



REFLETOMETRIA POR SATÉLITES GPS/GNSS: ESTUDO INICIAL DE UMA MATRIZ VERTICAL DE SENSORES

Maurício Kenji Yamawaki^a; Felipe Geremia Nievinski^a

[a] Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS.

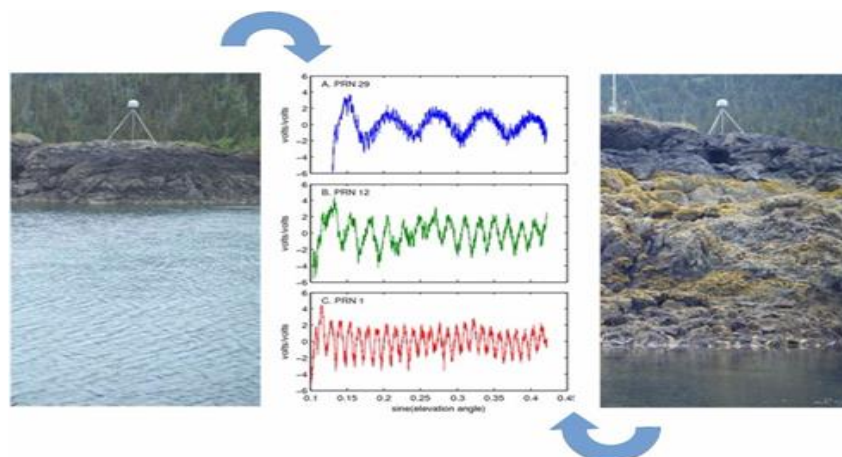
Resumo: A aplicação da refletometria via satélites GPS e de outros GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*, GNSS-R) é um método de sensoriamento remoto que pode ser aplicado à altimetria do nível do mar. Entretanto, GNSS-R sofre de baixa taxa de amostragem (cerca de 1h), pois depende do movimento dos satélites no céu. No presente estudo exploramos o movimento proposital da altura do sensor para acelerar medições altimétricas via GNSS-R. Para verificação do método, foi realizado um experimento de campo, incluindo validação independente por levantamento topográfico. Foi possível obter valores de altura com consistência decimétrica para dois satélites GLONASS. Este método está em desenvolvimento, e planeja-se realizar levantamentos futuros com condições mais favoráveis e com sensores mais eficientes.

Palavras-chave: satélites, GPS, GNSS, refletometria.

1. INTRODUÇÃO

Medições do nível do mar são essenciais para estudos climáticos. Infelizmente, as estações maregráficas não são numerosas no hemisfério sul da Terra. O sensoriamento remoto desponta como uma alternativa. Em alto-mar, são usados satélites altímetros, tais como a série franco-americana TOPEX/POSEIDON. Já na região costeira, a Refletometria via GPS e outros GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*, GNSS-R) é um método eficiente de medição do nível do mar (ZAVOROTNY et al., 2014). Infelizmente, um dos pontos fracos da GNSS-R é o tempo necessário para obtenção de resultados, que pode levar algumas horas, dependendo de como os satélites nascem e se põem no céu. Para aumentar a quantidade de observações diárias pode ser usado mais de um satélite e mais de uma constelação (GLONASS, GALILEO, BEIDOU, etc.).

Figura 1. Interferência construtiva e destrutiva. Retirado de Larson et. al. (2013)



Em estudos anteriores (RIBOT et al., 2014), foi demonstrado que introduzindo uma variação artificial de altura da antena GNSS, é possível acelerar a obtenção da altura de uma superfície refletida com precisão centimétrica em um período de observação de 10 minutos (Fig. 2). A proposta deste trabalho é uma extensão do método acima, envolvendo um único sensor deslocado verticalmente de forma oscilante (Fig. 3).

Figura 2. Aplicação do GNSS-R em uma antena móvel. Retirado de: Ribot et al. (2014).

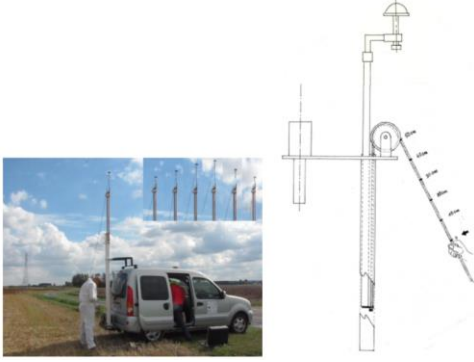
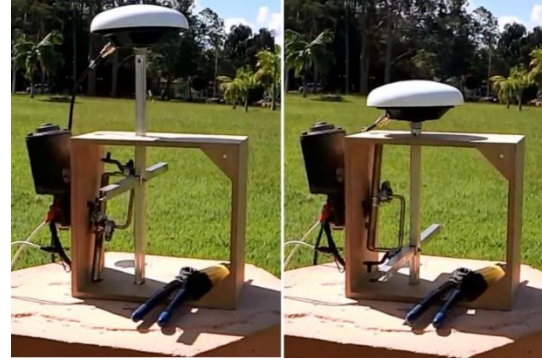


Figura 3. Dispositivo de deslocamento vertical da antena.



2. METODOLOGIA

2.1 Modelo direto

Tradicionalmente (NIEVINSKI e LARSON, 2014), GNSS-R baseado em observações da razão sinal/ruído (SNR) envolve primeiramente a remoção da tendência do dado SNR bruto, através de um polinômio de ordem baixa (2 ou 3). Então ao resíduo $dSNR$ é ajustada a uma senóide da forma:

$$dSNR = A \cos(\phi) \quad (1)$$

Envolvendo a amplitude de oscilação do SNR (A) e a fase interferométrica $\phi = \phi_r - \phi_d$, que é a diferença entre a fase refletida na superfície (por exemplo, do mar) e a fase direta propagada pela linha de visada entre satélite e receptor. Continuando com o modelo padrão, uma superfície plana refletida produz a seguinte fase:

$$\phi = Hk_z + \phi_0 \quad (2)$$

onde H é a altura da antena acima da superfície, tipicamente desconhecida (por causa das marés); já $k_z = 4\pi\lambda^{-1}\sin(e)$ é chamado de comprimento de onda vertical; e ϕ_0 é um deslocamento de fase inicial arbitrário.

No método proposto, é introduzido um termo de variação artificial de fase φ :

$$\phi = Hk_z + \phi_0 + \varphi \quad (3)$$

Este novo termo é calibrado de forma precisa, baseado na construção da matriz vertical linear de sensores. Aqui é assumido que o a matriz resulta em um padrão senoidal com o tempo, produzido mecanicamente por um motor acoplado a um sistema que permite transformação de movimento angular em linear:

$$\varphi = A_D k_z \cos(2\pi f t + \varphi_0) \quad (4)$$

A amplitude de oscilação da fase $A_\varphi = A_D k_z$ segue a amplitude do deslocamento A_D projetado na geometria da observação definida pelo ângulo de elevação e do satélite – para um satélite à zênite, a projeção é apenas a viagem de ida e volta entre a antena e a superfície, convertida de metros em radianos; já para um satélite no horizonte, a amplitude de fase será zero A_φ , significando que o deslocamento vertical não é eficiente para estas direções. A frequência de varredura f é dada pelo motor empregado no mecanismo. Finalmente, φ_0 é uma nova constante arbitrária relacionada à posição do motor quando os dados começaram a ser armazenados.

O novo termo de fase cria uma oscilação de alta frequência forçada na medição do SNR:

$$dSNR = m + A \cos(Hk_z + \phi_0 + A_\varphi \cos(2\pi ft + \varphi_0)) \quad (5)$$

A frequência do motor é alta o suficiente para permitir considerar um único ângulo de elevação de satélite, assim permitindo estimar a soma $\phi'_0 = Hk_z + \phi_0$ como um novo deslocamento de fase agregado para cada ciclo de varredura do motor.

2.2 Modelo inverso

O modo inverso há diversos elementos, agrupados em três partes, devido à forma como são conhecidos. Primeiramente, os seguintes elementos da equação são conhecidos previamente e compõem a variável independente, comprimento de onda vertical (k_z):

- tempo (t), registrado na caderneta eletrônica GNSS em formato RINEX;
- ângulo de elevação dos satélites (e), calculado a partir das efemérides orbitais
- comprimento de onda da portadora (λ), uma constante

Em segundo lugar, alguns elementos da equação são fixos, devido à fabricação do mecanismo; seus valores são estimados através do pós-processamento da posição da antena receptora, com relação à uma estação base:

- amplitude de varredura (A_D);
- frequência de varredura (f);

Em terceiro lugar, parte dos elementos necessários para a solução da altura são incógnitas livres, estimadas através de ajustamento não-linear da curva dada pela eq. 5 às medições em campo:

- valor médio do dSNR (m);
- amplitude do dSNR (A);
- fase inicial de varredura (φ_0);
- fase inicial de reflexão (ϕ_0)
- altura combinada (H).

Na prática, mantemos a altura em um valor nominal próximo do verdadeiro $H_0 \approx H$ e introduzimos uma correção $\Delta H = H - H_0$, a qual é combinada com a fase inicial ϕ_0 para criar uma correção de fase $\Delta\phi$:

$$\Delta\phi = \phi_0 + \Delta H k_z$$

Após realizar o referido ajustamento em diversos ciclos sucessivos do SNR, é obtido uma série de valores independente de correção de fase, $\Delta\phi^j$, para $j = 1, 2, 3, \dots$. Finalmente, a correção da altura refletida pode ser recuperada a partir desta série (assumindo um satélite em movimento no céu). A princípio, tal recuperação seria possível via derivada numérica:

$$\Delta H = \partial \Delta \phi / \partial k_z \quad (6)$$

Entretanto, devido ao ruído, uma solução mais robusta é obtida via regressão linear simples:

$$\Delta \phi^j = \Delta H \cdot k_z^j + \phi_{00} \quad (7)$$

Nesta equação, ΔH representa a inclinação da reta e ϕ_{00} é o intercepto da regressão.

3. EXPERIMENTO

O experimento foi realizado no campus da Universidade Estadual Paulista (UNESP), localizado em Presidente Prudente (SP). Para melhor visibilidade dos satélites (Fig. 4), o rastreio foi realizado em uma área descampada, com relativamente pouca cobertura do horizonte (causada pela vegetação e as edificações). Para validação do resultado. Além do rastreio com receptor GNSS, foi realizado levantamento topográfico do terreno no entorno do sensor (Fig. 5), permitindo comparação entre os dois levantamentos distintos.

Figura 4. Gráfico do céu no local do experimento.

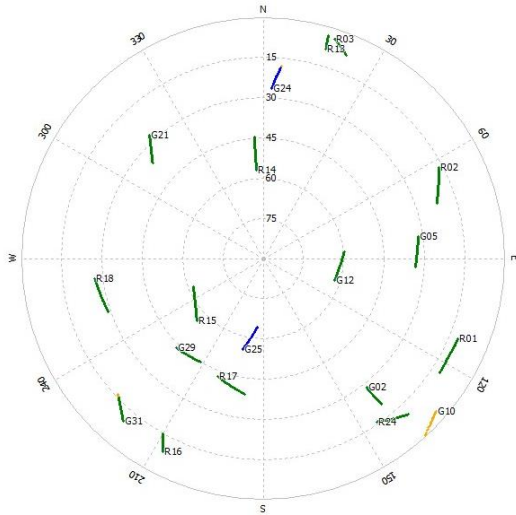


Figura 5. Levantamento topográfico de validação.



Para determinação dos valores da oscilação do sensor refletométrico, foi calculado o posicionamento cinemático da antena em pós-processamento com uma base próxima (aproximadamente 290 metros de linha base), veja Figura 6. Com a posição vertical instantânea do sensor refletométrico processado, foi possível definir com precisão a amplitude e frequência da oscilação fornecida pelo motor à antena.

Figura 6. Localização do par de receptores GNSS utilizados.

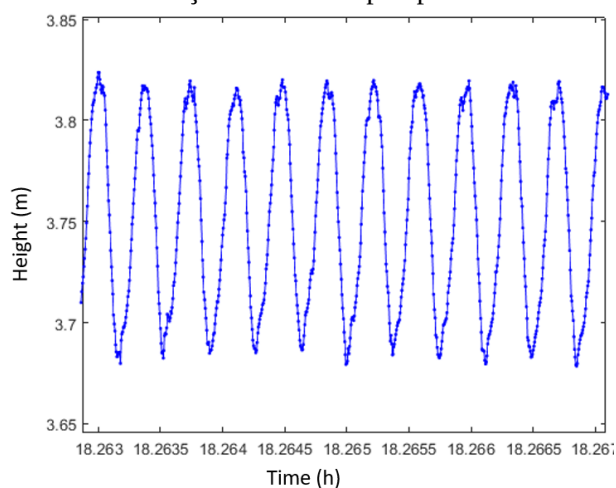


4. RESULTADOS

4.1 Resultados do posicionamento

Ao processar o posicionamento do sensor utilizado para refletometria através de posicionamento cinemático pós-processado, foi obtida a posição vertical do sensor em função do tempo (Fig. 7). Através de transformada de Fourier, os valores de frequência e amplitude de varredura encontrados foram, respectivamente, 0,752 Hz e 6,532 cm. Esses valores foram inseridos no ajuste não linear para solucionar as demais incógnitas.

Figura 7. Trecho da solução vertical do pós-processamento do sensor.



4.2 Resultados da refletometria

O SNR do rastreo apresentou elemento de frequência causado pela oscilação de varredura do mecanismo (Fig. 5). Para obtenção da altura do sensor em relação à superfície refletida, foi realizado ajuste

não linear de uma função na forma da equação (1), solucionando todos os seus elementos não calibrados, resultando em uma curva ajustada ao SNR de entrada (Fig. 8).

Figura 8. SNR de entrada (azul); curva ajustada (vermelho); zoom à direita.

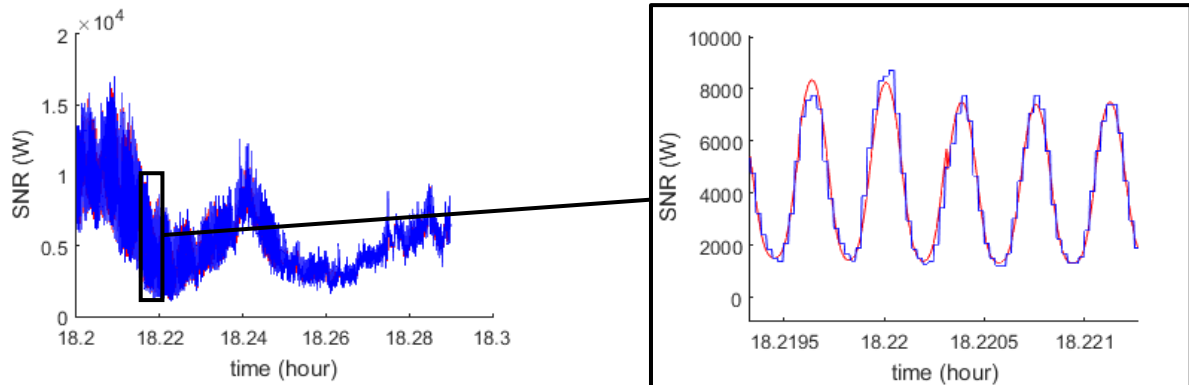
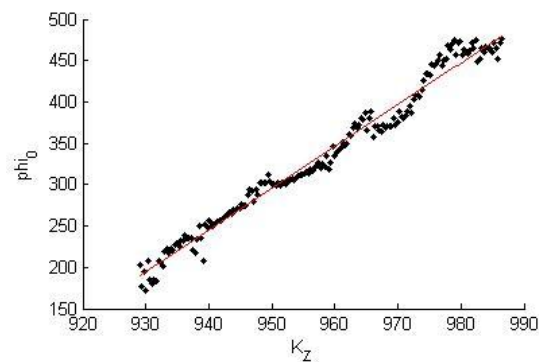


Figura 9. Correção de fase $\Delta\phi$ pelo número de onda k_z obtidos pela varredura (pontos pretos); regressão linear (linha vermelha)



Com os valores de ϕ obtidos através do ajuste não linear, foi possível obter o ΔH do sensor como descrito na eq. 7. Devido ao curto tempo de rastreamento e obstáculos para o sinal dos satélites, foi possível apenas recuperar alturas para os satélites 02 e 24 da constelação GLONASS. Como pode ser observado na Tabela 1, os resultados obtidos apresentam uma diferença na ordem de 10 cm da medição topográfica; esta diferença pode ser devida ao erro causado pelas propriedades do material refletido ou ao erro de refração atmosférica, que não foram considerados para este experimento.

Tabela 1. Resultados obtidos para altura do terreno.

Satélite	Refletometria (m)	Topografia (m)	Diferença (m)
R 02	1,335	1,412	-0,077
R 24	1,455	1,570	-0,115

5. CONCLUSÕES

Apresentamos um método para acelerar a medição de altura via refletometria GNSS, visando a aumentar a resolução temporal de séries do nível do mar. Realizamos um experimento em campo, onde foi possível obter resultados consistentes (decimétrica) para dois satélites observados. Para trabalhos futuros, espera-se aplicar esta técnica em ambiente de melhor visibilidade do céu e maior tempo de rastreamento.

6. REFERÊNCIAS

- Nievinski, Felipe G., e Kristine M. Larson. "Forward Modeling of GPS Multipath for Near-Surface Reflectometry and Positioning Applications". *GPS Solutions* 18, nº 2 (april 2014): 309–22. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0331-y>.
- Ribot, Miguel, Jean-Christophe Kucwaj, Cyril Botteron, Serge Reboul, Georges Stienne, Jérôme Leclère, Jean-Bernard Choquel, Pierre-André Farine, e Mohammed Benjelloun. "Normalized GNSS Interference Pattern Technique for Altimetry". *Sensors* 14, nº 6 (11 de junho de 2014): 10234–57. <https://doi.org/10.3390/s140610234>.
- Zavorotny, V. U. *et al.*, 2014. Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 8–45.