

A

PROPAGAÇÃO

DAS ONDAS DE RÁDIO

Eng. Joost van Damme

1. A ATMOSFERA TERRESTRE

Antes de estudar a propagação das ondas de rádio, devemos ter uma idéia clara da atmosfera terrestre.

O ar é composto de nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e alguns outros gases. A maior densidade do ar está situada junto à superfície terrestre, onde o ar age como bom dielétrico. A maiores altitudes a densidade diminui e o ar se torna muito rarefeito. O limite da atmosfera, entretanto, está situado a altitudes bem grandes, 1000 quilômetros e até mais.

Na troposfera, que é a camada inferior da atmosfera e que se estende até 10 a 14 quilômetros acima da superfície terrestre, todos os gases estão bem misturados; nela a constituição do ar é praticamente constante. Mas a maiores altitudes (centenas de quilômetros acima da superfície terrestre) o ar é muito rarefeito e os gases são distribuídos em camadas superpostas. A posição relativa de cada camada é determinada pelo peso do gás. Portanto, a grande altitudes, a constituição da atmosfera não é homogênea.

O ar é ionizado (isto é: certos átomos dos gases constituintes do ar são "quebrados" em elétrons livres e íons positivos) pelos raios solares, pelos raios cósmicos e por outros fatores. O ar ionizado influencia fortemente a propagação das ondas de rádio.

A ionização mais pronunciada dos vários gases ocorre a altitudes diferentes, isto porque as diversas camadas de gás predominam a altitudes diferentes. Na prática, verificou-se que a parte ionizada da atmosfera, a ionosfera, está dividida em diversas camadas, conforme a figura 1.

A camada D, que só existe durante o dia, está localizada a uma altitude de 60 a 80 quilômetros; a camada E entre 90 a 130 quilômetros; a camada F entre 250 e 350 quilômetros, à noite. Uma particularidade interessante da camada F é que ela se subdivide, durante o dia, em duas camadas: a F₁ situada a uma altitude entre 180 e 220 quilômetros e a F₂, entre 220 e 500 quilômetros.

É claro que não existem limites precisos entre estas camadas e as outras partes da atmosfera. A altitude, a espessura e a condutividade das camadas ionizadas variam durante as 24 horas do dia e

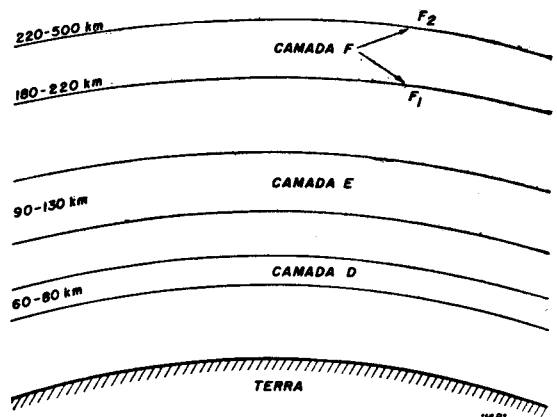


FIG. 1

As camadas ionizadas em que se divide a ionosfera.

durante o ano, isto devido às mudanças da atividade ionizadora dos raios solares. As propriedades da ionosfera entretanto, mudam de ano para ano num ciclo de onze anos, o qual também é atribuído à atividade do sol. Quanto maior a intensidade de ionização do sol, maior será a condutividade e a espessura das camadas ionizadas, enquanto que diminui sua altitude. Durante o dia sua condutividade e espessura são maiores e sua altitude menor do que durante a noite. No verão também sua condutividade e espessura são maiores e sua altitude menor do que no inverno.

Cada 11 anos se repete o máximo do ciclo de manchas solares, estas manchas sendo poderosas fontes de emanações ionizadas. Então a condutividade e a espessura das camadas ionizadas da atmosfera terrestre atingem seus valores máximos, enquanto que suas altitudes diminuem. Estas são as leis complexas que governam as propriedades da atmosfera, e estas propriedades, por sua vez, governam a propagação das ondas de rádio. Ao lado destas variações periódicas, existem também variações caóticas, as quais não podem ser previstas.

As tempestades magnéticas, por exemplo, que afetam fortemente a recepção de rádio, duram às vezes horas e até dias. Estas tempestades magnéticas são causadas or poderosas erupções de elétrons do sol; estes elétrons atingem a atmosfera terrestre e influenciam fortemente as camadas ionizadas. A camada F_2 é particularmente afetada por estes fenômenos; sua condutividade diminui, sua altitude aumenta e a camada se divide em nuvens de elétrons ou se desfaz completamente.

Quando meteoros entram na atmosfera na altura da camada E (em torno dos 100 quilômetros), tem-se, às vezes, o aparecimento da chamada "camada E esporádica", caracterizada por uma ionização muito forte, a qual não se estende além dos mil quilômetros e só existe por algumas horas.

Ao lado de todos estes fenômenos, ocorrem continuamente flutuações caóticas na atmosfera, sendo estas mais intensas nas camadas superiores, especialmente na camada F_2 .

Todas estas mudanças citadas, as quais ocorrem constantemente na ionosfera, interferem na propagação normal das ondas de rádio e às vezes impossibilitam completamente a radiocomunicação. Isto dificulta o conhecimento das leis de propagação e o cálculo de sistemas de rádio-comunicação com base nestas leis.

Vamos agora analisar diversos fenômenos que são observados na propagação das ondas de rádio.

2.1 — Dissipação da energia das ondas de rádio

Quando uma onda de rádio sai da antena de um transmissor e começa a caminhar em todas as direções, a energia ondulatória é distribuída num espaço constantemente em expansão. Conseqüentemente, a quantidade da energia ondulatória em cada ponto do espaço diminui constantemente.

A transmissão direcional é o único meio de diminuir o efeito de dissipação. Nesta transmissão

direcional a onda de rádio é enviada como um estreito feixe, a uma região desejada. Isto aumenta o raio de comunicação de uma estação de rádio e pode ser usado em certas comunicações secretas, pois só receptores no caminho do feixe podem receber o sinal. A transmissão direcional é ainda usada por rádio-faróis, tão importantes para a aviação e navios em alto mar.

2.2 — A absorção das ondas de rádio

A energia das ondas de rádio, que atravessam diversas substâncias, é absorvida por estas substâncias. Só no espaço interplanetário é que não ocorre absorção, o que possibilita a utilização de transmissores de baixa potência nas comunicações interplanetárias. O ar não-ionizado absorve pouca energia das ondas de rádio. Uma boa fração da energia é absorvida por dielétricos sólidos, semicondutores e condutores. Quando uma onda de rádio encontra um condutor, este absorve a maior parte da energia ondulatória. Isto é devido ao movimento de elétrons criado no condutor e que origina uma corrente de alta frequência, sendo que isto exige uma energia, que o condutor absorve da onda de rádio. É neste fenômeno, aliás, que se fundamenta o princípio da recepção de rádio. Porém, se a onda caminha paralelamente ao condutor, haverá muito menor absorção de energia. É por isto que as ondas de rádio se propagam a maiores distâncias quando elas caminham ao longo de superfícies condutoras, como o mar, rios, trilhos de estrada de ferro e linhas de transmissão. A distância de propagação é consideravelmente encurtada quando a onda caminha ao longo de superfícies más condutoras, como uma extensão de terra seca.

Como mencionado acima, os dielétricos também absorvem energia ondulatória. As camadas ionizadas da atmosfera, sendo meios semi-condutores, absorvem uma boa fração da energia das ondas. À medida que as ondas de rádio caminham ao longo da superfície terrestre sua energia é absorvida pelo solo, pelos objetos e pelas obstruções, tais como montanhas, florestas, linhas de transmissão de eletricidade, etc.

2.3 — Reflexão e Refração das Ondas de rádio

Num meio homogêneo, as ondas de rádio caminham em linha reta, mas quando uma onda passa de um meio para outro, ocorre uma reflexão e uma refração. Estes fenômenos ocorrem na superfície de separação de dois meios com constantes dielétricas E_1 e E_2 respectivamente.

Quando uma onda atinge a superfície de separação de dois meios, ela volta num certo ângulo e aí temos a reflexão (Fig. 2). Uma onda que atinge uma superfície lisa num ângulo reto é refletida segundo o mesmo ângulo, i.e., ela volta pelo mesmo caminho que veio. Se um feixe de ondas paralelas atinge uma superfície lisa, o feixe continuará paralelo, após a reflexão. Se a superfície não for lisa, as ondas refletidas divergirão. Os condutores são os melhores refletores de ondas de rádio.

Quando uma onda de rádio passa de um dielétrico para outro, ela muda sua direção e aí te-

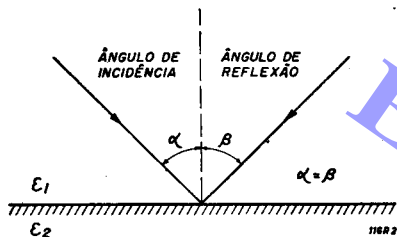


FIG. 2

Reflexão das ondas.

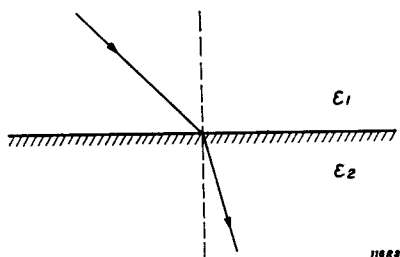


FIG. 3

Refração das ondas.

mos a refração (Fig. 3). Quanto maior for a diferença entre as constantes E_1 e E_2 e quanto maior for o comprimento de onda, mais pronunciada será a refração. A refração ocorre por causa da diferença de velocidade com que as ondas passam através das várias substâncias.

Portanto uma onda de rádio que atinge um condutor é parcialmente absorvida e refletida. Se esta onda atinge um dielétrico, ou um semicondutor, ela é absorvida, refletida e refratada.

2.4 — Difração das ondas de rádio

Se uma onda de rádio encontra um obstáculo, como uma montanha, um edifício grande, etc., esta onda é capaz de atingir o outro lado do obstáculo encurvando seu caminho. Este fenômeno é conhecido como difração (Fig. 4). Quanto maior é

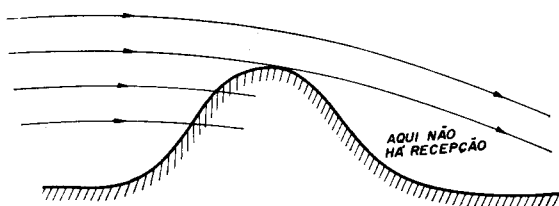


FIG. 4

Difração das ondas.

o comprimento de onda, maior é sua capacidade de atingir o outro lado dos obstáculos. Evidentemente, uma onda não pode se encurvar bruscamente, e é por isto que existem "zonas de silêncio" atrás de montanhas e estruturas metálicas. Nestas zonas não se consegue receber certas estações, mas, mais adiante, a recepção é restaurada devido à difração.

Conhecendo agora os diversos fenômenos a que e tão sujeitas as ondas de rádio, podemos analisar como estas se propagam na atmosfera terrestre.

3. PROPAGAÇÃO DAS ONDAS

As ondas irradiadas horizontalmente e que se propagam ao longo da superfície terrestre na camada inferior da atmosfera são chamadas ondas terrestres ("ground waves"). No seu percurso ao longo da terra estas ondas, são absorvidas por ela e por vários objetos locais. Quanto maior a frequência das ondas, maior é esta absorção. Dependendo de sua frequência, estas ondas acompanham a curvatura terrestre com maior ou menor facilidade, devido à difração.

As ondas irradiadas num ângulo com a superfície terrestre são chamadas ondas celestes ("sky-wave"). Estas ondas atravessam as partes levemente ionizadas da atmosfera e atingem a ionosfera, onde elas sofrem difração. Como tanto a ionização quanto a constante dielétrica (ϵ) mudam gradualmente nas camadas ionosféricas, o caminho percorrido pela onda é uma curva suave. Quanto maior a onda e mais intensa a ionização, mais pronunciada é a curvatura da onda. A fig. 5 mostra as camadas E e F₂ à noite. O caminho 1, que

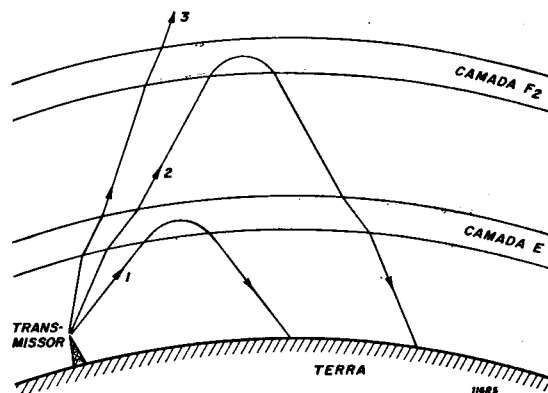


FIG. 5

As trajetórias das ondas de rádio na atmosfera.

corresponde a uma onda curta de uma frequência relativamente baixa, é fortemente refratado na camada E e retorna para a terra. Diz-se que a onda é refletida pela camada E. Os caminhos 2 e 3 que correspondem a ondas mais curtas, atravessam a camada E pois seu grau de ionização é insuficiente para fazer as ondas voltarem. A ionização da

camada F_2 é insuficiente para fazer a onda 3 voltar para a terra. Existem duas razões que podem provocar isto: ou a onda 3 é de uma frequência alta demais ou então ela penetra na camada E quase perpendicularmente e não é desviada suficientemente para atingir a terra. Esta onda atingirá depois o espaço interplanetário.

A onda 2 atinge a terra num ponto mais distante do transmissor do que a onda 1.

As ondas não são só refratadas nas camadas ionizadas mas aí são absorvidas também. Esta absorção é tanto maior quanto maior for o comprimento de onda. Como a altitude e a intensidade de ionização das camadas mudam, os caminhos das ondas celestes mudam correspondentemente. Isto explica a considerável variação da intensidade do sinal em ondas curtas ao longo do dia e do ano. Explica também o fenômeno conhecido como "fading". Na maioria dos casos, o "fading" é causado pela chegada de diversas ondas do mesmo transmissor a um receptor, cada onda tendo percorrido um caminho diferente. Na figura 6, no ponto A chegam uma onda terrestre e uma onda celeste,

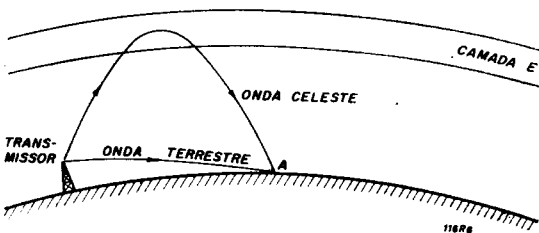


FIG. 6

Quando a onda terrestre e a onda celeste chegam mesmo ponto, pode haver o "fading".

esta última refletida pela camada E. Devido às constantes mudanças que ocorrem na ionosfera, o comprimento do caminho das ondas celestes também está constantemente mudando, o que provoca mudanças de fase entre os dois sinais que chegam em A. Como resultado da adição da onda terrestre com a onda celeste, o nível do sinal na saída do receptor está constantemente mudando: quando as fases das duas ondas coincidem, o sinal se torna mais intenso; quando as fases estão opostas, o nível do sinal cai (até zero, às vezes).

É bastante difícil tomar medidas contra o "fading". Até hoje, uma das medidas mais eficientes é a recepção diversificada. Para isto, usa-se duas ou três antenas, situadas a 200 ou 300 metros uma da outra. O receptor dispõe de um amplificador de r.f. e um detetor para cada antena, mas usa um único amplificador de áudio.

Esta recepção se baseia na premissa de que o "fading" não ocorre igualmente em pontos distintos. Enquanto há diminuição numa das antenas, sua intensidade está aumentando numa outra. Os sinais se compensam e o sinal combinado de baixa frequência, na saída do receptor, muda muito pouco.

O circuito de controle automático de ganho, usado na maioria dos rádios, também ajuda a eliminar os efeitos do "fading".

Depois deste apanhado geral sobre a propagação, vamos ver o que se passa com cada uma das diversas faixas de ondas em que se costuma dividir as ondas de rádio.

3.1 — Ondas longas

As ondas longas, cujos comprimentos de onda estão entre 3 e 30 km, não são usadas em rádio-difusão no Brasil. As ondas terrestres acompanham a curvatura da superfície terrestre, o que é possibilitado por sua grande capacidade de difração. A terra e os obstáculos absorvem, entretanto, muita energia destas ondas. As ondas celestes deste comprimento de onda são refletidas pela ionosfera (durante o dia pela camada D, à noite pela camada E), retornam à terra, são refletidas por esta, voltam à ionosfera, voltam novamente para a terra, etc. Nestas repetidas reflexões há forte absorção e é por isto que os transmissores em onda longa necessitam de altas potências para a comunicação longa distância. A comunicação em onda longa não apresenta "fading". Durante o inverno e à noite a recepção é um pouco melhor do que no verão e de dia, o que é lógico pois o ar é menos ionizado então, e a absorção, portanto, é menor. Várias outras mudanças na ionosfera e troposfera praticamente não afetam a propagação de ondas longas. Em comparação com as outras faixas de ondas, as ondas longas oferecem as mais constantes condições de propagação.

3.2 — Ondas médias

Estas ondas são universalmente usadas para rádio-difusão. Seu comprimento de onda vai de 200 a 600 metros ou seja, de 1500 a 500 kHz. As ondas celestes desta faixa são fortemente absorvidas pela ionosfera durante o dia e não apresentam importância prática do ponto de vista de rádio comunicação. As ondas terrestres da mesma faixa são também fortemente absorvidas pela terra. Quanto mais curta a onda e quanto pior a condutividade da camada da superfície, maior a absorção. A comunicação sobre o mar apresenta a menor absorção e sobre terra seca tem-se a maior absorção. Portanto, as ondas médias se propagam de dia a menores distâncias do que à noite, porque à noite a absorção na ionosfera é muito menor. É devido a esta melhor propagação, que à noite, as emissoras diminuem sua potência de transmissão, a fim de evitar interferência com outra rádio operando perto, ou na mesma frequência. O raio da comunicação em ondas médias no inverno também é maior, por causa da reduzida absorção ionosférica.

De noite, a recepção de ondas médias apresenta considerável "fading". Isto é causado pela interação entre ondas terrestres e celestes, as quais percorrem caminhos diferentes e atingem defasadamente as antenas receptoras. Outras mudanças ionosféricas não influenciam muito a propagação das ondas médias. A forte interferência atmosférica,

criada por descargas elétricas que ocorrem na atmosfera e que é particularmente intensa no verão, perturba a recepção das ondas médias.

3.3 — Ondas intermediárias e ondas curtas

As ondas desta faixa, cujos comprimentos vão de 10 a 200 metros, isto é, de 30 a 1,5 MHz, são fortemente absorvidos pela terra. Por isto, as ondas terrestres têm um raio de ação bem pequeno, o qual não ultrapassa algumas dezenas de quilômetros. Quanto menor a energia e quanto menor o comprimento de onda, menor é esta distância. Além desta distância temos a zona de silêncio, mostrada na figura 7.

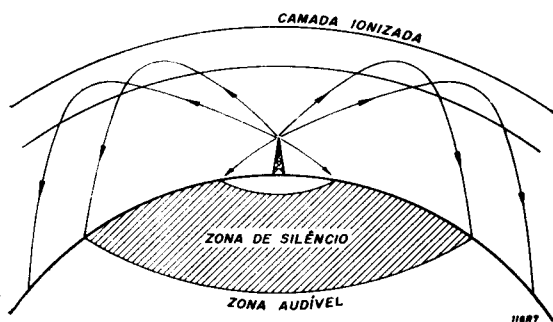


FIG. 7

Zona de silêncio na recepção de ondas curtas.

Dependendo do comprimento de onda e da hora do dia e da época do ano, esta zona de silêncio pode se estender de algumas centenas até vários milhares de quilômetros.

Após a zona de silêncio começa a zona audível. Os sinais chegam aí pelo espaço após uma ou mais reflexões pela ionosfera. A recepção é muito boa, apesar de apresentar quase sempre "fading", o qual pode ser bastante intenso e freqüente.

A zona de silêncio praticamente inexistente nas ondas de 80 a 200 metros mas já aparece, à noite, em ondas de 50 a 80 metros. As ondas de 35 a 70 metros são principalmente usadas para comunicações noturnas a longa distância. Durante o dia são usadas para pequenas distâncias (comunicação por onda terrestre).

As ondas de 10 a 25 metros são pouco absorvidas pela camada E e por isto são usadas nas comunicações diurnas. Nestas ondas, a zona de silêncio é muito maior, particularmente à noite. As ondas de 10 a 25 metros não são muito boas para comunicação noturna, pois a ionização, à noite, da camada F₂ é insuficiente para fazê-las voltar à terra. Para operação a longa distância usam-se ondas de 25 a 35 metros, que são usadas de dia e de noite. As emissoras de radiodifusão usam, de dia, principalmente ondas de 10 a 35 metros e mudam, à noite, para ondas de 25 a 70 metros.

A grande vantagem das ondas curtas é a possibilidade de comunicação sobre milhares de quilômetros com transmissores cujas potências não ultrapassam, às vezes alguns watts.

As várias agitações, como as tempestades magnéticas, que ocorrem na ionosfera, influenciam fortemente a propagação de ondas curtas e às vezes impossibilitam completamente a rádio comunicação nestas ondas.

As ondas curtas são mais imunes aos vários tipos de interferência do que as outras ondas. Quanto mais curta a onda, melhor é a isenção de interferência.

3.4 — Ondas métricas, decimétricas e centimétricas

As ondas de comprimento menor do que 10 metros não são praticamente refletidas pela ionosfera e, atravessando-a, penetram no espaço interplanetário. Estas ondas podem ser refletidas então pela Lua ou por Venus e serem novamente captadas na terra. Para radiocomunicação só a onda terrestre é usada nestas freqüências muito altas. Estas ondas são fortemente absorvidas por diversos objetos e, além disso, praticamente não sofrem difração. É por isso que não podem existir obstáculos na linha ótica entre as antenas transmissoras e receptoras que operam com estas ondas. Se a distância é tal que a curvatura do globo deve ser levada em conta (várias dezenas de quilômetros) as antenas devem estar situadas a uma boa altura.

A principal vantagem destas ondas é o baixo nível de "fading" e o fato de sua propagação não depender da hora do dia nem da época do ano, o que se compreende facilmente, pois a propagação destas ondas não é influenciada pela ionosfera. Estas ondas ainda apresentam outras vantagens tais como: facilidade para transmissão direcional e quase completa ausência de interferência. Conhecem-se casos de recepções em ondas ultracurtas a distâncias de diversas centenas e até milhares de quilômetros da estação transmissora. Esta recepção é geralmente irregular e é acompanhada de "fading".

Há diversas razões para estes contatos anormais nas ondas ultra-curtas. Inicialmente, nos anos em que atividade solar está em seu máximo, a ionosfera reflete, às vezes, ondas de 6 a 7 metros, durante o dia. Além disto a criação de nuvens de elétrons (camadas fortemente ionizadas da ionosfera em caráter esporádico e de curta duração) resulta na reflexão de ondas de até 3 metros. Em particular, os meteoritos que entram na atmosfera terrestre criam áreas ionizadas em seu percurso. Uma outra razão são as mudanças de temperatura e umidade da troposfera, que em alguns casos intensificam a refração atmosférica das ondas ultra-curtas. Isto possibilita a propagação destas ondas através de múltiplas reflexões entre uma camada da troposfera e a terra. Finalmente, as ondas ultra-curtas podem, às vezes, ser refletidas por causa de certas irregularidades troposféricas existentes em diversas altitudes.