinados comprimentos de onda. Nestes casos, a ionosfera pode em alguns pontos se comportar como um refletor perfeito. Também é perceptível a absorção, quando isto ocorre, a propagação cessa, este

efeito é notável nas camadas C e D. Os fenômenos de reflexão e refração ionosféricas fazem parte das propriedades mais amplamente utilizadas para transmissão e recepção em HF. Durante o dia o aumento de densidade iônica é significativo, e as regiões ficam perceptíveis. Durante a noite, o processo de recombinação faz ocorrer uma redução na densidade iônica, acontecendo assim a rarefação iônica das partículas restantes das camadas C, D, E e F1. Muitas das partículas que não recombinadas devida a rarefação, sobem e passam a fazer parte da camada restante, a F2, ou somente F. Isso propicia o aumento de altitude da camada F. A ausência das camadas C e D faz ocorrer a redução da absorção, consequência imediata é o aumento da propagação a longa distância.

Outro efeito notável que ocorre durante o dia, é a atenuação maior por absorção do sinal. Isso acontece por causa do aumento da densidade das camadas C e D. Mas, sob certas condições, também poderá ocorrer uma reflexão maior em F1 e F2, apesar da absorção. Dependendo de algumas condições de vento solar, maré e época do ano, na região do equador, surge a camada F3, esta é altamente “reflexiva” para frequências altas do HF e até 50 MHz. Quando a atividade solar é muito intensa, a camada F3 pode facilitar a propagação de sinais acima do VHF e podem ocorrer fenômenos de canalização.

A dutificação ou canalização dos sinais entre camadas e o espalhamento são fenômenos que ocorrem quando a densidade iônica entre as camadas é alta (Ver figura 4). A reflexão ionosférica é explorada por sistemas de radiodifusão com antenas de transmissão em ângulo baixo. As propriedades operacionais das ionossondas (sistemas compostos de transmissores, receptores e antenas direcionais apontadas diretamente para a ionosfera, e sistemas que utilizam antenas verticais, para VLF) propiciam um conhecimento do comportamento das camadas iônicas.

O princípio da reflexão ionosférica em ângulos altos é utilizado há muitos anos para pesquisas, porém pouco utilizado nas comunicações. O efeito ocorre sobre uma faixa de alturas estreita e em baixas frequências, onde, ou os raios refratam fortemente. No caso da refração normal, a distância atingida por estes é apreciável, chegando a milhares de quilômetros. No caso da reflexão direta (muito raro), esta não ultrapassa a algumas centenas de quilômetros. O espalhamento fraco e incoerente de energia ocorre devido às flutuações térmicas e aleatórias da densidade eletrônica no plasma ionosférico. Este espalhamento tem sua eficiência aumentada pelas irregularidades ionosféricas e pelo aumento da densidade iônica.

Outro fenômeno de reflexão ionosférica é a cintilação, esta ocorre devido à atuação dos sinais perante as irregularidades ionosféricas. Aparentemente as irregularidades agem como uma tela de fase variável nos sinais transionosféricos. Esta “tela eletrônica” dá origem à efeitos de difração com cintilação em amplitude (Ocorre em HF, VHF, UHF e SHF), e variação do ângulo de chegada e fase. Portanto, num meio variável onde ocorrem densidades variáveis, acontece o fenômeno da reflexão, refração e difração dos sinais de radiofrequência, e este pode ser simultâneo ou não. Para comunicações em HF (3 – 30 MHz), a onda eletromagnética se propaga em três modos.

O primeiro seria a utilização de ondas terrestres (*ground wave*), para distâncias pequenas de 100 km no continente e 300 km sobre o mar. O alcance, neste caso, depende da altura da antena, polarização, frequência, tipo de terreno, vegetação ou estado do mar, é muito notável no topo do espectro de HF, próximo aos 30 MHz.

Outro modo seria o que utiliza a propagação por onda direta ou linha de visada (*direct or line of sight wave*), há interação com a onda refletida na Terra, e depende da separação do terminal, frequência e polarização, neste modo de operação o terreno e seu relevo, portanto são de fundamental importância.

Por último viria o modo de propagação por onda celeste (*sky wave*), neste o sinal é refletido via ionosfera. Neste caso, existe uma frequência máxima de utilização (*Maximum Usable Frequency - MUF*), esta é determinada pelo estado da ionosfera próximo à área de reflexão, o sinal propagado é refletido na área de máxima densidade eletrônica.

Dentre os mais notáveis efeitos, a comunicação durante o dia é possível via camadas E ou F, podendo variar as frequências de uso conforme as condições iônicas. A maior frequência utilizável pela camada E é chamada EMUF, e pela camada F é a FMUF. Estas variam dinamicamente, ou seja, conforme o ciclo solar, a hora e a sazonalidade. Para obter a MUF são utilizados nomogramas ou modelos de camadas parabólicas. Como sua variação durante o dia é muito acentuada, para haver uma garantia de comunicação em 95% do tempo, a MUF deve ser reduzida, ou seja, otimizada. Para isso se usa o termo “FOT” (*Frequência Ótima de Trabalho*, ou *Optimum Working Frequency - OWF*), em geral, o FOT pode ser usado em torno de 0,85 da MUF. A menor frequência permitida é afetada principalmente pela absorção ionosférica da camada D, embora tal absorção também seja notável na camada C. A este efeito se denomina “frequência mínima utilizável” ou *Lowest Useful Frequency (LUF)*.

Quando se diz reflexão ionosférica, são sucessivas refrações, embora, em casos muitos especiais ocorram reflexões diretas, conforme citado anteriormente e descrito na seção “Lei de Snell”. Geralmente o sinal de rádio, em HF, depois de deixar a antena percorre a atmosfera baixa e atinge as regiões iônicas. Em seguida refrata (Lei de Snell). Isso ocorre porque existe uma variação de densidade iônica muito grande entre as camadas. A RF depois de refratada atinge uma determinada região que fica a certa distância do ponto de emissão, a este efeito, dá-se o nome de “salto em distância”, o salto é limitado pela altura da ionosfera e a curvatura da Terra.

Para cada camada, há uma variação angular que também ocorre quando é variada a frequência e o ângulo de elevação da antena, principalmente. Dependendo do local a ser atingido, podem ser necessários vários saltos. Na Figura 2, se observa um salto para diferentes alturas das camadas E (100 km) e F (300km).

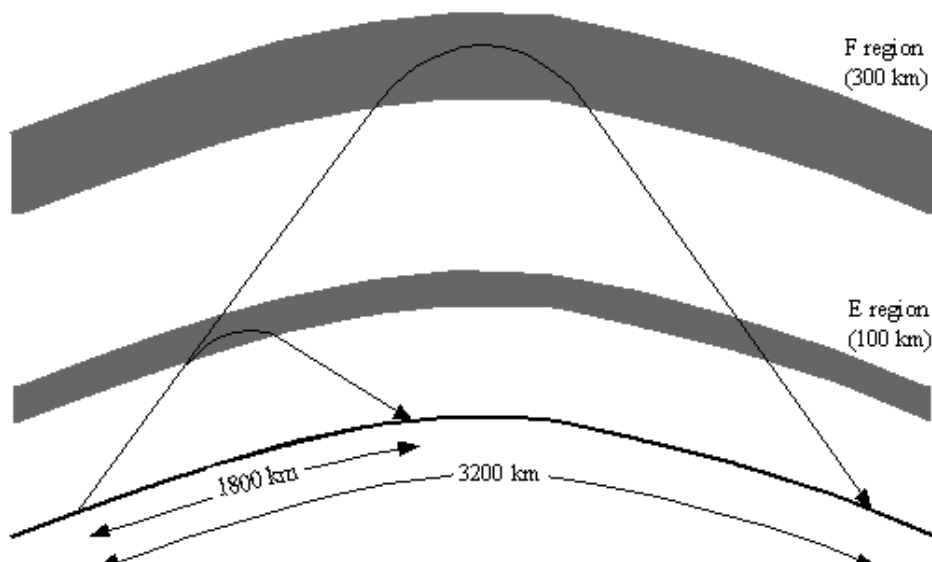


FIGURA 2 - Salto em distância com um ângulo de elevação de antena de 4° .
FONTE: IPS (2002, p.15).

Para a transmissão de um ponto a outro, é aconselhável usar a maneira que requer o menor número de saltos entre o transmissor e receptor, a este é dado o nome de “modo de primeira ordem”. Havendo necessidade de um salto adicional, se chama “modo de segunda ordem”. Tanto para a camada E quanto a F existem as duas maneiras, contudo, para a camada E, em especial, isto não funciona à noite. Também existem modos chamados “complexos”, estes são aplicáveis com a utilização de combinações de camadas.

A refração de ondas é alterada durante todo o tempo, pois a ionosfera é dinâmica e ondula. Assim, esta dinâmica determina os modos de propagação e de refrações da ionosfera, podendo inclusive os sinais se propagar sem reflexões intermediárias na Terra. A este método se dá o nome de “*chordal mode*” (fig 3), ou seja, a propagação de ondas por dutos entre camadas, já citado anteriormente.

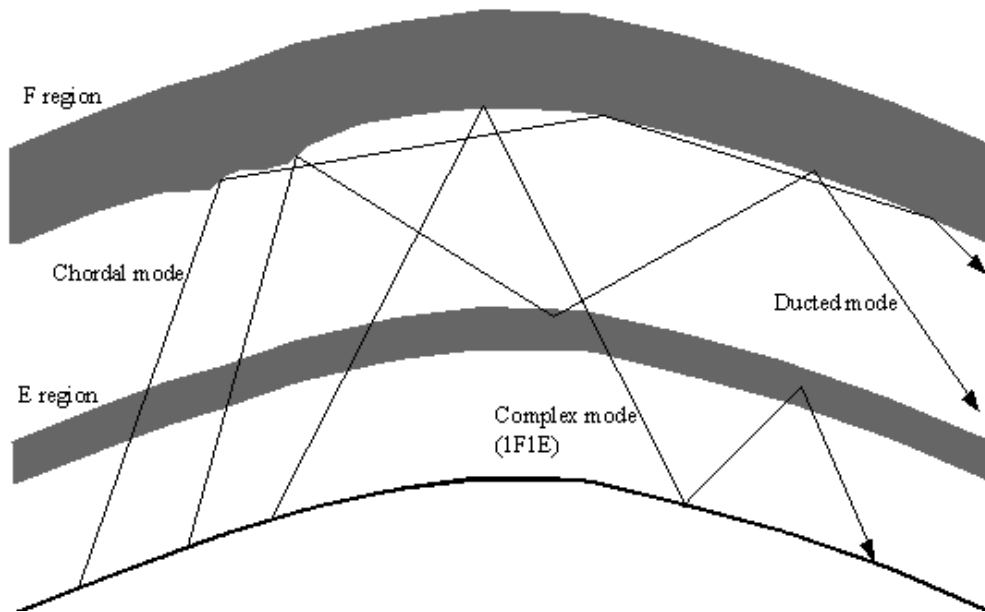


FIGURA 3 - Modos de propagação complexa, duto e *Chordal*.
FONTE: IPS (2002, p.17).

O fenômeno da refração dos sinais de rádio na atmosfera, principalmente HF, nem sempre é compreendido. Isso ocorre muitas vezes por alguma falta de conhecimento dos mecanismos envolvidos.

Do Espaço à superfície da Terra, só haverá ionização na medida em que se mergulha na atmosfera, até certa profundidade. Ou seja, no topo da atmosfera, cerca de 2000 km, há predominância de plasma, é desta forma porque o vento solar é assim composto. Quando ocorrem explosões solares, é expelida grande quantidade de plasma, com muitos milhares de quilômetros de extensão. A sua velocidade de propagação, dependendo da energia da massa ejetada, pode chegar até 2000 km por segundo. A chegada dos raios X e UV, nestes casos, ocorre muito antes da chegada da massa coronal ejetada (CME - coronal mass ejection), e se inicia um processo de aumento de ionização da ionosfera. Durante o período em que a Terra está exposta, as características das diversas camadas iônicas e atmosféricas, como um todo são alteradas. Isso gera severas perturbações nos sistemas de comunicação, provocando mesmo o bloqueio. Este

pode ser resultante de uma saturação da ionosfera como um todo, ou seja, um grande aumento da densidade iônica em todas as camadas.

Na medida em que aumenta a ionização e até certo limite, ocorre uma substancial melhora da propagação em HF, isso é devido ao espessamento das camadas F's e E. Contudo, na medida em que as camadas C e D se espessam, aumenta a absorção dos sinais propagados, cessando assim a propagação da RF no meio. No caso de SHF, devido aos picos de ionização nas camadas, ocorrerá um aumento na refração do sinal, sendo necessárias correções nas antenas Terra-Espaço, podem acontecer inclusive Black-out's por absorção. As perturbações ionosféricas quando repentinas, logicamente afetam a região voltada para o Sol, em geral tem duração limitada e atingem principalmente as frequências de entre 2 MHz e 30 MHz, podendo chegar em outras bandas.

Caso as perturbações sejam menos acentuadas com maior duração, as variações iônicas podem durar por um tempo que vai de algumas horas chegando a períodos bem mais extensos. Durante tempestades solares, transmissões que utilizem a ionosfera diminuem drasticamente de intensidade e podem até se extinguir por um longo tempo, este tipo de fenômeno pode atingir todo o globo. Assim, a densidade iônica pode variar fortemente e a ionosfera pode assumir diversas configurações, desde totalmente refletora (Caso raro), até tênues refratoras das ondas eletromagnéticas propagadas em si.

4. A LEI DE SNELL

O princípio da refração, ou Lei de Snell, pode explicar facilmente como pode se comportar a ionosfera nas mais diversas condições, conforme a figura 4.

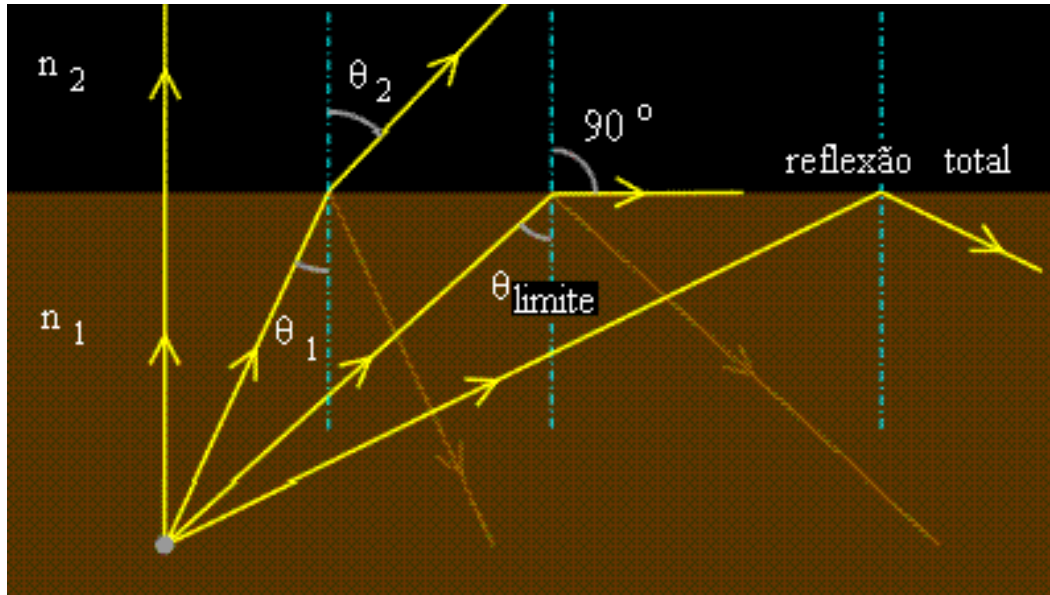


FIGURA 4: Lei de Snell da Refração. Fonte (Angeloleithold).

Da figura 4, seja a expressão:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (44)$$

$$\theta_{\text{crit}} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2 \right) = \arcsin \frac{n_2}{n_1} = 48.6^\circ. \quad (45)$$

$$k_{xReg1} = k_{xRreg2} \quad (46)$$

$$n_1 k_0 \sin \theta_1 = n_2 k_0 \sin \theta_2 \quad (47)$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (48)$$

Onde

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{\omega}{c} \quad (49)$$

$$\cos \theta_1 = \mathbf{n} \cdot (-\mathbf{l}) \quad (50)$$

Logo

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (1 - (\cos \theta_1)^2)} \quad (51)$$

Assim

$$\mathbf{v}_{\text{reflet}} = \mathbf{l} + (2 \cos \theta_1) \mathbf{n} \quad (52)$$

$$\mathbf{v}_{\text{refrat}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \mathbf{l} + \left(\frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 - \cos \theta_2\right) \mathbf{n} \quad (53)$$

(n) -1

$$\mathbf{v}_{\text{refrat}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \mathbf{l} + \left(\frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 + \cos \theta_2\right) \mathbf{n}. \quad (54)$$

Desta forma, pela figura 5 teremos:

$$Q_z = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta = 2k_z \quad (55)$$

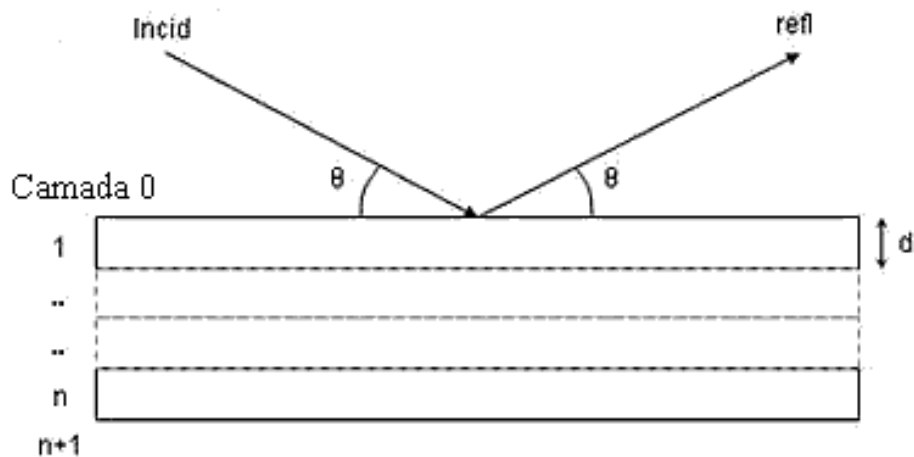


FIGURA 5: Refração multicamadas (Fonte Angeloleithold)

$$k_n = \sqrt{k_z^2 - 4\pi(\rho_n - \rho_0)} \quad (56)$$

$$r_{n,n+1} = \frac{k_n - k_{n+1}}{k_n + k_{n+1}} \quad (57)$$

$$r_{n,n+1} = \frac{k_n - k_{n+1}}{k_n + k_{n+1}} \exp(-2k_n k_{n+1} \sigma_{n,n+1}^2) \quad (58)$$

Para:

$$\beta_0 = 0, \quad \beta_n = ik_n d_n \quad e \quad i^2 = -1$$

$$c_n = \begin{bmatrix} \exp(\beta_n) & r_{n,n+1} \exp(\beta_n) \\ r_{n,n+1} \exp(-\beta_n) & \exp(-\beta_n) \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$M = \prod_0^n c_n \quad e \quad R = \left| \frac{M_{10}}{M_{00}} \right|^2 \quad (60) \text{ e } (61)$$

Assim temos a figura 6 e dela:

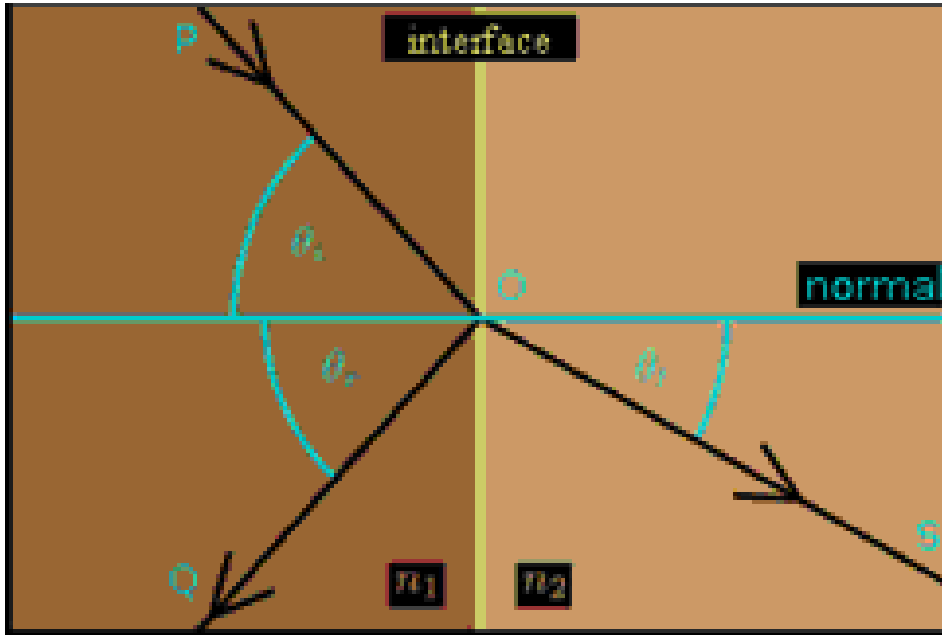


FIGURA 6: Refração e reflexão (Fonte: Angeloleithold)

$$R_s = \left[\frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 \quad (62)$$

$$R_s = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (63)$$

$$R_s = \left[\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}} \right]^2 \quad (64)$$

$$R_p = \left[\frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 \quad (65)$$

$$R_p = \left(\frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right)^2 \quad (66)$$

$$R_p = \left[\frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} + n_2 \cos \theta_i} \right]^2 \quad (67)$$

Para:

$$T_s = 1 - R_s \quad \text{e} \quad T_p = 1 - R_p.$$

$$R = r^2 \quad \text{e} \quad T = \left(\frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \right)^2$$

Conclui-se que o índice de refração diminui com a altura, levando-se em conta um meio composto de plasma, como a ionosfera, com camadas paralelas e densidades semelhantes, de acordo com o provado acima algebricamente, portanto usando a Lei de Snell, um raio incidente procedendo da Terra, se curvará até atingir uma trajetória horizontal. Se $v_1 > v_2$ o ângulo $\theta_1 > \theta_2$, o raio refratado se aproxima da normal. Se $v_1 < v_2$ o ângulo $\theta_1 < \theta_2$ o raio refratado se distancia da normal. Neste segundo caso, para um ângulo limite θ_c o ângulo de refração é $\theta_2 = \pi/2$, assim:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \tag{68}$$

O ângulo incidente para o qual o raio refratado emerge tangente a superfície de separação entre os dois meios, é o ângulo limite. A onda incidente tendo ângulo maior que o ângulo limite (Figuras 4 e 5), o seno do ângulo de refração é maior que um. As ondas ao incidir com ângulo acima do limite, não propagam ao segundo meio, são refletidas totalmente na superfície de separação. Ou seja, na medida em que é aumentado o ângulo de incidência θ_1 , aumenta o ângulo de refração até $\pi/2$. Aumentando o ângulo de incidência, a onda incidente se reflete para o primeiro meio, conforme comprovado acima. Desta forma é que, em casos especiais e não tão raros assim, dependendo da taxa de ionização da ionosfera. Portanto sua densidade, pode ocorrer o fenômeno da reflexão total do sinal irradiado. Mas, é mais comum o sinal ser refratado pelas múltiplas densidades das camadas iônicas retornando à Terra após uma trajetória curvilínea.

5. REFERÊNCIAS

Wolf, K. B. (1995), "Geometry and dynamics in refracting systems", *European Journal of Physics* 16: 14–20.

Rashed, Roshdi (1990). "A pioneer in anaclastics: Ibn Sahl on burning mirrors and lenses". *Isis* 81 (3): 464–491. doi:10.1086/355456.

David Michael Harland (2007). "Cassini at Saturn: Huygens results". p.1. ISBN 0-387-26129-X

"Ptolemy (ca. 100-ca. 170)". *Eric Weinstein's World of Scientific Biography*.

I. Sabra (1981), *Theories of Light from Descartes to Newton*, Cambridge University Press. (cf. Pavlos Mihas, *Use of History in Developing ideas of refraction, lenses and rainbow*, p. 5, Demokritus University, Thrace, Greece.)

Antenna Theory (3rd edition), by C. Balanis, Wiley, 2005, ISBN 0-471-66782-X;

Antenna Theory and Design (2nd edition), by W. Stutzman and G. Thiele, Wiley, 1997, ISBN 0-471-02590-9;

Antennas (3rd edition), by J. Kraus and R. Marhefka, McGraw-Hill, 2001, ISBN 0-072-32103-2;

Antennenbuch, by Karl Rothammel, publ. Franck'sche Verlagshandlung Stuttgart, 1991, ISBN 3-440-05853-0; other editions (in German)

Antennas for portable Devices, Zhi Ning Chen (edited), John Wiley & Sons in March 2007

The ARRL Antenna Book (15th edition), ARRL, 1988, ISBN 0-87259-207-5