

Análise da propagação de sinais GPS em dutos troposféricos pelo método de traçado de raios

Gláucia Costa Balvedi e Fernando Walter

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.

Palavras-chave — Sistema de Posicionamento Global, propagação de ondas, traçado de raios, dutos troposféricos.

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.

Keywords—Global Positioning System, electromagnetic propagation, ray tracing, tropospheric ducts.

I. 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].

Uma das situações mais críticas de multicaminho ocorre quando o satélite GPS possui um ângulo de elevação θ_e menor que o ângulo de Brewster. Neste caso uma onda eletromagnética refletida (elipticamente polarizada) pode alcançar o receptor com o mesmo sentido de polarização da onda direta (os sinais transmitidos pelos satélites da constelação GPS têm polarização à direita). As Figs. 1 e 2 ilustram os coeficientes de reflexão para polarização vertical e horizontal em função do ângulo de elevação θ_e para dois tipos de meio de incidência. O ângulo de Brewster (polarização vertical) é o ângulo em que o coeficiente de reflexão muda de sinal, portanto encontrado no gráfico pela posição na qual o coeficiente de reflexão passa por zero. Quando os coeficientes de reflexão apresentam sinais diferentes o sentido de polarização mantém-se o mesmo, de forma geral elipticamente polarizado. Portanto, uma onda direta incidindo circularmente polarizada à direita a refletida será uma onda elipticamente polarizada à direita. Para os casos ilustrados na Fig. 1 o sentido de polarização se man-

tém para ângulos menores que, aproximadamente, 7° (que é o ângulo de Brewster no caso do mar, $\epsilon_r = 81$) e aproximadamente 27° (para um solo pobre, $\epsilon_r = 4$).

A Fig. 3 ilustra a variação do campo elétrico recebido em função da altura da antena receptora. O ângulo de elevação do satélite é de 5° . A amplitude do campo direto é comparada às amplitudes dos campos refletidos com polarização horizontal e vertical. Nota-se que os campos refletidos estão na mesma ordem de grandeza do campo direto.

Também pode ocorrer de o receptor 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.

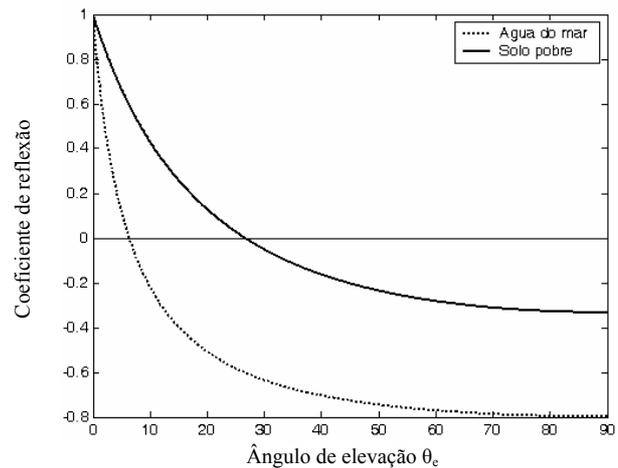


Fig. 1. Coeficiente de reflexão para dois meios de incidência em função do ângulo de elevação – polarização vertical. O ângulo de Brewster é aquele no qual o coeficiente de reflexão passa por zero.

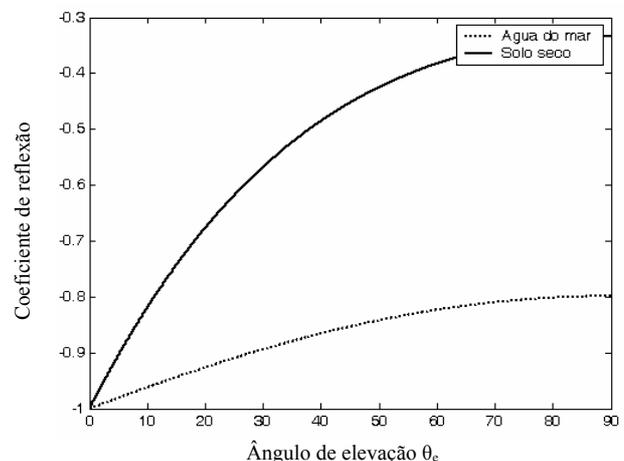


Fig. 2. Coeficiente de reflexão para dois meios de incidência em função do ângulo de elevação – polarização horizontal.

O método de traçado de raios foi utilizado para se ter uma noção qualitativa da propagação de um sinal GPS em dutos troposféricos, sendo os resultados dessa simulação apresentados na seção V.

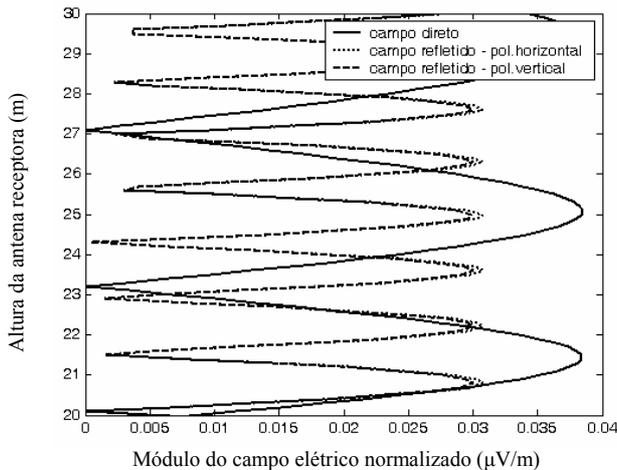


Fig. 3. Variação do campo elétrico recebido em função da altura da antena receptora. O ângulo de elevação do satélite é de 5° . A amplitude do campo direto (linha sólida) é comparada às amplitudes dos campos refletidos com polarização horizontal (linha pontilhada) e vertical (linha tracejada).

II. A TROPOSFERA

A troposfera é definida como 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 (Fig. 4). Ela é caracterizada pelo decréscimo da temperatura com a altura. A troposfera contém cerca de 75% da massa de ar e 80% da massa de vapor d'água de toda a atmosfera.

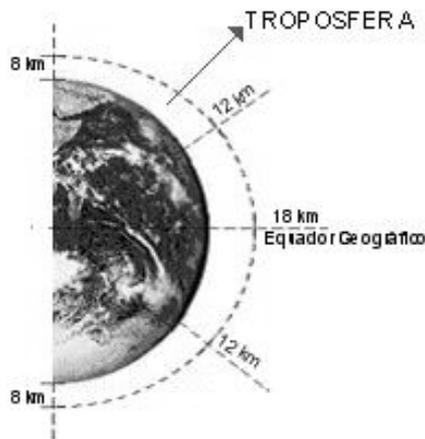


Fig. 4. Perfil da troposfera (altura variável com latitude).

A percentagem dos gases constituintes, na troposfera, 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.

A. 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/m^2) é a pressão atmosférica total, e (N/m^2) 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 ($K/N/m^2$), 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):

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

A Fig. 5 ilustra famílias de curvas que fornecem a variação de N com a altura, parametrizadas em α :

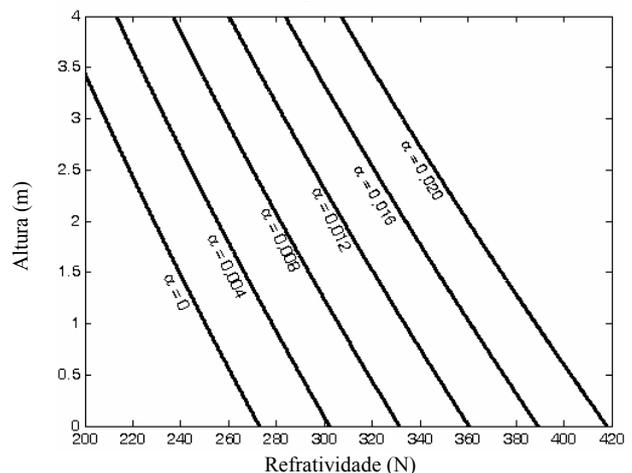


Fig. 5. Refratividade (N) em função da altura. As curvas são paramétricas em α (umidade específica).

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].

B. 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]:

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

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 II.

C. Índice de refratividade modificada

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

$$m(h) = n(h) + (h/a) \tag{4}$$

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

$$M = 10^6 \cdot (m - 1) \tag{5}$$

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. 6 [9]:

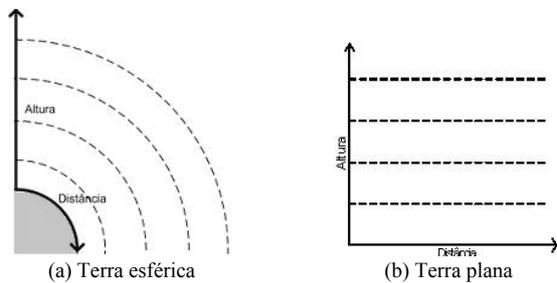


Fig. 6. Transformação de Terra esférica (a) para Terra plana (b).

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, $dM/dh=0,118 \text{ m}^{-1}$.

III. DUTOS TROPOSFÉRICOS

Dutos podem ser formados próximos à superfície da Terra (*dutos de superfície*) ou a vários metros acima desta (*dutos*

elevados). Dutos de superfície (Fig. 7) são gerados quando uma massa de ar quente se aproxima de um solo úmido ou sobre mares tropicais (chamados *dutos de evaporação*). Dutos elevados (Fig. 8) 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 .

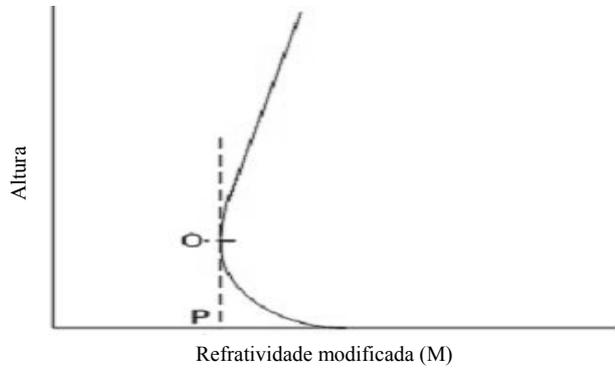


Fig. 7. Duto de superfície. O duto está localizado nas alturas entre os pontos O e P.

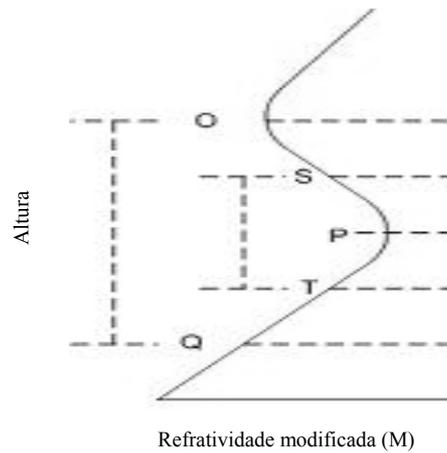


Fig. 8. Duto elevado. O duto está localizado nas alturas entre os pontos O e Q.

IV. 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].

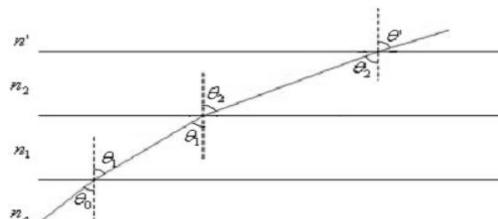


Fig. 9. Traçado de raios em um meio horizontalmente estratificado com quatro camadas considerando Terra plana, onde $n_0 < n_1 < n_2 < n'$.

A Fig. 9 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):

$$n_o \text{sen} \theta_o = \dots = n' \text{sen} \theta' \quad (6)$$

V. 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]. A Fig. 10 ilustra os dutos utilizados na simulação.

O *duto (a)* é um duto de superfície com altura de 200 m e com uma variação no índice igual a $-0,15 \text{ m}^{-1}$. A variação do índice acima do duto é igual ao da troposfera padrão ($0,118 \text{ m}^{-1}$). O *duto (b)* é um duto elevado com altura igual a 200 m. O duto está localizado entre 60 e 200 m de altitude.

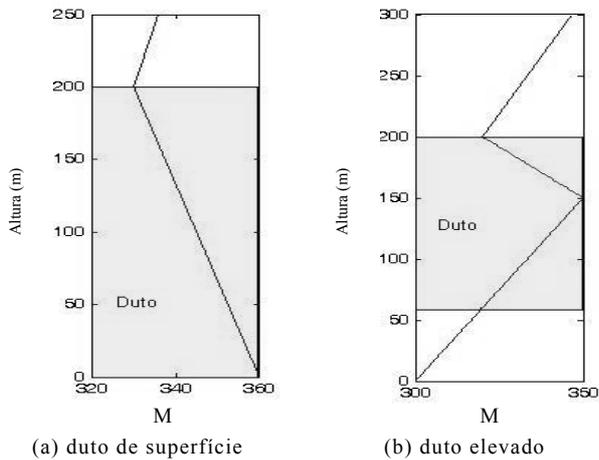


Fig. 10. Perfil dos dutos utilizados na simulação. Em (a), duto de superfície de 200 m de altura com variação no índice igual a $-0,15 \text{ m}^{-1}$ ou -150 km^{-1} . Em (b), duto elevado localizado entre 60 e 200 m de altura.

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. 11. 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.

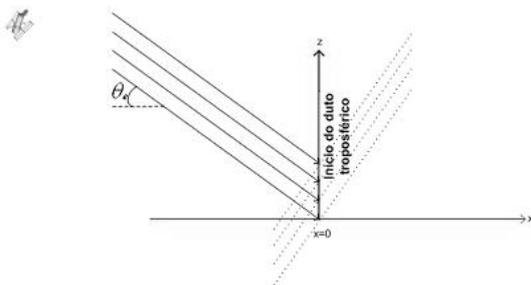


Fig. 11. Modelo de propagação – a onda incidente é considerada uma onda plana. Não se considera nesta análise a existência de uma onda refletida na interface inicial do duto.

Um programa em Matlab[®] foi feito baseado na aplicação direta da Lei de Snell. O ângulo de elevação do sinal no duto troposférico é considerado como sendo $0,2^\circ$.

O ângulo de $0,2^\circ$ é um valor baixo. Corresponde à situação na qual o satélite encontra-se próximo ao horizonte ou um pouco abaixo dele, já que a antena do satélite GPS é construída de forma a emitir radiação dentro da região de um cone com o objetivo a atingir usuários na tangente do globo terrestre (do ponto de vista do satélite), como ilustrado na Fig. 12. Como mencionado anteriormente, satélites com ângulos de elevação muito baixos não são considerados no cálculo da posição pelo receptor, porém estarão presentes na forma de ruído.

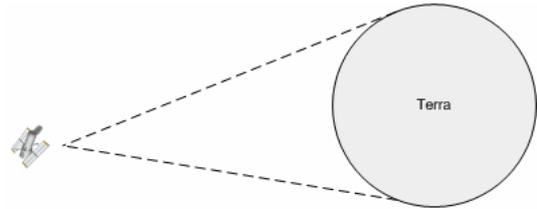


Fig. 12. A antena do satélite GPS emite radiação de forma a atingir usuários nas tangentes do globo (do ponto de vista do satélite).

O resultado da simulação utilizando o perfil do *duto (a)* é apresentado na Fig. 13. 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 incidiram em alturas menores que 200 m, porém atingiram o solo com ângulos maiores que o máximo permitido para guiagem, saindo então do duto.

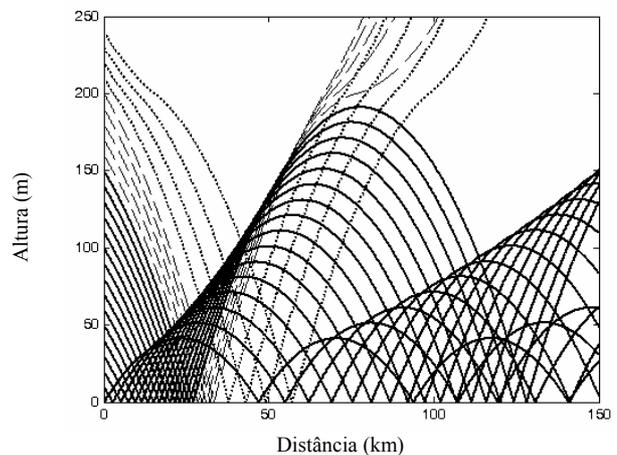


Fig. 13. Resultado da simulação para o perfil de duto 1. Em linha sólida (—), os raios que ficaram confinados no duto. Em linha tracejada (---), os raios que saíram do duto apesar de atingirem a troposfera em altura inferior a 200 m. Em linha pontilhada (...), os raios que atingiram a troposfera em altura superior a 200 m, refletiram na superfície e saíram do duto.

Para o perfil do *duto (b)* os resultados encontram-se na Fig. 14. 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 incidiram em alturas menores que 200 m e maiores que 60 m, porém saíram do duto.

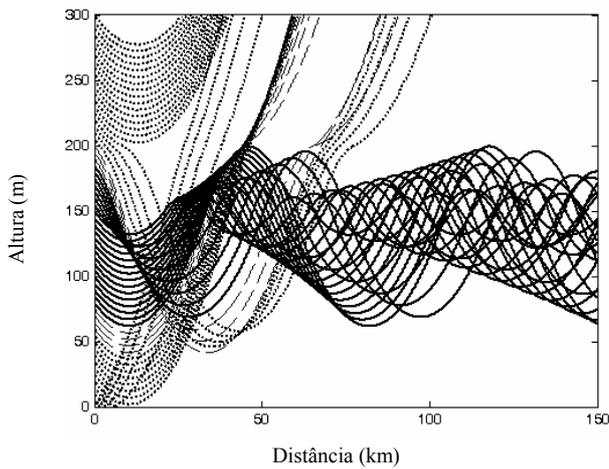


Fig. 14. Resultado da simulação para perfil de duto 2. Em linha sólida (—), os raios que ficaram confinados no duto. Em linha tracejada (---), os raios que saíram do duto apesar de atingirem a troposfera em altura inferior a 200 m e superior a 60 m. Em linha pontilhada (...), os raios que atingiram a troposfera em altura maior que 200 m e menor que 60 m e 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 ilustrada na Fig. 15. Nesta simulação, ilustrada na Fig. 16, 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.

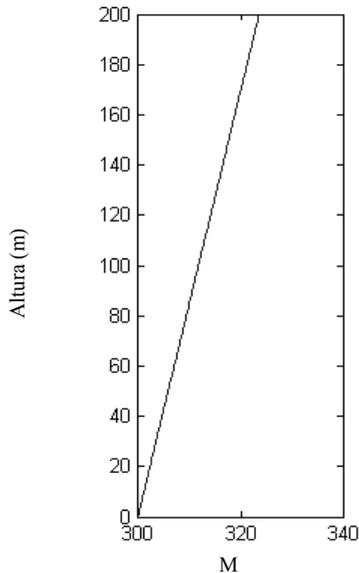


Fig. 15. Perfil de M para uma troposfera padrão. Em todas as alturas, $dM/dh = 0,118/m$.

À medida que o ângulo de elevação aumenta a energia da onda eletromagnética não é guiada pelo duto pois os mesmos são capazes de guiar energia cujo ângulo de incidência é menor que aproximadamente 1° . Este ângulo máximo de propagação depende também da variação do índice de refração do duto, podendo em certos casos ser maior que este valor.

O traçado de raios (ótica geométrica) é um modelo conceitual de propagação que possui limitações, tais como não fornecer uma estimativa da potência do campo (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 dutos não são tão severos [9].

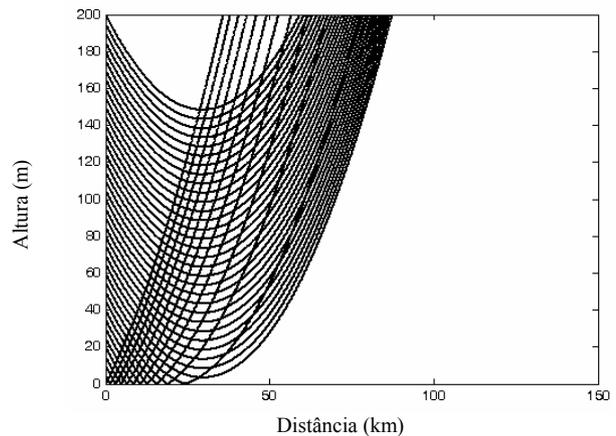


Fig. 16. Resultado da simulação para troposfera padrão.

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.

REFERÊNCIAS

- [1] A.B.V. Oliveira e F. Walter. *Effects of Equatorial Anomaly in the GPS Signals*. ION GPS/GNSS, 9-12 de setembro de 2003, Portland, OR, EUA.
- [2] A.B.V. Oliveira, T.N. Morais e F. Walter. *Global Behavior of the Equatorial Anomaly since 1999 and effects on GPS Signals*. IEEE A&E Systems Magazine, pp. 15 a 22, março de 2005.
- [3] C. Balanis. *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley & Sons, Inc, 1989.
- [4] F. Walter e N. R. Dhein. *Instrumento de Medida do Índice de Refração do Ar*, PI-7904571, 21/01/80.
- [5] D. Livingston. *The Physics of Microwave Propagation*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, EUA, 1970.
- [6] D. Kerr. *Propagation of Short Radio Waves*. Peninsula Publishing, 1988.
- [7] A. Picquenard. *Radio Wave Propagation*. Philips Technical Library, 1973.
- [8] M.P. Hall, L.W. Barclay e M.T. Hewitt. *Propagation of Radiowaves*. The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1996
- [9] M. Levy. *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*. The Institution of Electrical Engineering, London, UK, 2000.
- [10] R. Walker, K. Kubic. *Numerical Modelling of GPS Signal Propagation*. ION GPS, 17-20 de setembro de 1996, Kansas City, Missouri, EUA
- [11] G.A. Carrizo. *Estudo do Acoplamento das Ondas Ordinária e Extraordinária na Propagação Ionosférica – Traço Z*. Tese de Mestrado, ITA, 1976
- [12] K.H. Craig e M.F. Levy. *Parabolic Equation Modeling of the Effects of Multipath and Ducting on Radar Systems*. IEE Proceedings-F, Vol 138, No. 2, abril de 1991
- [13] G.D. Dockery. *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] B. Hannah. *Modelling and Simulation of GPS Multipath Propagation*. Dissertação de Doutorado, Queensland University of Technology, março de 2001
- [15] A.K. Farrag, S.F. Mahmoud. *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.