

# Influência de Dutos Atmosféricos no Planejamento de Missão ELINT

Thiago de Souza Mansur Pereira

Núcleo do Instituto de Aplicações Operacionais, Praça Marechal-do-Ar Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos – SP

**Resumo** — Auxílios à decisão são desenvolvidos para avaliar efeitos de propagação no planejamento de missões ELINT, devidos à presença de duto atmosférico. O método de traçado de raios e o método da equação parabólica são utilizados para estudo do problema.

**Palavras-Chave** — Guerra Eletrônica, ELINT, propagação troposférica.

## I. INTRODUÇÃO

Receptor ELINT é utilizado para captar sinais de interesse à Guerra Eletrônica (GE), geralmente do tipo utilizado em radares de pulso, a fim de realizar medidas que lhe caracterizem, e permitam identificar seus prováveis emissores em futuras operações, assim como classificar o grau de ameaça do equipamento perscrutado [1]. Os parâmetros medidos costumam ser a frequência  $f_p$ , amplitude de pulso (*pulse amplitude*, PA), largura de pulso (*pulse width*, PW), tempo de chegada (*time of arrival*, TOA) e ângulo de chegada (*angle of arrival*, AOA).

Dominante para a faixa de micro-ondas, o ruído térmico presente no receptor degrada a qualidade dessas medidas, de maneira que uma relação sinal-ruído mínima deva ser especificada para que o processamento do sinal captado seja efetivo [2] e a missão proveitosa.

O meio de propagação interposto ao radar e receptor ELINT causa perdas de propagação consideráveis, degradando o nível de potência de sinal disponível ao receptor ELINT, e destarte a relação sinal-ruído de processamento.

Dependendo das condições atmosféricas, entretanto, pode ocorrer marcante reforço do sinal recebido, ao invés de perda, em geometrias não previstas na condição de atmosfera padrão, geralmente postulada para fins de planejamento. Os dutos troposféricos, semelhantes a guias de onda naturais, são reconhecidos como a principal explicação desses fenômenos, observados desde o uso intenso do radar [3].

Ainda, se forem ignoradas, essas influências atmosféricas particulares podem induzir abortagem prematura da missão, pois um insucesso na captação de sinais pode ser atribuído, erroneamente, à falha de equipamento, à rota mal planejada, à inexperiência do operador ou, por fim, à hipótese de que o emissor não esteja presente nem ativo. São apresentados aspectos sobre o desempenho de receptores ELINT de acordo com o perfil de voo, na presença de dutos

troposféricos típicos, ao prover auxílios à decisão em missões ELINT pela consideração de novos fatores no problema.

## II. CARACTERÍSTICAS DA PROPAGAÇÃO TROPOSFÉRICA

A parte mais baixa da atmosfera denomina-se troposfera, que no equador vai da superfície até 18 km de altitude, na média. Além de atenuar os sinais propagantes devido à absorção dos gases que lhe compõem, sobressai sua capacidade de refratar as ondas eletromagnéticas, alterando-lhes a direção de propagação, esperada retilínea caso o meio fosse o vácuo.

Na faixa de micro-ondas, o índice de refração da troposfera é independente da frequência. Pode-se considerar o meio como não magnético, de modo que o índice de refração  $n$  satisfaça  $n^2 = \epsilon_r$ , onde  $\epsilon_r$  é a constante dielétrica relativa da mistura gasosa, como também isotrópico, linear e não dispersivo, porém não homogêneo. Além disso, a troposfera apresenta-se estratificada em camadas, cada qual sujeita a uma faixa de valores de gradiente de índice de refração [4][5].

Tal grandeza varia para mais da unidade, em geral, apenas da quarta à sexta casa decimal. Define-se convenientemente a Refratividade por

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

que pode ser relacionada a parâmetros ambientais em

$$N = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (2)$$

onde  $p$  (mbar) é a pressão total do ar,  $e$  (mbar) é a pressão de vapor d'água e  $T$  (K) a temperatura [4]. Os principais constituintes da troposfera são  $N_2$  a 78.08 %,  $O_2$  a 20.95 %, Ar a 0.93 % e, mais variável que os anteriores, porém menos que o vapor d'água, é o  $CO_2$  a 0.03% [4].

As condições de refratividade troposférica são ilustradas na Figura 1, que procura mostrar, respectivamente, os desvios de direção de propagação da onda eletromagnética, ao longo das trajetórias. Na Tabela I é apresentada esta classificação com base nos gradientes de índice de refração de possíveis camadas. Quando se inicia na condição de super-refração, a direção da onda é constantemente desviada em direção à Terra esférica, até ficar, no máximo, paralela à sua superfície. A condição normal vem de médias locais do índice de

refração com a altitude, podendo o traçado de raios se aproximar ou afastar da superfície; segundo a média global, costuma afastar-se [4]. A condição de sub-refração está abaixo da normal, afastando-se da Terra, enquanto na condição de confinamento a onda desvia-se suficientemente de volta para ela, originando reflexões na trajetória [5]. Todavia, se o ângulo de partida for suficientemente apontado para a superfície, mesmo que em condição sub-refrativa, também poderá haver reflexões.

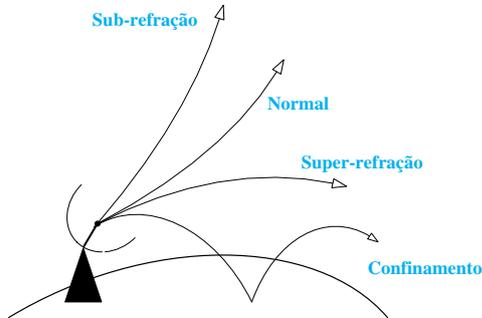


Fig. 1. Condições da Refratividade troposférica.

TABELA I. CLASSIFICAÇÃO DE CAMADAS TROPOSFÉRICAS

Classificação	$dN/dz$ (N-unidades/m)	$dM/dz$ (M-unidades/m)
Padrão	-0,039	0,118
Sub-refração	$> 0$	$> 0,157$
Normal	-0,079 a 0	0,079 a 0,157
Super-refração	-0,157 a -0,079	0 a 0,079
Confinamento	$< -0,157$	$< 0$

O traçado de raios, já ilustrado na Figura 1, é um modelo conveniente no estudo das condições troposféricas, segundo a lei de Snell esférica [5], para a qual é útil definir a Refratividade Modificada como

$$M = N + 10^6 (h/a), \quad (3)$$

onde  $h$  é a altitude em relação à superfície de uma Terra esférica, no eixo  $z$ , e  $a$  é o raio da Terra. Com esta variável, a condição de confinamento exige  $dM/dz < 0$ , segundo (3), facilitando a identificação de camadas de confinamento, necessárias para criação de dutos troposféricos, como esquematizado na Figura 2.

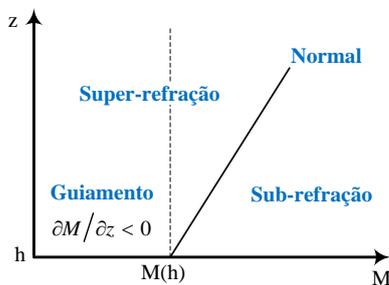


Fig. 2. Condições da Refratividade troposférica segundo perfil-M.

Figuras 3-7 trazem o traçado de raios para estes casos, para uma antena de altitude 100 m. Nas Figuras 6 e 7, ilustra-se como a presença de camadas de confinamento dá origem a

um guiamento e também a regiões de falha de cobertura, onde não há presença de raios. A Figura 6 mostra um duto elevado e a Figura 7 um duto de superfície.

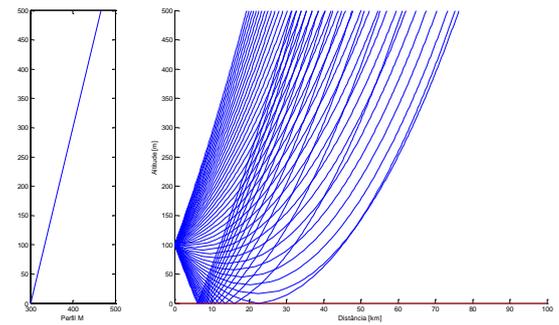


Fig. 3. Traçado de raios para atmosfera sub-refrativa.

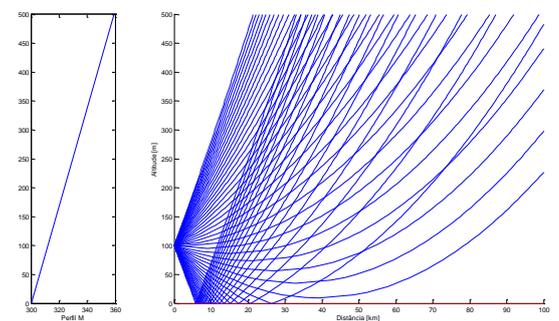


Fig. 4. Traçado de raios para atmosfera normal.

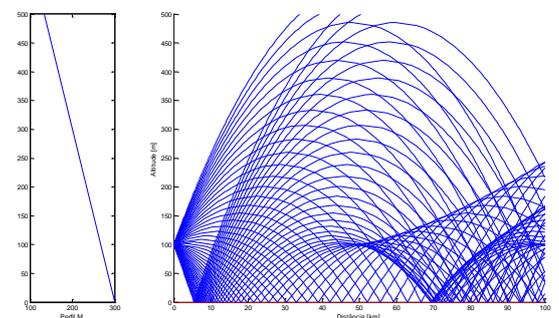


Fig. 5. Traçado de raios para atmosfera super-refrativa.

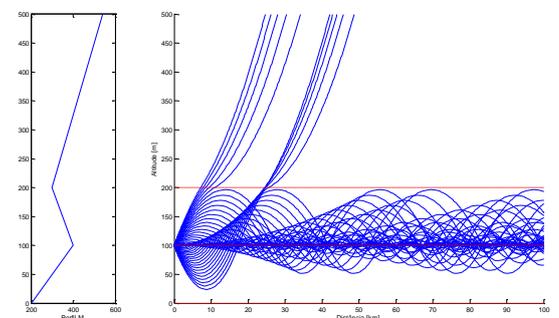


Fig. 6. Traçado de raios para duto elevado.

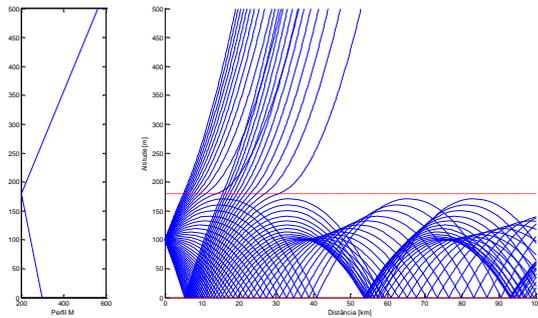


Fig. 7. Traçado de raios para duto de superfície.

### III. MODELO DE PROPAGAÇÃO

O modelo por traçado de raios oferece uma apreciação qualitativa da influência de dutos troposféricos no desempenho de receptores ELINT, como sua localização e falhas de cobertura do sinal.

Para obter resultados quantitativos, foi elaborado um modelo baseado numa solução aproximada da equação de onda, oriunda das equações de Maxwell, que faz uso da geometria típica entre um radar e o receptor ELINT aeromarcado, na qual as distâncias de interesse são muito maiores que o nível de voo. Esta aproximação da equação de onda é conhecida como aproximação paraxial.

#### Propagação no espaço-livre

No espaço-livre, onde não há qualquer efeito do ambiente na propagação das ondas eletromagnéticas, a perda de propagação  $L_{fs}$  (dB) ocorre não por dissipação, mas por difusão da energia numa frente de onda esférica, de raio crescente e divergente da antena, sendo dada por

$$L_{fs} = 32,45 + 20 \log(f_p) + 20 \log(d), \quad (4)$$

onde  $d$  é a distância que separa antenas transmissora e receptora, e  $f_p$  a frequência de transmissão.

#### Fator de propagação

Em modelos de propagação mais elaborados que o espaço-livre, a quantidade básica computada é o Fator de Propagação, definido por

$$F = \left| \frac{E}{E_0} \right|, \quad (5)$$

onde  $E$  é o campo elétrico obtido em certo ponto, incluindo diagrama de radiação normalizado da antena e efeitos diversos do ambiente, e  $E_0$  é o campo obtido no caso espaço-livre, para antenas perfeitamente alinhadas [3].

#### Perdas de propagação

De acordo com o vetor de Poynting, a potência recebida varia segundo  $|E|^2$ . A perda de propagação  $L_{prop}$  (dB), definida como a razão entre a potência transmitida pela potência recebida para um par de antenas isotrópicas fica

$$L_{prop} = L_{fs} - 20 \log(F). \quad (6)$$

Dependendo do valor de  $F$ , (6) pode representar ganho ao invés de perda.

#### Equação parabólica

Para um dipolo magnético vertical, de polarização horizontal, as equações de Maxwell em coordenadas esféricas reduzem-se a

$$\frac{1}{r} \partial_r^2 (r E_\phi) + \frac{1}{r^2} \partial_\theta \left[ \frac{1}{\sin(\theta)} \partial_\theta (\sin \theta \partial_\theta E_\phi) \right] + \omega^2 \mu_0 \varepsilon E_\phi = 0 \quad (7)$$

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo (meio não magnético),  $\varepsilon$  a constante dielétrica do meio, possivelmente não homogêneo, e  $E_\phi$  o campo elétrico. Para polarização vertical, o procedimento dado a seguir é semelhante.

Equação (7) pode ser simplificada pela substituição

$$E_\phi(r, \theta) = \sqrt{\frac{1}{r \sin(\theta)}} U(r, \theta), \quad (8)$$

onde  $U$  é uma função auxiliar [6]. Ainda, se for considerada a mudança de variáveis  $x = a\theta$  e  $z = r - a$ , isto é, para alcance e altitude acima da superfície, a equação final a resolver fica

$$\partial_z^2 u + \partial_x^2 u + 2jk \partial_x u + k^2 \left( n^2 - 1 + \frac{2z}{a} \right) u = 0, \quad (9)$$

onde  $U = e^{jkx} u$  foi utilizada para fatorar a rápida variação de fase numa propagação paraxial, concentrada ao longo da direção de propagação, e  $k$  é o número de onda no vácuo. Esta equação é classificada como parabólica.

Equação (9) pode ser resolvida pelo método *split-step* Fourier [6], dado pelo passo de  $x_0$  a  $x$ , ao longo da altitude  $z$ , por

$$u(x, z) = e^{\frac{k}{2} \left( n^2 - 1 + \frac{2z}{a} \right) (x-x_0)} \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left\{ u(x_0, z) \right\} e^{-j \frac{p^2}{2k} (x-x_0)} \right\}, \quad (10)$$

onde  $\mathcal{F}\{\cdot\}$  representa a transformada de Fourier, que pode ser calculada numericamente por meio de algoritmos FFT amplamente disponíveis. O domínio  $p$  é equivalente ao domínio da frequência, com  $p = k \sin\theta$ , onde  $\theta$  é a direção de propagação do espectro de ondas planas. Métodos para inserir condições iniciais e de contorno são descritos em [6]. Figura 8 ilustra o procedimento da solução numérica, desde uma condição inicial dada pelo padrão de radiação da antena e condições de contorno superior e inferior, até o limite desejado. Sendo uma solução com avanço de passo, esta aproximação exclui campos retro-espalhados, apesar de ser um método *full wave*.

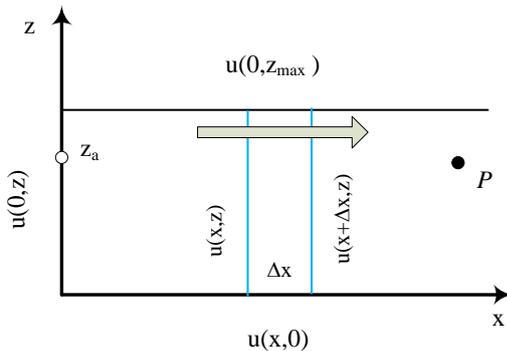


Fig. 8. Solução numérica pelo método *split-step* Fourier.

Finalmente, o Fator de Propagação do modelo, para polarização horizontal, é dado por

$$F_h = |u(x, z)| \sqrt{x}. \quad (11)$$

#### IV. RECEPTOR ELINT SUPER-HETERÓDINO

O receptor super-heteródino é uns dos mais comuns aplicados em GE, devido à sua alta sensibilidade e seletividade [1][2]. Figura 9 apresenta o diagrama de blocos do receptor [2].

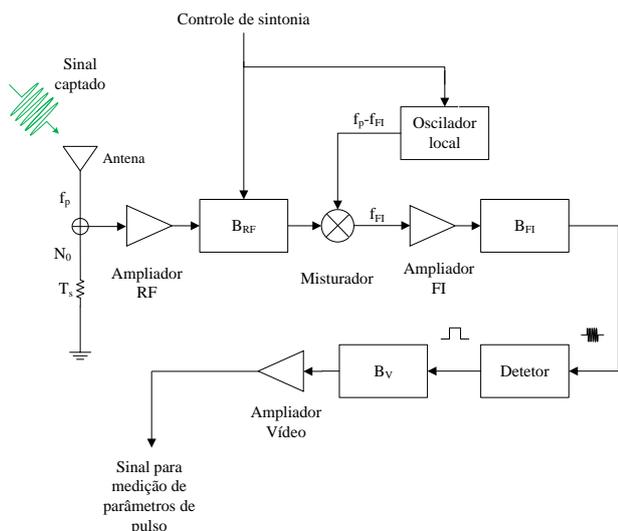


Fig. 9. Modelo de receptor super-heteródino básico para ELINT.

O sinal captado na faixa de RF, centrado em  $f_p$  genérico, é convertido a uma frequência intermediária mais baixa, centrado em  $f_{FI}$ , por meio do misturador, para a qual o desempenho dos circuitos foi otimizado. O ajuste da frequência convertida é feita mediante controle do oscilador local. O filtro de RF pré-seleciona a faixa de operação do equipamento ELINT, aquela passível de captação e conversão. Como o misturador é um dispositivo não linear, ele cria frequências espúrias (intermodulação), não contidas no sinal captado, que são rejeitadas pelo filtro de FI. O detector então responde o envelope do sinal captado, idealmente um pulso retangular sem a portadora, denominado sinal de vídeo. Este sinal processado pode ser aplicado a um conversor analógico-digital (A/D) para ulterior processamento, tomando-se o cuidado de se dispor, antes do conversor A/D, de um filtro *anti-aliasing* [2].

#### V. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

O nível de sinal requerido  $NSR$  (dBm), nos terminais da antena ELINT, a fim de garantir a relação sinal-ruído requerida para processamento efetivo contra ruído térmico é dada por

$$NSR = SNR + NF - 114 + 10 \log(B_{FI}), \quad (12)$$

onde  $SNR$  (dB) é a relação sinal-ruído desejada,  $NF$  (dB) a figura de ruído do receptor e  $B_{FI}$  (MHz) a banda do filtro na etapa de FI [2].

Para o modelo de receptor super-heteródino, o ganho de processamento, ou  $NF$ , é dado por

$$NF = [B_{RF}/(2B_V)]^\gamma, \quad (13)$$

onde  $B_{RF}$  (MHz) é a banda do filtro de RF,  $B_V$  (MHz) a banda do sinal de vídeo e  $\gamma$  é fator de eficiência do processamento, adotado neste artigo como  $\gamma = 0,5$  [2].

O nível de sinal disponível  $NSD$  (dBm), considerados os efeitos de propagação, é calculado por

$$NSD = P_{radar} + G_{radar} + G_{elint} - L_{prop}, \quad (15)$$

onde  $P_{radar}$  (dB) é a potência de transmissão do radar,  $G_{radar}$  (dB) o seu ganho e  $G_{elint}$  (dB) o ganho da antena ELINT, considerada omnidirecional. A condição básica para aproveitamento da missão ELINT exige

$$NSD \geq NSR,$$

que de acordo com o posicionamento da aeronave e a perda de propagação associada, pode ou não ser satisfeita.

Para ilustrar o procedimento de análise, a Tabela I traz os parâmetros de interesse do receptor ELINT super-heteródino e a Tabela III os do radar perscrutado. Utilizando os dados da Tabela II, conclui-se por (12) que  $NSR = -75$  dBm.

TABELA II. RECEPTOR SUPER-HETERÓDINO AVALIADO

Parâmetro	Símbolo	Valor
Ganho antena omni	$G_{elint}$	10 dB
Banda filtro RF	$B_{RF}$	500 MHz
Banda filtro FI	$B_{FI}$	20 MHz
Banda filtro Vídeo	$B_V$	1 MHz
SNR requerida	SNR	15 dB

A simulação para um radar com antena a 30 m do solo está na Figura 10, com padrão de radiação tipo sinc(.)<sup>2</sup>, apontamento horizontal em relação ao solo e condições de atmosfera padrão. O fator de propagação associado, para  $x = 50$  km, ao longo da altitude está na Figura 11.

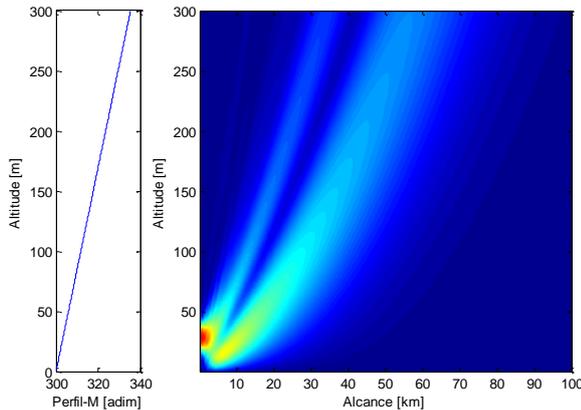


Fig. 10. Intensidade da onda recebida, atmosfera padrão.

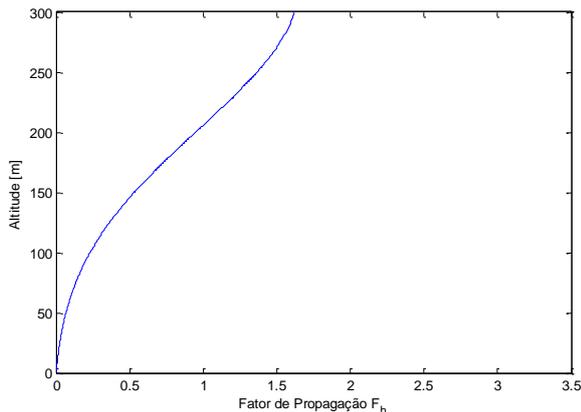


Fig. 11. Fator de propagação em  $x = 50$  km, atmosfera padrão.

A simulação para o mesmo radar, na condição de duto elevado, está na Figura 12. O fator de propagação associado, também para  $x = 50$  km, ao longo da altitude, está na Figura 13. Percebe-se que houve um reforço nas regiões de altitude mais baixa, em comparação à Figura 11.

Na condição de atmosfera padrão, voo nivelado em 250 m, tem-se  $F \cong 1,5$  na Figura 11. Com os dados da Tabela III e usando (15), obtém-se  $NSD = -72,9$  dBm  $> NSR$ . Como consequência, esta altitude permitiria captação de sinal a contento.

TABELA III. RADAR PARA CAPTAÇÃO DE SINAL

Parâmetro	Símbolo	Valor
Ganho antena	$G_{radar}$	20 dB
Potência transmitida RF	$P_{radar}$	20 dBW
Frequência	$f_p$	1 GHz

Entretanto, para duto elevado, identificado pela presença de camada de confinamento, tem-se  $F \cong 1$ , isto é, equivalente a sinal em linha de visada no espaço-livre, no nível de 250 m, dando  $NSD = -76,4$  dBm  $< NSR$ . Dessa forma, nessa altitude fora do duto, não seria possível captar o sinal satisfatoriamente e, provavelmente, a missão poderia ser abortada, por se desconsiderar esse fator na decisão, pois insucessos seriam atribuídos a outras causas. Ademais, ainda na condição de duto elevado e voo nivelado ora a 50 m, tem-se  $F \cong 3,4$  dando  $NSD = -65,8$  dBm  $> NSR$ , caso oposto ao perfil de voo anterior. Se o planejamento levar em conta efeitos de propagação diferentes da atmosfera padrão, o modelo indica que haveria meios de mitigar o problema, através de perfil de voo adequado. O resultado pode ser melhor, como indica a intensidade de sinal para  $x = 100$  km e altitude de aproximadamente 75 m, na Figura 12, semelhante ao de  $x = 50$  km.

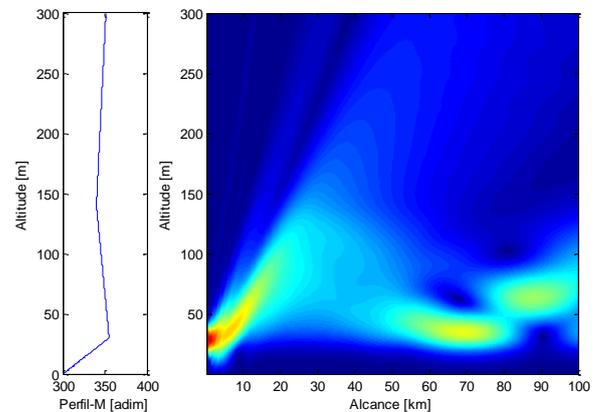


Fig. 12. Intensidade da onda recebida, duto elevado.

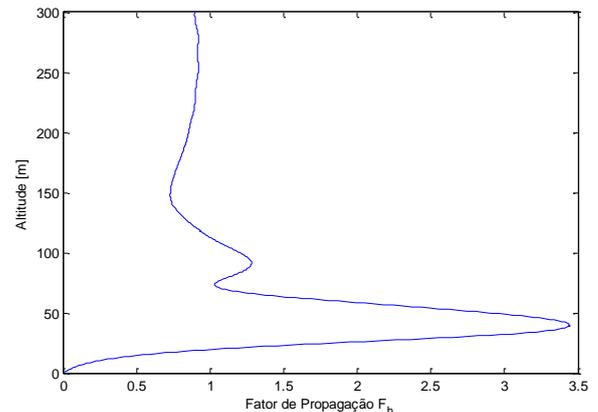


Fig. 13. Fator de propagação em  $x = 50$  km, duto elevado.

## VI. CONCLUSÃO

Um modelo de propagação foi desenvolvido para prover auxílios à decisão para missões ELINT sujeitas a dutos troposféricos. Isto pode ocorrer pela indicação de qual perfil de voo levaria a uma captação de sinal a contento, tendo em consideração as características de processamento do receptor ELINT, ilustrado neste artigo pelo de tipo super-heteródino.

#### AGRADECIMENTOS

À Força Aérea Brasileira pela oportunidade de realizar este estudo e ao Major Aviador Jorge Luiz Lessa Júnior, pelas esclarecedoras discussões sobre problemas operacionais da aviação de patrulha.

#### REFERÊNCIAS

- [1] F. Neri, "Introduction to electronic defense systems", 2 ed., Raleigh: Scitech Publishing, 2006.
- [2] R. G. Wiley, "ELINT: The interception and analysis of radar signals". Boston, London: Artech House Publishers, 2006.
- [3] D. E. Kerr, "Propagation of short radio waves". McGraw-Hill Book Company, 1951. MIT Radiation Laboratory Series vol. 13.
- [4] B. R. Bean, E. J. Dutton, "Radio meteorology". New York: Dover Publications, 1968.
- [5] D. C. Livingston, "The physics of microwave propagation". New Jersey: Prentice-Hall, 1970.
- [6] J. R. Kuttler, G. D. Dockery, "Theoretical description of the parabolic approximation/Fourier split-step method of representing electromagnetic propagation in the troposphere", Radio Science, v. 26, n. 2, p. 381-393, April 1991.