

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS IONOSFÉRICOS E TROPOSFÉRICOS NA LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DE PLATAFORMAS DE COLETA DE DADOS

Celestino, C.C.¹, de Sousa, C. T.¹, Yamaguti, W.¹, Kuga, H.K.².

1. DSE – Divisão de Sistemas Espaciais

2. DMC – Divisão de Mecânica Espacial e Controle

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, Brasil.

claudia@dss.inpe.br, cristina@dss.inpe.br, yamaguti@dss.inpe.br, hkk@dem.inpe.br.

Resumo: Neste trabalho é apresentada uma avaliação dos efeitos ionosféricos e troposféricos na localização geográfica de plataformas de coleta de dados do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais. São apresentados alguns modelos de atraso na propagação de sinais na ionosfera e na troposfera para simulação de seus impactos no desempenho dos algoritmos existentes de localização geográfica. Foram simuladas as medidas de desvio Doppler utilizando os elementos orbitais do Satélite de Coleta de Dados (SCD2) e uma Plataforma de Coleta de Dados (PCD) localizada em Cuiabá em que a posição de referência é conhecida. Ao inserir os efeitos ionosférico e troposférico observaram-se erros máximos de aproximadamente 500 metros e mínimos de 150 metros na localização geográfica desta PCD.

Palavras-chaves: ionosfera, troposfera, localização geográfica, efeito Doppler, coleta de dados.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais operados pelo INPE possui uma comunidade usuária de cerca de 100 organizações e mais de 750 plataformas de coleta de dados instaladas no território nacional. Este sistema utiliza os satélites de órbita baixa SCD-1, SCD-2 e CBERS-2 para realização dos serviços de coleta de dados. Uma das funcionalidades oferecidas pelo sistema trata-se da localização geográfica de plataformas de coleta de dados baseada no efeito Doppler e por método estatístico de mínimos quadrados [1].

A ionosfera e a troposfera podem ser uma fonte importante de erros de localização de plataformas. Os erros devidos à ionosfera podem variar de poucos metros a dezenas de metros, enquanto que na troposfera os erros no zênite estão geralmente entre dois e três metros [2].

O objetivo desse artigo é o de avaliar os impactos causados pelos efeitos ionosféricos e troposféricos na localização geográfica de uma plataforma. Nesse processo de avaliação foram comparados alguns modelos existentes para os efeitos ionosféricos e troposféricos mostrando a ordem de grandeza dos erros envolvidos, tanto dos modelos, quanto dos valores de atraso.

O conteúdo deste artigo está organizado da seguinte maneira: na seção 2 são apresentadas algumas características da ionosfera e da troposfera e seus efeitos no posicionamento relativo; na seção 3 são descritos os modelos que estão sendo considerados; na seção 4 são apresentadas análises qualitativas dos efeitos ionosféricos e troposféricos e na seção 5 os resultados obtidos.

2. CARACTERÍSTICAS DA IONOSFERA E TROPOSFERA

A obtenção das coordenadas de uma plataforma é feita pela medição das frequências de desvio Doppler dos sinais retransmitidos pelos satélites e recebidos pelas estações em solo. Esses sinais ao se propagarem na atmosfera terrestre, além de outros fatores, sofrem influências dos elementos químicos que compõem as camadas da atmosfera gerando um atraso no tempo de propagação, o que ocasiona erros nas coordenadas finais fornecidas pelo sistema utilizado. O atraso na propagação dos sinais devido aos efeitos atmosféricos consiste, essencialmente, da ionosfera e da troposfera.

2.1. Ionosfera

A ionosfera se localiza entre 50 e 1.000 quilômetros acima da superfície terrestre [3], é composta de íons, plasma ionosférico. O maior agente de ionização da ionosfera, é o Sol, cuja radiação nas bandas de raio X, e ultravioleta, insere grande quantidade de elétrons livres em seu meio. Na ionosfera a densidade de elétrons livres é variável de acordo com a hora do dia, estação do ano, e composição química da alta atmosfera. A refração ionosférica depende da frequência e é proporcional ao número de elétrons presentes ao longo do caminho percorrido pelo sinal entre a plataforma transmissora e o satélite, chamado de TEC ("Total Electron Content"). Os dados da ionosfera no Brasil são obtidos utilizando foguetes, satélites, sistemas de modelagem e simulação dos processos ionosféricos e termosféricos.

2.2. Troposfera

O efeito da troposfera depende da densidade da atmosfera e do ângulo de elevação do satélite. E este efeito pode ser sentido da superfície terrestre até

aproximadamente 50 km. Para frequências abaixo de 30 GHz comporta-se como um meio não-dispersivo, ou seja, não depende da frequência transmitida. [3]. A troposfera depende da massa gasosa e é dividida em duas partes: a) composta de gases secos; chamada de componente seca e b) composta de vapor d'água; chamada de componente úmida.

O atraso troposférico é gerado por estas componentes: seca e úmida. O atraso devido a componente seca pode corresponder a aproximadamente 2 a 3m no zênite e varia com a temperatura e a pressão atmosférica local [3]; enquanto o atraso pela componente úmida é de aproximadamente 1 a 30 cm no zênite [4], porém sua variação é muito maior. Por este motivo sua predição com boa precisão se torna tarefa complexa.

3. OS MODELOS CONSIDERADOS

A seguir serão descritos os modelos que foram utilizados na comparação exposta neste trabalho.

3.1. Modelo Ionosférico

O atraso do sinal ionosférico é dado por [5]

$$R_I = \frac{40,3 \text{ VTEC Sec } Z}{f^2} \quad (1)$$

em que: *VTEC* é a quantidade de elétrons ao longo do caminho na direção vertical, *Z* é o ângulo zenital do caminho do sinal em relação ao plano da altitude média de aproximadamente 350 km e *f* é a frequência de transmissão da plataforma.

O ponto ionosférico, *Z*, é dado por:

$$\text{Sen } Z = \frac{R_E \text{Cos } \gamma}{R_E + H} \quad (2)$$

sendo: *R_E* o raio da Terra, *H* e γ é a altitude e o ângulo de elevação do satélite, respectivamente.

Substituindo a equação (2) na equação (1) e diferenciando-a em relação ao tempo

$$\dot{R}_I = -\frac{36,2 \text{ VTEC Cos } \gamma \text{ Sen } \gamma \dot{\gamma}}{f^2 (1 - 0,9 \text{ Cos}^2 \gamma)^{3/2}} \quad (3)$$

em que $\dot{\gamma}$ é a taxa de elevação do satélite.

A equação 1 modela o atraso ionosférico do sinal, e a equação 3 modela a variação temporal deste atraso, e pode ser aplicado para a correção ionosférica de medidas baseadas no desvio Doppler.

Como foi visto, o atraso devido a ionosfera é sensível a variável *VTEC*. Os valores utilizados para esta variável foram obtidos a partir de IRI-2001 (International Reference

Ionosphere) [7] e uma comparação do resultado obtido é feito a partir do trabalho de [6].

3.2. Modelos Troposféricos

O primeiro modelo descrito é o modelo empírico de Hopfield para o atraso da troposfera em função dos valores de temperatura e de pressão medidos na superfície, e é dado por [4]:

$$T_r^s = T_{ZH} m_b(\gamma) + T_{ZW} m_w(\gamma) \quad (4)$$

em que

$T_{ZH} = 155,2 \times 10^{-7} \frac{P}{T} H_d$ é o atraso zenital da componente seca.

$T_{ZW} = 155,2 \times 10^{-7} \frac{4810e}{T^2} H_W$ é o atraso zenital da componente úmida.

sendo: *T* = temperatura, *P* = pressão seca, *e* = pressão úmida, $H_d = 40136 + 148,72(T - 273,16)$ e $H_W = 11000m$.

$m_b(\gamma)$ e $m_w(\gamma)$ são funções de mapeamento que relacionam o atraso das componentes seca e úmida com o ângulo de elevação (γ) e é dado por

$$\begin{aligned} m_b(\gamma) &= \text{Csc}(\gamma^2 + 6,25)^{1/2} \\ m_w(\gamma) &= \text{Csc}(\gamma^2 + 2,25)^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

O segundo modelo considerado neste trabalho é o modelo de Saastamoinen dado por [8]:

$$\begin{aligned} T_{ZH} &= 0,002277 D P \\ T_{ZW} &= 0,002277 e D \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

em que

$D = (1 + 0,0026 \text{Cos } 2\varphi + 0,00028H)$ e φ e *H* é a latitude e altitude do satélite.

O terceiro modelo é um modelo dinâmico que está sendo utilizado no CPTEC-INPE - Cachoeira Paulista. Neste modelo são empregados os campos de temperatura, de pressão e de umidade gerados por um modelo de PNT (previsão numérica de tempo) a partir de uma condição inicial onde as observações são consideradas [9]. Os dados deste modelo dinâmico estão disponíveis em <http://satellite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm>.

4. ANÁLISE QUALITATIVA DO EFEITO IONOSFÉRICO E TROPOSFÉRICO

Nesta seção serão analisados, qualitativamente, os valores do atraso troposférico (componente úmida e seca) utilizando o modelo dinâmico do CPTEC [9] e do ionosférico utilizando o modelo de IRI [7] para o valor do VTEC.

Na Figura 1 é apresentada uma comparação entre os valores devido ao efeito zenital da troposfera utilizando a modelagem dinâmica de [9], modelo empírico de Hopfield [4] e de Saastamoinem [8] para o ano de 2004. Observe que a diferença máxima entre os valores zenitais é de aproximadamente 15 cm considerando a estação do ano verão e a estação GPS em Cuiabá. Esta diferença ocorre porque nos modelos de Hopfield e de Saastamoinem são utilizados valores padrões para a temperatura, componente úmida e seca enquanto na modelagem dinâmica a primeira medida é real. Estes valores padrões são obtidos das regiões subtropicais (por exemplo, Europa e América do Norte). Desta forma, neste trabalho são utilizados dados da modelagem dinâmica [9], para a simulação da localização da PCD.

Na Figura 2 são mostrados os valores para a variável VTEC utilizados nas simulações numéricas (IRI, 2001). Estes valores foram obtidos considerando o dia sete de abril do ano de 2006 com latitude de -15.3085° (S) e com longitude de -56.2500° (W). Nesta figura o maior valor ocorre às 15 horas. O erro em localização devido a este efeito, para os horários 11h e 18h, foi de 171m e 152m, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 1.

Em [6], o atraso zenital ionosférico do sinal considerando a cidade do Rio de Janeiro (Brasil) é de aproximadamente 30 metros, e utilizando o modelo IRI é de aproximadamente 10 metros. Esta diferença ocorre porque o TEC causa um decaimento no sinal do GPS, e na região acima do Brasil este depende fortemente da anomalia ionosférica equatorial [6]. Para regiões tropicais como o Brasil, ocorrem irregularidades ionosféricas que os sinais de GPS não conseguem detectar.

Neste trabalho foram utilizados os resultados do modelo ionosférico IRI para a simulação da localização da PCD. Então, levando em conta que o modelo também pode ser impreciso, pode-se concluir que o erro na localização devido ao efeito ionosférico pode até mesmo ser maior do que o valor aqui apresentado.

5. RESULTADOS

Para gerar resultados de localização geográfica devido ao efeito ionosférico e troposférico foi considerado o Satélite SCD2 de órbita baixa com inclinação de 25° em relação ao Equador e altitude aproximada de 750km e uma PCD de número 32590, localizada em Cuiabá, com latitude de 5.3085° (S) e longitude de 56.2500° (W) conhecidas. Foram simulados quatro arquivos de passagem considerando três dias e horários distintos, conforme primeira coluna da Tabela 1. Os erros de localização geográfica ao inserir efeitos ionosférico e (ou) troposférico nas medidas Doppler

simulados podem ser observados nas últimas duas colunas. As elevações mínimas e máximas dos sinais de frequência da PCD relativa ao satélite estão apresentadas na segunda e terceira colunas. Foi utilizado o localizador geográfico [1] para gerar os resultados.

Pode-se observar que o erro em localização da PCD devido ao efeito ionosférico foi maior do que o erro considerando o efeito troposférico. O erro máximo na localização observada foi de 582m para o dia 10 de abril e o erro mínimo foi de 187m considerando o dia 07 de abril. Com os resultados obtidos, pode-se concluir que os erros de localização devido aos efeitos acima descritos são consideráveis na aplicação de localização geográfica de PCDs.

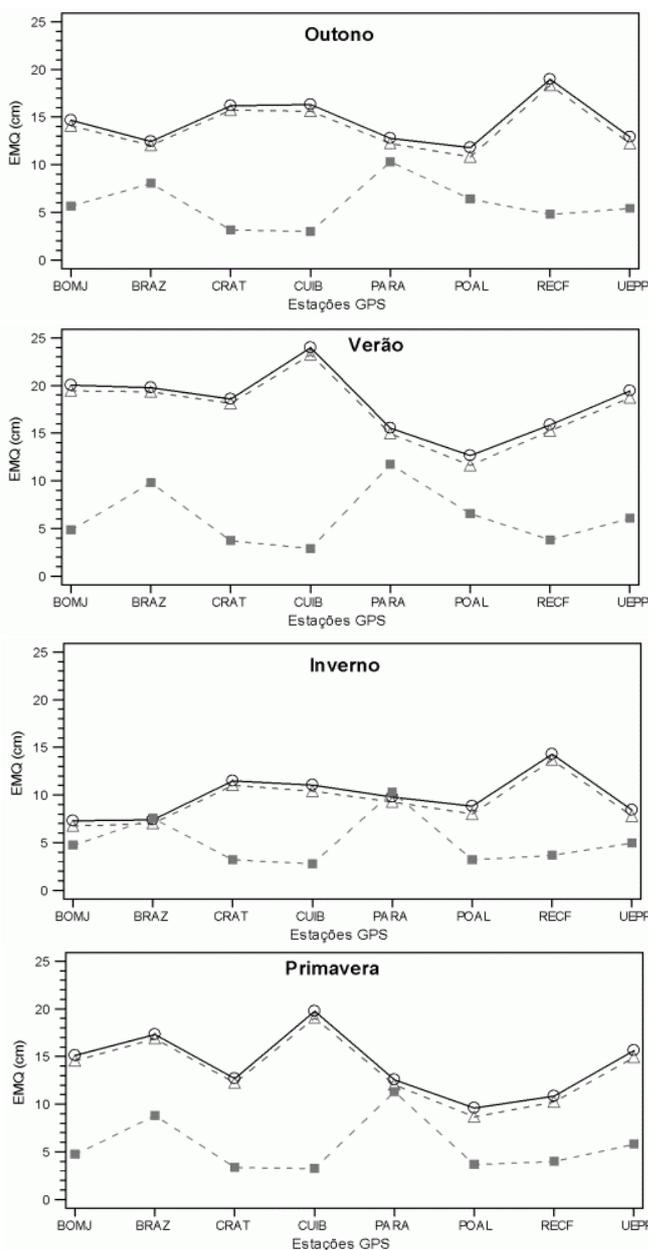


Figura 1 – Valores do atraso zenital utilizando os modelos de Hopfield (○), Saastamoinem (△) e modelagem dinâmica (■). (Fonte: [9]).

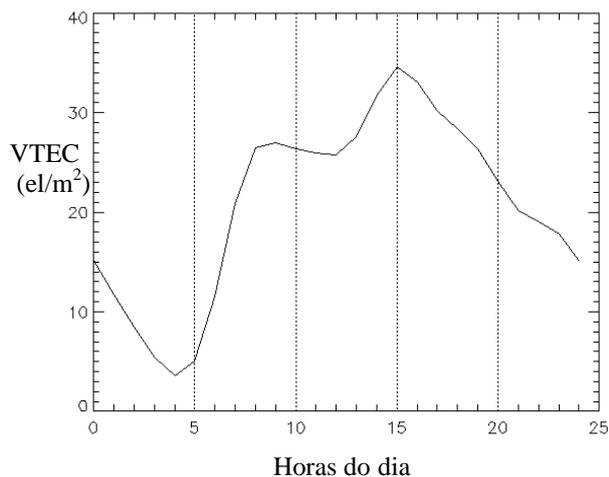


Figura 2 – Valores da variável VTEC (IRI-2001).

Dia/Hora	γ_{\min} (graus)	γ_{\max} (graus)	$e(\dot{R}_I)$ (km)	$e(\dot{R}_T)$ (km)
06/04/2006 14 horas	4	28	0.1549	0.0553
07/04/2006 11 horas	15	42	0.1714	0.0246
07/04/2006 18 horas	9	33	0.1525	0.0395
10/04/2006 9 horas	10	73	0.5372	0.0246

Tabela 1 – Erro de localização da PCD: 32590 considerando efeitos ionosféricos e troposféricos .

AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem: Ao Ms. Luiz Fernando Sapucci por toda a informação sobre o modelo dinâmico da troposfera. Ao Dr. Eurico R. de Paula pela orientação na utilização do modelo IRI. Ao CNPq (processo N° 382746/2005-8) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] Sousa, C. T., “Geolocalização de Transmissores com Satélites Usando Desvio Doppler em Tempo Quase Real”, Tese de Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais - Divisão de Mecânica e Controle - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.
- [2] J. A. Klobuchar, “Ionospheric Effects on GPS. In: Parkinson, B. W.: Spilker, J. J. Global Positioning System: Theory and Applications”, Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, v.1, p.485-515, 1996.
- [3] J. F. G. Monico, “Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações”, São Paulo: Unesp, 2000.
- [4] G. Seeber, “Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications”, Berlin, New York: Walter de Gruyter, p. 531, 1993.
- [5] K. Aksnes, P.H. Andersen, E. Haugen, “A Precise Multipass Method for Satellite Doppler Positioning”, Celestial Mechanics, 44, p. 317-338, 1988.
- [6] E. R. de Paula, I.J. Kantor, L.F.C. de Rezende, “Characteristics of the GPS Signal Scintillations During Ionospheric Irregularities and Their Effects over the GPS System”, anais do IV SBEIN - Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial, 2004.
- [7] D. Bilitza, International Reference Ionospheric Model – IRI, em http://nssdc.gsfc.nasa.space/models/iri_n.html, acesso em 2000 e 2001.
- [8] J. Saastamoinen, “Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction”, Bulletin Geodésique, 105, Sept 1972, 106, Dec, 1972, 107, March, 1973.
- [9] L. F Sapucci., L. A. T. Machado, J. F. G. Mônico, “Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul: Variabilidade Sazonal e Avaliação da Qualidade”, Submetido para a Revista Brasileira de Cartografia, Março. 2005.