

SIMULANDO A PROPAGAÇÃO DE SINAIS GPS EM DUTOS TROPOSFÉRICOS ATRAVÉS DO MÉTODO DE TRAÇADO DE RAIOS

Gláucia Costa Balvedi (PG) e Fernando Walter
ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Divisão de Engenharia Eletrônica – Depto. de Telecomunicações
São José dos Campos, SP, Brasil
balvedi@ita.br fw2@ita.br
Parte deste trabalho foi submetido ao SBrT 2005.

Resumo - O método de traçado de raios é utilizado para uma análise qualitativa da propagação de sinais GPS provenientes de satélites com baixo ângulo de elevação com o objetivo de estudar os efeitos dos dutos troposféricos na banda L e na recepção dos mesmos. As simulações foram realizadas em Matlab® e os resultados da propagação na presença de dutos, tanto de superfície como elevados, foram comparados aos da propagação na ausência dos mesmos.

Abstract - The ray tracing method was applied on low elevation angle GPS satellite signals in order to verify the effects of tropospheric ducts. Simulations were run in Matlab® and the results of propagation in elevated and surface ducts were compared with those in the absence of ducts.

1. INTRODUÇÃO

O GPS (*Global Positioning System*) é o sistema de navegação mais utilizado atualmente. Grandes esforços têm sido feitos no intuito de modelar os atrasos devido ao multicaminho e à passagem do sinal pela atmosfera (ionosfera/troposfera) [1,2]. O receptor pode se encontrar em uma região de dutos troposféricos e sofrer a influência de ondas guiadas por estes dutos. Apesar do receptor GPS não utilizar satélites com ângulo de elevação inferior a 10° no cálculo da posição, os sinais destes satélites estarão presentes na forma de ruído.

O método de traçado de raios foi utilizado para se ter uma noção qualitativa da propagação de um sinal GPS em dutos troposféricos. Os resultados da simulação são apresentados no Item 5.

2. A TROPOSFERA

A troposfera é a região da atmosfera que se estende da superfície da Terra até uma altitude de 8 a 10 km na região polar, de 10 a 12 km nas latitudes médias e de 16 a 18 km no equador. Caracteriza-se pelo decréscimo da temperatura com a altura. Contém cerca de 75% da massa de ar e 80% da massa de vapor d'água de toda a atmosfera. Sua percentagem dos gases constituintes praticamente não varia com a altitude, mas o mesmo não acontece com a percentagem de vapor d'água.

Logo acima da troposfera existe uma camada de pequena extensão denominada tropopausa, na qual a temperatura é constante.

2.1 Índice de refração da troposfera

O termo refração refere-se à propriedade que um meio tem de curvar a trajetória de uma onda eletromagnética que passa por ele. Uma medida da quantidade de refração é o índice de refração de fase, $n = c/v$, onde c é a velocidade de propagação no espaço livre e v a velocidade da onda no meio em questão. Para meios não magnéticos como a troposfera, o índice de refração é dado por $n = (\epsilon_r)^{1/2}$ onde ϵ_r é a permissividade relativa do meio [3].

O índice de refração n da troposfera varia de acordo com a eq. (1) [5]:

$$n = 1 + 10^{-6} \left(K_1 \frac{p' - e}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right) \quad (1)$$

onde p' (N/m²) é a pressão atmosférica total, e (N/m²) é a pressão parcial devido ao vapor d'água e T (K) é a temperatura absoluta naquele ponto. T e e normalmente diminuem com a altura, apesar de

existirem situações em que ambos aumentam com a altura, porém p' necessariamente diminui com a altura, pois representa a pressão total da atmosfera acima de um dado ponto. Expressões para T e p' em função da altura e para e em função da umidade específica (α) em uma *atmosfera bem misturada* são encontradas em [5], bem como valores para K_1 , K_2 e K_3 (K/N/m²), provenientes de dados experimentais.

Devido à presença do fator 10^{-6} na eq. (1), o valor numérico de n varia muito pouco em relação a 1 (um) para variações razoáveis nos valores de p' , T e e , tornando conveniente a definição do parâmetro N , denominado *refratividade*, definido pela eq. (2):

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (2)$$

Nota-se que a refratividade é bastante sensível às variações da umidade específica, sendo este fato o grande responsável pelo fenômeno de propagação anômala, tal como em dutos troposféricos [5]. Para frequências abaixo de 25 GHz, a refratividade pode ser considerada independente da frequência [6].

Existem dois tipos de processos utilizados na determinação do índice de refração da troposfera: o *indireto* e o *direto*. No método indireto, o cálculo de n dá-se pela aplicação direta da eq. (1) desde que se conheçam os parâmetros meteorológicos necessários. No método direto, usa-se uma cavidade ressonante na qual a frequência de ressonância é inversamente proporcional ao índice de refração do meio que a preenche, dispositivo denominado *refratômetro* [4].

2.2 Atmosfera Padrão

Denomina-se *atmosfera padrão* um modelo matemático empírico que representa as condições médias da atmosfera real. A atmosfera padrão mais largamente usada é a denominada *4/3* e apresenta um decréscimo linear da refratividade em função da altura dada pela eq. (3) [5]:

$$dN/dh = -0,040 \text{ m}^{-1} \quad (3)$$

Este modelo, sendo padrão, não se aplica nos casos de propagação anômala. A propagação anômala faz com que os raios possam ser refletidos no solo e refratados várias vezes, ficando confinados em uma fina camada da atmosfera e sendo guiados a longas distâncias ao longo da superfície da Terra. Esta camada na qual a onda eletromagnética é guiada é conhecida como *duto*. O guiamento ocorre principalmente para frequências acima da faixa de UHF e com baixo ângulo de elevação [7,8]. Maiores detalhes sobre dutos serão dados no Item 3.

2.3 Índice de refratividade modificada

O *índice de refração modificado* é definido pela eq. (4):

$$m(h) = n(h) + (h/a) \quad (4)$$

onde a é o raio da Terra e h a altura acima da superfície terrestre. A *refratividade modificada*, M , é dada pela eq. (5):

$$M = 10^6 \cdot (m - 1) \quad (5)$$

Ao se usar m ao invés de n , o perfil da Terra passa a ser considerado, ao invés de curvo, plano, tal como ilustrado na Fig. 1 [9]:

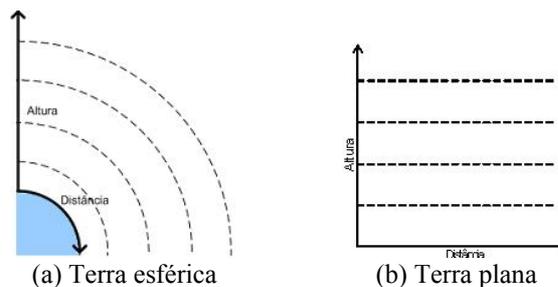


Fig. 1. Transformação de Terra esférica (a) para Terra plana (b).

O gráfico de M versus h , ou o perfil de M , fornece informações úteis a respeito da localização de um duto. Para uma atmosfera padrão, $dM/dh=0,118 m^{-1}$.

3. DUTOS TROPOSFÉRICOS

Dutos podem ser formados próximos à superfície da Terra (*duetos de superfície*) ou a vários metros acima desta (*duetos elevados*). Dutos de superfície (Fig. 2a) são gerados quando uma massa de ar quente se aproxima de um solo úmido ou sobre mares tropicais (chamados *duetos de evaporação*). Dutos elevados (Fig. 2b) surgem quando uma massa de ar frio atinge uma área de grande pressão, fenômeno que ocorre principalmente acima das nuvens e interessa às comunicações em UHF [7]. Pode-se localizar um duto quando dM/dh atinge um mínimo no perfil de M .

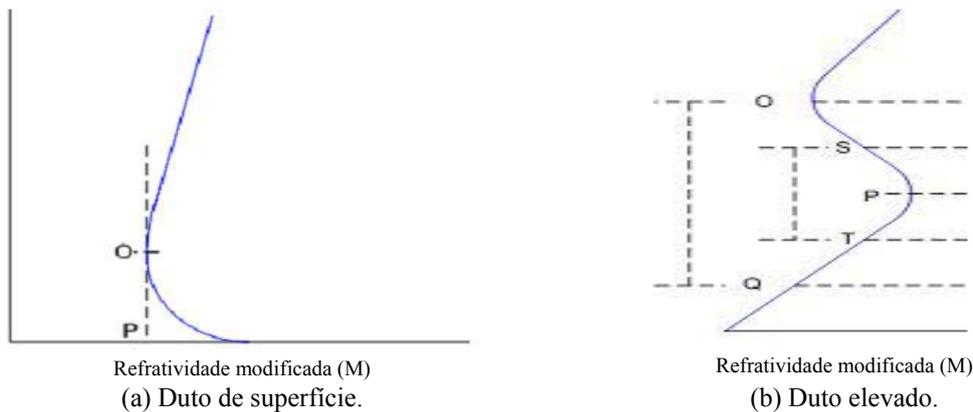


Fig. 2. Perfis dos dutos de superfície e dutos elevados. Em (a), o duto está localizado nas alturas entre os pontos O e P. Em (b), o duto está localizado nas alturas entre os pontos O e Q.

4. TRAÇADO DE RAIOS

Quando o índice de refração do meio muda pouco no intervalo de um comprimento de onda o campo eletromagnético é dito localmente plano e a energia se propaga ao longo de raios ortogonais às frentes de onda. A curvatura destes raios é função do gradiente de refratividade do meio. As equações diferenciais que descrevem a trajetória dos raios podem ser derivadas de repetidas aplicações da *lei de Snell* [8].

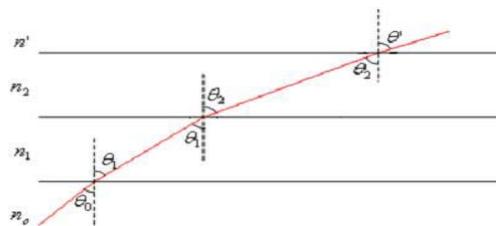


Fig. 3. Traçado de raios em um meio horizontalmente estratificado com quatro camadas considerando Terra plana, onde $n_0 < n_1 < n_2 < n'$.

A Fig. 3 ilustra o traçado de raios em um meio paralelamente estratificado, e a aplicação da Lei de Snell para este caso é dada pela eq. (6):

$$n_0 \text{ sen } \theta_0 = \dots = n' \text{ sen } \theta' \quad (6)$$

5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

O método de traçado de raios foi utilizado para simular o comportamento de sinais GPS provenientes de satélites com baixos ângulos de elevação em dutos troposféricos. Os dutos foram

escolhidos de forma que a frequência de corte dos mesmos seja maior que a frequência L1 do GPS (1,575 GHz). A frequência de corte é função da altura do duto e da variação do índice dentro deste [6,8].

O modelo de propagação utilizado foi o proposto em [10], onde o campo incidente na interface inicial do duto é considerado uma onda plana, tal como mostra a Fig. 4. A propagação é considerada como sendo sobre um terreno plano, onde o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência (reflexão especular). Não se considera neste trabalho a existência de uma onda refletida na interface inicial do duto.

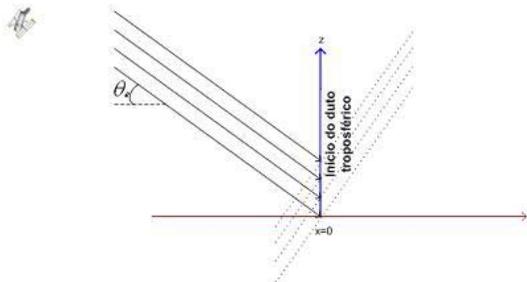


Fig. 4. Modelo de propagação – a onda incidente é considerada uma onda plana. Não se considera nesta análise a existência de uma onda refletida na interface inicial do duto. θ_e é o ângulo de elevação do satélite.

Um programa em Matlab[®] foi feito baseado na aplicação direta da Lei de Snell. O parâmetro de entrada é o ângulo de elevação do satélite, que por fim é o ângulo de entrada do sinal no duto troposférico, igual a $0,2^\circ$.

Dois tipos de dutos foram utilizados neste trabalho. O primeiro é um *duto de superfície* e está ilustrado na Fig. 5a. Este duto possui uma altura de 200 m e uma variação no índice igual a $-0,15 \text{ m}^{-1}$. A variação do índice acima do duto é igual ao da troposfera padrão ($0,118 \text{ m}^{-1}$). A Fig. 5b apresenta o resultado da simulação para o duto de superfície:

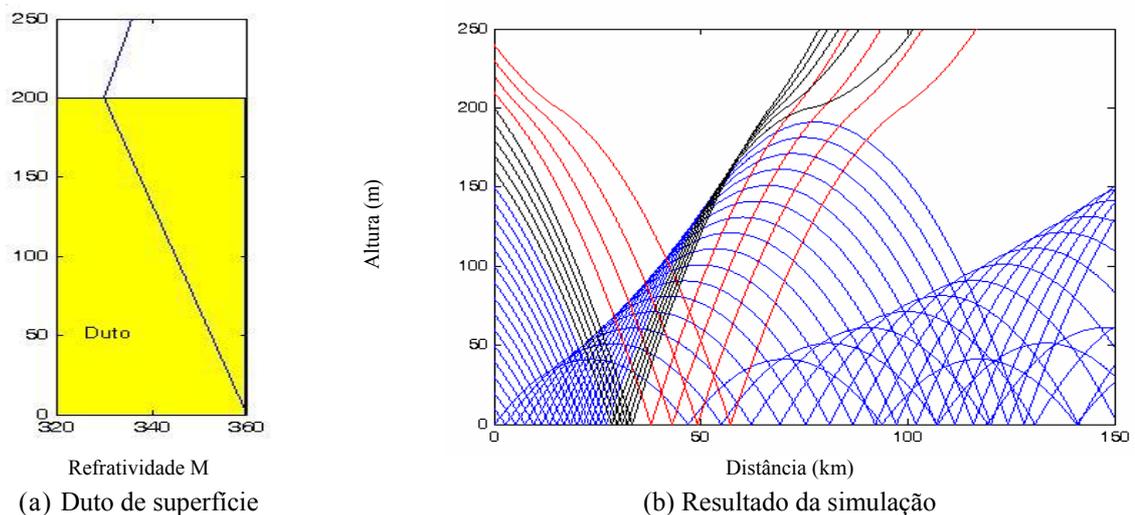


Fig. 5. Em (a), duto de superfície de 200 m de altura com variação no índice igual a $-0,15 \text{ m}^{-1}$. Em (b), resultado da simulação para o duto de superfície: em **azul**, os raios que ficam confinados no duto; em **preto**, os raios que saíram do duto apesar de atingirem a troposfera em altura inferior a 200 m; em **vermelho**, os raios que atingiram a troposfera em altura superior a 200 m, refletiram no solo e saíram do duto.

Nesta simulação, pode-se notar grande quantidade de raios confinados dentro do duto (região entre 0 e 200 m). Os raios incidentes em alturas maiores que 200 m refletem na superfície, mas não permanecem confinados dentro do duto. Alguns raios (em preto) incidiram em alturas menores que

200 m, porém atingiram o solo com ângulos maiores que o máximo permitido para guiagem, saindo então do duto.

O segundo duto utilizado é um *duto elevado* com altura igual a 200 m, ilustrado na Fig. 6a. A Fig. 6b apresenta o resultado da simulação para este duto:

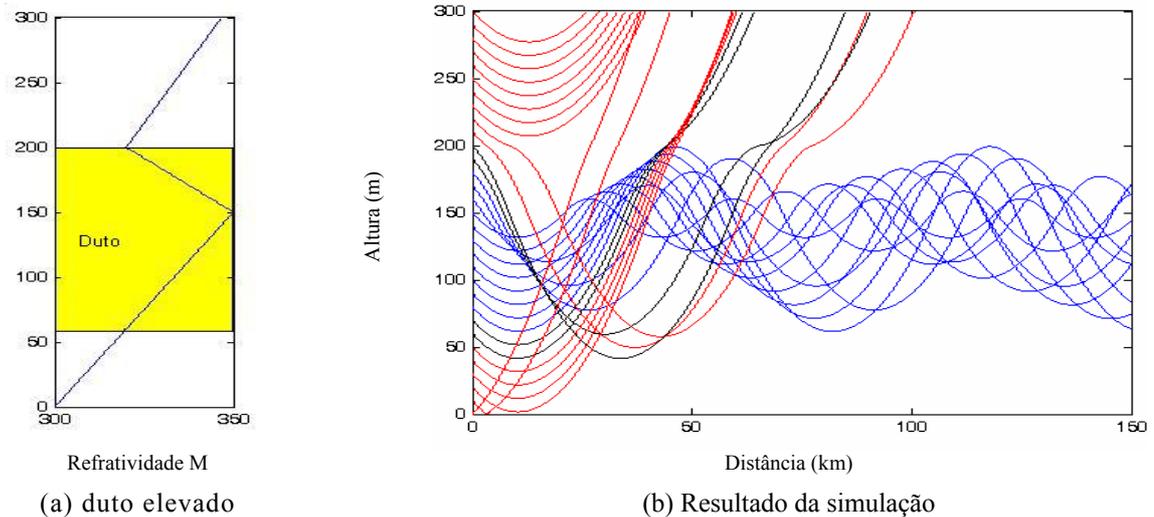


Figura 6. Em (a), duto elevado localizado entre 60 e 200 m de altura. Em (b), resultado da simulação para o duto elevado: em **azul**, os raios que ficaram confinados no duto; em **preto**, os raios que saíram do duto apesar de atingirem a troposfera em altura inferior a 200 m e superior a 60m; em **vermelho**, os raios que atingiram a troposfera em altura maior que 200 m e menor que 60m e saíram do duto.

Mais uma vez nota-se os raios que ficaram confinados dentro do duto (região entre 60 e 200 m). Os raios incidentes em alturas maiores que 200 m e menores que 60 m não permanecem confinados dentro do duto. Alguns raios (em preto) incidiram em alturas menores que 200 m e maiores que 60, porém saíram do duto.

Para fins de comparação simulou-se a incidência da onda eletromagnética com o mesmo ângulo de elevação em uma atmosfera padrão. O perfil de M para atmosfera padrão está ilustrado na Fig. 7a. Nesta simulação, ilustrada na Fig. 7b nota-se que a distância máxima que estes raios atingem é de aproximadamente 40 km, inferior às distâncias máximas encontradas nas duas outras simulações. A propagação dentro de dutos permite que os raios atinjam distâncias indefinidas, seguindo a curvatura da Terra.

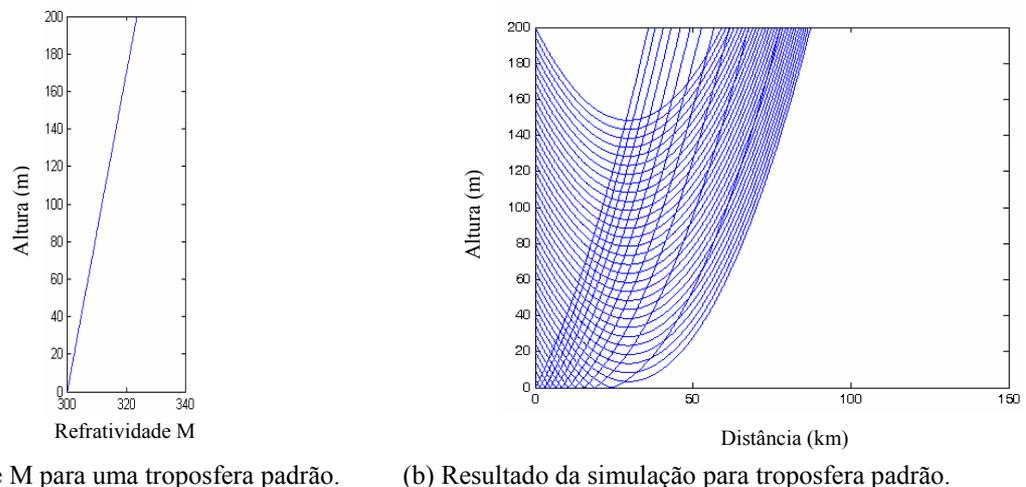


Fig. 7. Em (a), perfil de M para uma atmosfera padrão: em todas as alturas, $dM/dh = 0,118/m$. Em (b), resultado da simulação para atmosfera padrão.

6. CONCLUSÕES

O método de traçado de raios (óptica geométrica) é um modelo conceitual de propagação que possui limitações, tais como não fornecer uma estimativa da potência do sinal (a não ser no caso do meio ser lentamente variável) e ser independente da frequência, porém é uma ferramenta *qualitativa* poderosa, pois fornece informações importantes sobre o comportamento da frente de onda e sobre os ângulos nos quais os efeitos de guiamento acontecem [9].

O método foi utilizado com o objetivo de estudar os efeitos de dutos troposféricos na propagação dos sinais GPS. Dois modelos de dutos foram escolhidos de forma que a frequência de corte possibilitasse o guiamento de sinais. As simulações mostraram que os raios ficaram confinados dentro do duto e atingiram distâncias consideráveis comparando-se com a propagação em uma atmosfera padrão.

Para se obter resultados quantitativos a respeito da frente de onda é necessário resolver as equações de Maxwell para o campo eletromagnético (solução de onda completa, ou *full wave* [11]). Métodos como *equações parabólicas* [12,13,14] ou *teoria modal* [15] podem ser utilizados para se modelar os efeitos de multicaminho e dutos em propagação troposférica, o que corresponde ao próximo passo deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer o apoio financeiro do CNPq e da FINEP.

REFERÊNCIAS

- [1] Oliveira, A.B.V.; Walter, F.; *Effects of Equatorial Anomaly in the GPS Signals*. ION GPS/GNSS, 9-12 de setembro de 2003, Portland, OR, EUA.
- [2] Oliveira, A.B.V.; Morais, T.N.; Walter, F.; *Global Behavior of the Equatorial Anomaly since 1999 and effects on GPS Signals*. IEEE A&E Systems Magazine, p.15, março de 2005.
- [3] Balanis, C.; *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley & Sons, Inc, 1989.
- [4] Walter, F.; Dhein, N.R.; *Instrumento de Medida do Índice de Refração do Ar*, PI-7904571, 21/01/80.
- [5] Livingston, D.; *The Physics of Microwave Propagation*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, EUA, 1970.
- [6] Kerr, D.; *Propagation of Short Radio Waves*. Peninsula Publishing, 1988.
- [7] Picquenard, A.; *Radio Wave Propagation*. Philips Technical Library, 1973.
- [8] Hall, M.P.; Barclay, L.W.; Hewitt, M.T.; *Propagation of Radiowaves*. The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1996.
- [9] Levy, M.; *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*. The Institution of Electrical Engineering, London, UK, 2000.
- [10] Walker, R.; Kubic, K.; *Numerical Modelling of GPS Signal Propagation*. ION GPS, 17-20 de setembro de 1996, Kansas City, Missouri, EUA.
- [11] Carrijo, G.A.; *Estudo do Acoplamento das Ondas Ordinária e Extraordinária na Propagação Ionosférica – Traço Z*. Tese de Mestrado, ITA, 1976.
- [12] Craig, K.H.; Levy, M.; *Parabolic Equation Modelling of the Effects of Multipath and ducting on Radar Systems*. IEE Proceedings-F, Vol 138, No. 2, abril de 1991.
- [13] Dockery, G.D.; *Modeling Electromagnetic Wave Propagation in the Troposphere Using the Parabolic Equation*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 36, No. 10, outubro de 1988.
- [14] Hannah, B.; *Modelling and Simulation of GPS Multipath Propagation*. Dissertação de Doutorado, Queensland University of Technology, março de 2001.
- [15] Farrag, A.K.; Mahmoud, S.F.; *Application of Hybrid Ray/Mode Theory to Microwave Links in the Presence of Atmospheric Duct*. Antennas and Propagation, Seventh International Conference on IEE, 15-18 de abril de 1991.