REFINAMENTO INICIAL DA CORREÇÃO ALTIMÉTRICA PARA A REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA CONSIDERANDO A CURVATURA DA TERRA NO MONITORAMENTO DO NÍVEL DO MAR VIA REFLETOMETRIA GNSS

Vitor Hugo de Almeida Junior [1], *Felipe Geremia-Nievinski* [1]

[1] Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves, 9500, Campus do Vale, Porto Alegre, vitorhugo.jr@hotmail.com; felipe.nievinski@ufrgs.br.

RESUMO

Devido à refração atmosférica, as ondas de rádio emitidas pelos satélites GNSS sofrem um atraso ao atravessarem a atmosfera neutra, afetando a estimativa altimétrica por refletometria GNSS (GNSS-R). Fórmulas fechadas foram desenvolvidas para o atraso atmosférico e correção altimétrica aproximando a superfície refletora a um plano. O presente estudo buscou refinar este modelo matemático utilizando uma superfície refletora esférica. Para isso, foram realizadas substituições de variáveis auxiliares nas fórmulas fechadas por variáveis calculadas na superfície esférica. O modelo refinado foi comparado ao modelo original. Verificou-se que o modelo original superestima a correção altimétrica. Discrepâncias centimétricas são observadas em ângulos de elevação menores que 16° para uma altura de antena a 500 m de altura (maior altura simulada). Para alturas menores, discrepâncias centimétricas ocorrem em ângulos proporcionalmente menores. Aproximadamente a 0.1°, a discrepância é centimétrica até para a menor altura simulada de 10 cm.

Palavras-chave *— GNSS-R, Sensoriamento remoto geodésico, Atraso atmosférico, Correção altimétrica, Modelo de superfície esférica.*

ABSTRACT

Radio waves emitted by GNSS satellites experience a delay when crossing the neutral atmosphere due to atmospheric refraction, introducing a bias in the GNSS-R (GNSS reflectometry) altimetry estimative. Closed formulas were developed for the atmospheric delay and altimetry correction supposing a plane reflector surface. This study proposed to refine the closed formulas using a spherical reflector surface. For that, auxiliary variables were substituted in the closed formulas by variables computed on the spherical surface. The refined formulas were compared to original ones. It was noticed that the original formulas overestimate the altimetry correction. Centimetric discrepancies were observed at elevation angles lower than 16° for an antenna at 500 m (highest simulated height). Lower antenna height reaches centimetric discrepancies at lower angles. Approximately at 0,1°, discrepancies were centimetric even for the lower simulated height of 10 cm.

Keywords *— GNSS-R, Geodetic remote sensing, Atmospheric delay, Altimetry correction, Spherical surface model.*

1. INTRODUÇÃO

Séries históricas de dados de medição do nível do mar demonstram que o nível médio global dos mares está subindo a taxas cada vez maiores. Consecutivamente, eventos extremos podem tornar-se cada vez mais frequentes, afetando uma porção significativa das populações das zonas costeiras [1].

O monitoramento do nível do mar costeiro é, portanto, crucial estas regiões. Recentemente, a refletometria GNSS (*Global Navigation Satellite System Reflectometry* ou GNSS-R) tem se mostrado uma importante alternativa para o monitoramento do nível do mar costeiro frente as limitações dos sistemas de medição nas regiões costeiras [2]. A GNSS-R é uma técnica de sensoriamento remoto geodésico que utiliza as ondas de satélites GNSS que refletem na superfície para estimar parâmetros geofísicos desta superfície como a altura, ou nesse caso, o nível do mar [3].

As ondas GNSS atravessam uma espessa camada de ar da atmosfera neutra, o que afeta as observáveis GNSS como a fase da portadora e a razão sinal/ruído ou SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). A refração influencia na magnitude e na direção da velocidade da onda, causando um atraso atmosférico em relação à propagação ideal em vácuo [3-4].

A complexidade da correção do atraso atmosférico em GNSS-R encontra-se na realização em termos interferométricos, ou seja, nas ondas direta e refletida [5]. Recentemente foram desenvolvidas soluções com fórmula fechada para o atraso atmosférico em GNSS-R de plataforma terrestre [5]. Porém, tal solução aproxima a superfície refletora a um plano local tangente ao elipsoide terrestre e a propagação da onda parcialmente retilínea. A desconsideração da curvatura da Terra pode introduzir um viés sistemático na estimativa altimétrica, cuja magnitude é dependente da altura da antena e do ângulo de elevação do satélite [6-7]. Assim, o objetivo do presente estudo foi refinar as fórmulas fechadas do atraso atmosférico interferométrico em GNSS-R, introduzindo a curvatura terrestre através de uma superfície esférica osculante ao elipsoide.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Observáveis altimétricas da refletometria GNSS

Na altimetria por GNSS-R, a observável fundamental é o atraso de propagação interferométrico $\tau_i = \tau_r - \tau_d$, o qual consiste no caminho adicional da onda refletida τ_r em relação a onda direta τ_d [3]. Para receptores GNSS-R terrestres, o atraso interferométrico pode ser simplificado pelas componentes geométrica D_i e atmosférica d_i, ou seja, $\tau_i = D_i + d_i$.

A componente geométrica D_i consiste na distância interferométrica em vácuo $D_i = D_r - D_d$, onde D_d é a distância percorrida pela onda direta, entre o satélite e a antena receptora; e D_r é a distância percorrida pela onda refletida, entre o satélite, o ponto de reflexão e a antena. O ponto de reflexão é dependente do modelo de superfície refletora. Em GNSS-R terrestre, o modelo de superfície plano local tangente ao elipsoide terrestre é o modelo mais simples e usual [8]. Neste modelo, $D_i = 2H\text{sen}\, e$ dado simplesmente pela relação trigonométrica da altura da antena (H) e o ângulo de elevação do satélite (e), conforme mostrado na Figura 1:

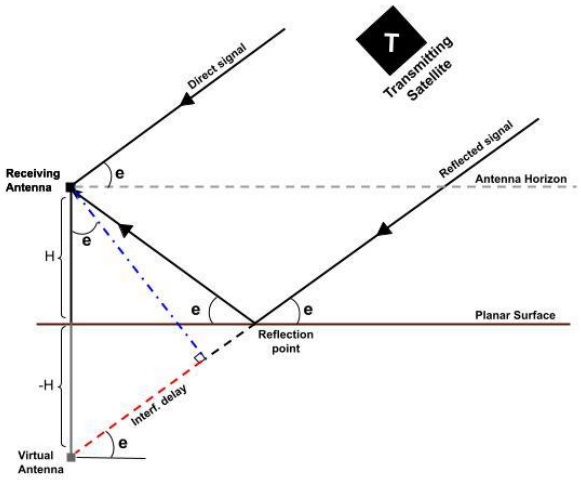

Figura 1. Geometria da reflexão em uma superfície plana local e determinação do atraso interferométrico.

O atraso interferométrico τ_i - expresso em metros - está relacionado com a fase interferométrica ϕ_i, em radianos, da seguinte forma:

$$\phi_i = k\tau_i + \varphi_i \qquad (1)$$

onde a constante $k = 2\pi/\lambda$ é o número-de-onda ordinário, dependente do comprimento da onda GNSS λ e φ_i é a fase inicial ou deslocamento da fase. A fase interferométrica, por sua vez, é inferida por meio da observável SNR.

A estimativa altimétrica é realizada por meio da análise da variável pseudo-Doppler interferométrico f_i' dada pela variação do atraso interferométrico com relação a sensibilidade vertical do atraso K_z:

$$f_i' = \partial\tau_i/\partial K_z = H_a \qquad (2)$$

A sensibilidade vertical K_z é dependente de um modelo de superfície. Para uma superfície plana, $K_z = 2\text{sen}\, e$ [9]. A f_i' estima diretamente uma altura aparente da antena H_a. No plano, H_a é linearmente relacionada com a altura geométrica H. Porém, em uma superfície mais complexa como a esfera, isto não ocorre de forma linear.

2.2. Esfera osculante ao elipsoide

A esfera osculante gaussiana é a esfera que melhor se ajusta ao elipsoide terrestre de referência. A dimensão do raio da esfera osculante é dependente da latitude do ponto base no elipsoide sob o qual oscula. [10]. Neste trabalho, utilizou-se o modelo matemático apresentado em [11] para solucionar a reflexão na esfera osculante, cujas equações foram adaptadas e implementadas para GNSS-R em [6, 12].

2.3. Correção atmosférica altimétrica

A refração causa um atraso na propagação da onda GNSS em relação ao vácuo em razão dos diferentes índices de refração da atmosfera neutra. A componente linear do atraso retarda a rapidez de propagação da onda, enquanto a componente angular desvia a trajetória da onda [4]. Nesse sentido, [5] desenvolveram fórmulas fechadas para correção altimétrica para o atraso atmosférico interferométrico aproximando a propagação a curvas retilíneas e superfície plana. A componente angular d_i^{gP} é dada por:

$$d_i^{gP} = D_i'^P - D_i^P = 2H(\text{sen}\, e' - \text{sen}\, e) \qquad (3)$$

onde $D_i'^P = 2H\ \text{sen}\, e'$ é a distância interferométrica refratada e e' consiste no ângulo de elevação refratado, obtido numericamente por meio de traçado de raios da onda direta.

A componente linear d_i^{aP} avalia a refração ao longo da trajetória na camada abaixo da antena GNSS:

$$d_i^{aP} = N_\ell^P D_\ell'^P \qquad (4)$$

onde $D_\ell'^P = 2H/\text{sen}\, e'$ é a distância inclinada refratada percorrida na camada abaixo da antena; N_ℓ^P é a refratividade média da camada abaixo da antena.

O atraso atmosférico interferométrico é dado pela soma das componentes angular e linear $d_i^P = d_i^{gP} + d_i^{aP}$. Por fim, a correção atmosférica altimétrica Δh é dada como $\Delta h^P = \partial d_i^P/\partial K_z^P$.

2.4. Refinamento da correção atmosférica altimétrica

Foram realizados ajustes no modelo matemático original de [5] através da substituição de determinadas grandezas originalmente na superfície plana por grandezas computadas no modelo de superfície esférico. Pode-se dizer que este é um modelo matemático híbrido ou quase-esférico, visto que existem variáveis oriundas de ambos os modelos plano e esférico. No refinamento, o atraso linear foi definido como:

$$d_i^{aS} = N_\ell^P D_\ell'^S \qquad (5)$$

onde $D_\ell'^S = 2\,\|\vec{r}_s'^S - \vec{r}_a\|$ é a distância inclinada refratada na esfera, obtida a partir das posições do ponto de reflexão

refratado na esfera $\vec{r}_s'^S$ e da posição da antena $\vec{r}_a$. E o atraso angular d_i^{gS} é dado por:

$$d_i^{gS} = D_i'^S - D_i^S \quad (6)$$

em que $D_i'^S$ é a distância interferométrica na esfera, dependente de $\vec{r}_s'^S$, e D_i^S é a distância interferométrica na esfera em vácuo, dependente de $\vec{r}_s^S$.

A correção altimétrica refinada $\Delta h^S = \partial d_i^S / \partial K_z^P$ é dada em função do atraso atmosférico refinado $d_i^S = d_i^{gS} + d_i^{aP}$. As correções altimétricas no plano e refinada foram comparadas e suas discrepâncias foram dadas por $\delta h = \Delta h^P - \Delta h^S = \partial \delta d_i / \partial K_z^p$, onde $\delta d_i = d_i^P - d_i^S$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos por meio de simulação computacional através das equações apresentadas na Seção 2. Foram simulados diferentes cenários variando-se essencialmente o ângulo de elevação do satélite e a altura da antena receptora. Variou-se o ângulo de elevação do satélite do zênite (90°) até o horizonte da antena ou horizonte plano (0°). Já as alturas de antena variaram entre 10 m a 500 m.

Primeiramente, realizou-se a implementação do modelo matemático refinado para o atraso atmosférico interferométrico d_i^S. Posteriormente, implementou-se as fórmulas de [5] para obter o atraso atmosférico interferométrico d_i^P. Os resultados do atraso atmosférico de ambos os modelos foram muito semelhantes nos altos ângulos de elevação, enquanto se diferenciaram gradativamente à medida que o ângulo de elevação reduz. Isso se deve ao fato de que, nos altos ângulos de elevação, o ponto de reflexão ocorre muito próximo ao receptor e, portanto, a geometria da reflexão na esfera e no plano serão muito próximos. O ponto de reflexão ocorre mais distante do receptor quanto maior a altura do receptor e menor o ângulo de elevação [7]. Cabe salientar também que o atraso atmosférico é mínimo no zênite e aumenta quanto mais inclinado, reforçando as maiores diferenças entre os modelos na direção dos menores ângulos de elevação. Na Figura 2 são apresentadas as diferenças (δd_i) entre os atrasos atmosféricos na esfera e no plano.

A Figura 2 demonstra que nos ângulos de elevação, próximos ao zênite, as diferenças são mínimas, de ordem sub-milimétrica, inclusive para uma antena a 500 m de altura. As "franjas" que aparecem próximo ao zênite são produto de ruído numérico do cálculo na esfera. Abaixo de 10° as diferenças ultrapassam o nível centimétrico e o gradiente das diferenças aumenta acentuadamente. Próximo ao horizonte plano ocorre o cenário mais crítico, onde as diferenças atingem nível métrico e até dezenas de metros, dependendo da altura da antena. Cabe salientar que as diferenças δd_i são dominadas pela componente linear do atraso atmosférico. Tal dominância aumenta em direção aos menores ângulos de elevação, chegando a quase 100% no horizonte da antena.

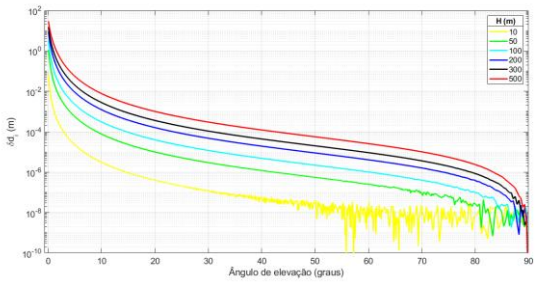

Figura 2. Diferenças no atraso atmosférico interferométrico entre os modelos quase-esférico e plano.

As diferenças no atraso atmosférico são impulsionadas na correção altimétrica atmosférica, visto que a correção altimétrica é baseada no gradiente do atraso atmosférico. Logo, as diferenças entre as correções altimétricas (δh) são maiores que δd_i (Figura 3). As diferenças δh são positivas, indicando que o plano superestima o que ocorre em um cenário mais realista como a esfera. Assim como para δd_i, as contribuições para as diferenças δh são dominadas pela componente linear do atraso atmosférico.

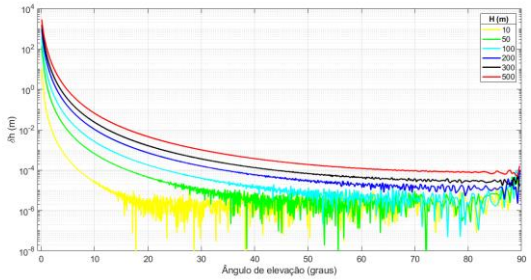

Figura 3. Diferenças na correção atmosférica altimétrica entre os modelos quase-esférico e plano.

Verifica-se na Figura 3 que as diferenças da correção altimétrica seguem padrão similar as diferenças no atraso atmosférico. Nos altos ângulos de elevação, as diferenças são irrisórias, menores que 1 mm mesmo para uma antena a 500 m de altura até 30° aproximadamente. Para a menor antena simulada (10 m), as diferenças são menores que 1 mm até 5° aproximadamente. As diferenças δh ultrapassam 1 cm aos 16° aproximadamente para uma antena a 500 m de altura. Para alturas menores, o nível centimétrico é atingido em ângulos de elevações menores. As diferenças acentuam-se quanto mais próximo de 0°, chegando a níveis métricos.

Erros sistemáticos maiores que 1 cm não podem ser admitidos para medições do nível do mar em curto e longo prazo [13]. Dessa forma, considerando um limiar de 1 cm para as diferenças de correção altimétrica ($\delta h > 1\text{cm}$), verificou-se que aos 500 m de altura o limiar é atingido aos 16° de elevação do satélite (Figura 4). O limiar é atingido em ângulos menores quanto menor a altura como, por exemplo, aos 12° e 7° para as respectivas alturas de 300 m e 100 m. Abaixo de 0.1° de elevação, o limiar é atingido em qualquer altura, inclusive para uma altura mínima teórica de 0.1 m.

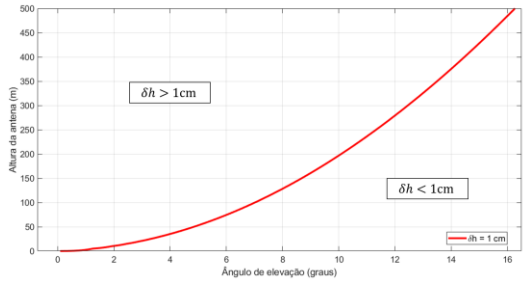

Figura 4. Limiar de 1 cm de diferença entre as correções atmosféricas altimétricas, com e sem refinamento.

Dessa forma, o refinamento da correção altimétrica remove este viés verificado principalmente nos baixos ângulos de elevação, onde o atraso atmosférico é mais crítico. Analisando exclusivamente a correção altimétrica refinada Δh^S, verifica-se que nesta região dos baixos ângulos de elevação o limiar é atingido em alturas muito baixas (Figura 5). Por exemplo, aos 15 m de altura, a correção altimétrica é necessária em todos os ângulos de elevação, inclusive a zênite.

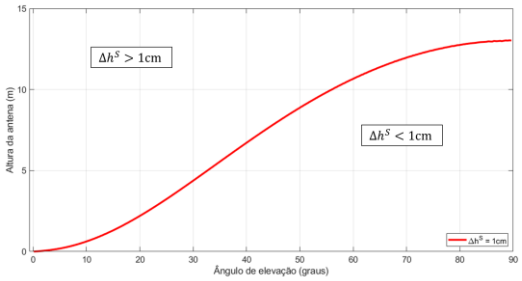

Figura 5. Limiar de 1 cm para a correção atmosférica altimétrica refinada

Portanto, verifica-se que a curvatura terrestre apresenta um forte impacto na modelagem do atraso atmosférico e na correção altimétrica atmosférica. A curvatura não deve ser ignorada especialmente para satélites rastreados abaixo de 10° de elevação. Demonstrou-se que o refinamento do modelo matemático de correção altimétrica é pertinente quando se trata de baixos ângulos de elevação e altas alturas de antena. O viés causado pela refração atmosférica tem um efeito altimétrico considerável e deve ser corrigido. O refinamento adiciona maior rigor na correção, especialmente em cenários críticos para o atraso atmosférico.

4. CONCLUSÕES

A partir da realização deste trabalho, verificou-se que a curvatura da Terra tem um impacto significativo na correção do atraso atmosférico na altimetria por GNSS-R de plataforma terrestre. Constatou-se diferenças maiores que 1 cm abaixo de 16° para uma antena a 500 m de altura. O ângulo reduz gradativamente com a redução da altura da antena. Abaixo de 0.1°, as diferenças são significativas para todas as alturas, inclusive para uma altura mínima de 1 m.

Nos altos ângulos de elevação, acima de 30°, o impacto é submilimétrico. Contudo, ressalta-se que a GNSS-R de plataforma terrestre e baseada em SNR utiliza-se, em geral, de satélites rastreados em ângulos rasantes, abaixo de 30°. Além disso, nas baixas elevações o atraso atmosférico é mais crítico e demanda maior precisão para sua determinação. Portanto, a consideração da curvatura terrestre é essencial para a correta determinação do atraso atmosférico interferométrico na estimativa do nível do mar por GNSS-R.

5. REFERÊNCIAS

[1] OPPENHEIMER, M. *et al.* Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities. *In*: **IPCC Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate.**: IPCC, 2019.

[2] PENNA, N. T. *et al.* Sea Surface Height Measurement Using a GNSS Wave Glider. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 11, p. 5609–5616, 2018.

[3] ZAVOROTNY, V. U. *et al.* Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 2, n. 4, p. 8–45, 2014.

[4] TORGE, W.; MÜLLER, J. **Geodesy**. 4 ed. Berlin; Boston: De Gruyter, 2012.

[5] NIKOLAIDOU, T. *et al.* **Development and validation of comprehensive closed formulas for atmospheric delay and altimetry correction in ground-based GNSS-R**. 2021. preprint. DOI: 10.36227/techrxiv.14345153.v1.

[6] ALMEIDA JUNIOR, V. H. **Efeito da curvatura terrestre na Refletometria GNSS**. 2021. 150 f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

[7] ROUSSEL, N. *et al.* Simulations of direct and reflected wave trajectories for ground-based GNSS-R experiments. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 5, p. 2261–2279, 2014.

[8] LARSON, K. M. *et al.* The Accidental Tide Gauge: A GPS Reflection Case Study From Kachemak Bay, Alaska. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 10, n. 5, p. 1200–1204, 2013.

[9] TABIBI, S.; SAUVEUR, R.; GUERRIER, K.; METAYER, G.; FRANCIS, O. SNR-Based GNSS-R for Coastal Sea-Level Altimetry, **Geosciences**, v. 11, n. 9, 2021.

[10] NIEVINSKI, F. G.; SANTOS, M. C. Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS. **Geomatica**, p. 18, 2010.

[11] FUJIMURA, M. *et al.* The Ptolemy–Alhazen Problem and Spherical Mirror Reflection. **Computational Methods and Function Theory**, v. 19, n. 1, p. 135–155, 2019.

[12] ALMEIDA JUNIOR, V. H.; GEREMIA-NIEVINSKI, F. Computation of specular reflections on a sphere: Assessment and validation based on the spherical horizon. **Submetido à publicação**.

[13] PUGH, D.; WOODWORTH, P. **Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea level changes**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.