

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

MAURÍCIO KENJI YAMAWAKI

**REFLETOMETRIA GNSS PARA MEDIÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA:
MELHORIA DA RESOLUÇÃO TEMPORAL COM UMA MATRIZ VERTICAL DE
SENSORES**

PORTO ALEGRE

2021

CIP - Catalogação na Publicação

Yamawaki, Maurício Kenji
REFLETOMETRIA GNSS PARA MEDIÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA:
MELHORIA DA RESOLUÇÃO TEMPORAL COM UMA MATRIZ VERTICAL
DE SENSORES / Maurício Kenji Yamawaki. -- 2021.
48 f.
Orientador: Felipe Geremia Nievinski.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2021.

1. GNSS. 2. Refletometria GNSS. 3. Maregrafia. I.
Geremia Nievinski, Felipe, orient. II. Título.

MAURÍCIO KENJI YAMAWAKI

**REFLETOMETRIA GNSS PARA MEDIÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA:
MELHORIA DA RESOLUÇÃO TEMPORAL COM UMA MATRIZ VERTICAL DE
SENSORES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Geremia Nievinski

PORTO ALEGRE

2021

Maurício Kenji Yamawaki

**REFLETOMETRIA GNSS PARA MEDIÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA:
MELHORIA DA RESOLUÇÃO TEMPORAL COM UMA MATRIZ VERTICAL DE
SENSORES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ivandro Klein

Prof. Dr. Reginaldo Macedonio da Silva

PORTO ALEGRE

2021

RESUMO

O Brasil é um país com grande vulnerabilidade à elevação do nível médio do mar e eventos extremos como ressacas. Essa situação é agravada pela pobre distribuição geográfica dos marégrafos com longos períodos de observação e com controle vertical via nivelamento. Os métodos de medição altimétrica via refletometria por GNSS (*Global Navigation Satellite System Reflectometry* – GNSS-R) surgiram como uma opção promissora para monitoramento do nível do mar. Em certas aplicações de GNSS-R, é possível empregar receptores GNSS comerciais, utilizando a razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio* – *SNR*), que é uma observável proporcional à potência da recepção GNSS. Uma das maiores fraquezas da maregrafia via GNSS-R é a baixa resolução temporal e a necessidade de observações longas, em média levando em torno de 1 hora, para cada estimativa altimétrica. Com objetivo de melhorar a resolução temporal da medida altimétrica via GNSS-R de forma automatizada, este estudo propõe a adição de movimento vertical mecânico de frequência na ordem de 1 Hz à antena. A nova função do SNR, alterada pelo movimento mecânico, pode ser ajustada em intervalos de tempo na ordem do período da oscilação da antena. Para realização de prova de conceito e avaliação da performance desta metodologia, foram realizados dois experimentos de campo. No primeiro experimento foi possível recuperar alturas do solo em intervalo de observação de 5 minutos de duração, apresentando erro na ordem de 10 cm. Já no segundo experimento, com 6 horas de duração e nível d'água como alvo, foi possível recuperar altura instantânea e avaliar seu comportamento ao longo do tempo. Analisando os resultados, foi notado que a altura instantânea apresentou uma oscilação em volta de sua média. Embora este comportamento tenha degradado seu valor em curtos intervalos de tempo, ao extrair sua média, em intervalos que continham ciclos completos desta oscilação, foi possível recuperar alturas confiáveis, apresentando erro na ordem de 7 cm. Também foram realizadas simulações com o objetivo de investigar as limitações fundamentais da técnica proposta e prever o comportamento esperado do dispositivo nas condições dos experimentos. Conclui-se que o método proposto possibilita o aumento da resolução temporal do monitoramento de altura de superfície d'água via GNSS-R. Com este aumento de resolução é possível acompanhar componentes de maré mais variáveis, como a maré meteorológica.

Palavras-chave: GNSS, Refletometria GNSS, MAREGRAFIA

ABSTRACT

Brazil is a country with great vulnerability to sea level rise and extreme events such as storms. This situation is aggravated by the poor geographic distribution of the tide gauges with long observation periods and with vertical control via levelling. The sea level measurement methods via Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS-R) have emerged as a promising option for sea level monitoring. In certain GNSS-R applications, it is possible to employ commercial GNSS receivers, using the signal-to-noise ratio (SNR), which is an observable proportional to the power of GNSS reception. One of the biggest weaknesses of GNSS-R maregraphy is the low temporal resolution and the need for long observations, on average taking around 1 hour, for each altimetric estimate. In order to improve the temporal resolution of the altimetric measurement via GNSS-R in an automated way, this study proposes the addition of mechanical vertical movement of frequency in the order of 1 Hz to the antenna. The new SNR function, altered by mechanical movement, can be adjusted in time intervals in the order of the period of antenna oscillation. To carry out a proof of concept and performance evaluation of this methodology, two field experiments were carried out. In the first experiment, it was possible to recover ground height within an observation interval of 5 minutes, with an error of around 10 cm. In the second experiment, with 6 hours of duration and water level as the target, it was possible to recover instantaneous height and evaluate its behavior over time. By analyzing its results, it was noticed that the instantaneous height oscillated around its mean value. Although this behavior has degraded its value in short time intervals, when extracting its average, in intervals that contained complete cycles of this oscillation, it was possible to obtain reliable height values, within 7 cm of error. After carrying out the experiments, it was concluded that the proposed method enables the increase in the temporal resolution of the monitoring of water surface height via GNSS-R. With this resolution increase it is possible to track more tidal components compared to GNSS-R with static sensor.

Keywords: GNSS, GNSS-REFLECTOMETRY, MAREGRAPHY.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa da mudança do nível médio do mar	8
Figura 2 - Ressaca invadindo região costeira	9
Figura 3 - Ilustração do sinal GNSS direto e refletido em superfície marítima.	9
Figura 4 - Aplicação da refletometria com antena móvel	11
Figura 5 – Constelação de satélites GPS, distribuídos em seis planos (círculos azuis), em torno da terra.....	15
Figura 6 – Reflexão de sinal GNSS na superfície terrestre registradas por receptor em órbita baixa.....	16
Figura 7 - Geometria do sinal direto e refletido.	17
Figura 8 – Multicaminho em GNSS-MR	18
Figura 9 – Interferência construtiva e destrutiva.....	18
Figura 10 – Padrão do SNR em antenas de diferentes alturas com relação à superfície.....	20
Figura 11- Análise espectral do SNR.	20
Figura 12 – Experimentos de campo pontuais.	24
Figura 13 – Simulação da recuperação de altura instantânea em diferentes erros de amplitude de varredura.....	38
Figura 14 – Erro médio quadrático da altura instantânea em diferentes erros de amplitude de varredura.....	38
Figura 15 – Simulação da recuperação de altura instantânea em diferentes erros de período de varredura.	39
Figura 16 – Erro da elevação aparente causada pela refração atmosférica.	40
Figura 17 – Simulação da recuperação de altura instantânea em diferentes erros de elevação de satélite.	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	Proposição.....	12
1.2	Estrutura da dissertação.....	13
1.2.1	Primeiro artigo	13
1.2.2	Segundo artigo	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS).....	15
2.2	Refletometria GNSS (GNSS-R).....	16
2.3	Refletometria por multicaminho GNSS (GNSS-MR).....	17
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	Modelo direto.....	21
3.2	Ajuste do SNR	22
3.3	Recuperação de altura da antena	22
3.4	Dispositivo eletromecânico	23
3.5	Testes metodológicos.....	23
4	<i>HIGH-RATE ALTIMETRY IN SNR-BASED GNSS-R: PROOF-OF-CONCEPT OF A SYNTHETIC VERTICAL ARRAY.....</i>	<i>25</i>
5	<i>FIRST WATER LEVEL RESULTS OF A SYNTHETIC GNSS-R VERTICAL ARRAY.....</i>	<i>31</i>
6	SIMULAÇÕES.....	37
6.1	Erro em amplitude de varredura	37
6.2	Erro em período de varredura	38
6.3	Erro de elevação do satélite	39
7	CONCLUSÃO	41
7.1	Trabalhos futuros e observações sobre a metodologia	42

1 INTRODUÇÃO

Estudos das mudanças climáticas apontam para um inequívoco aumento do nível médio dos mares (NMM) globalmente (CHURCH *et al.*, 2013). Porém, a variação regional do NMM pode ser maior ou menor do que o valor integrado global, como apresentado na Figura 1. Estas variações são ainda mais nocivas quando por exemplo o fenômeno das ressacas que chegam a costa e fazem com que a água do mar sofra um "empilhamento" e invadam a beira-mar. No sul do Brasil, este evento ocorre devido à passagem das frentes frias, que podem ocasionar uma agitação acentuada na água do mar. Infelizmente este fenômeno está ocorrendo cada vez com maior frequência e violência, estando associado ao aumento do nível dos mares, causando enormes prejuízos tanto materiais como perda de vidas (Figura 2). Se por um lado somente temos dados de níveis dos oceanos globais e por outro temos dificuldades de capacidade de modelagem destes dados, acabamos com grandes incertezas regionais relacionadas ao NMM. O risco que cada cidade costeira brasileira é exposta seria mais bem determinado se tivéssemos mais marégrafos ao longo da costa (MARENGO *et al.*, 2016).



Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013

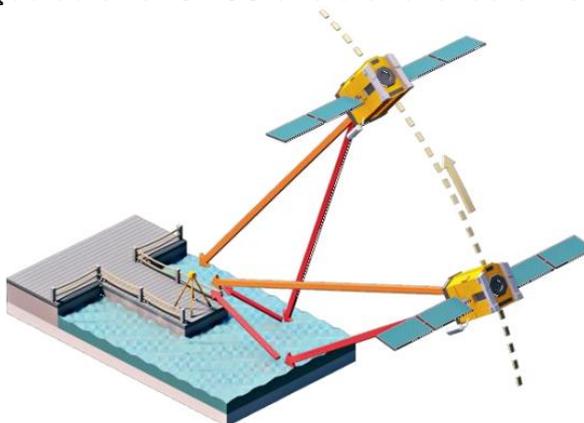
Figura 2 - Ressaca invadindo região costeira



Fonte: Globo.com, 2011

As soluções de monitoramento maregráfico que empregam o uso do Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System - GNSS*) estão se tornando mais atraentes com a crescente evolução das constelações GNSS. Em especial Refletometria por GNSS (*GNSS-R*) é uma técnica de sensoriamento remoto que explora as ondas de rádio transmitidas por satélites GNSS e suas subseqüentes reflexões fortuitas em superfícies naturais, como o mar. O uso da interferência, resultante do multicaminho do sinal dos satélites GNSS, como ilustrado na Figura 3, já é um método bem estabelecido para medição de altitude de superfícies refletidas.

Figura 3 - Ilustração do sinal GNSS direto e refletido em superfície marítima.



Fonte: Silveira (2014)

GNSS-R foi proposto primeiramente através do *Passive Reflectometry Interferometric System (PARIS)* (MARTIN-NEIRA, 1993), projetado como uma técnica

de radar biestático por sensoriamento remoto para altimetria oceânica usando a banda L1 do sinal GPS. Desde então vem sendo aplicado para diversas formas de levantamento, como monitoramento de maré e determinação de cobertura de neve. O conceito das medições via GNSS-R toma vantagem do crescente número de satélite (previsto para alcançar 120, totalizando os novos sistemas europeu e chinês, além dos sistemas já existentes, americano e russo), além de ser um método eficiente e de baixo custo, possibilitando alta distribuição de medidas e rápida revisita em qualquer condição climática (MARTIN-NEIRA, 1993). Porém, em alguns casos, esta medida é passível de degradação dependendo dos elementos que possam interferir no sinal GNSS.

No caso da Refletometria por Multicaminho GNSS (GNSS-MR) que, diferente do GNSS-R onde tipicamente é realizada a leitura do sinal refletido e direto separadamente, utiliza sinal refletido e direto de forma combinada (WILLIAMS; NIEVINSKI, 2017). Para aplicação de GNSS-MR não há necessidade de sensor especializado, possibilitando o uso de sensores de baixo custo, tornando esta metodologia mais acessível. A medição de altura de superfícies via GNSS-MR é realizada através de sinal inclinado em relação à superfície refletida, o que permite a recuperação de altura de superfícies afastadas do sensor. De acordo com Anderson (2000), GNSS-MR apresenta bom desempenho para medição do nível do mar com satélites em baixos ângulos de elevação. Isto se deve a característica específica do GNSS-MR, que utiliza apenas uma antena para detecção de multicaminho a partir da variação da potência do sinal ao longo do tempo. Metodologia diferente do GNSS-R tradicional, que utiliza um par de antenas, uma detectando sinal direto e outra o sinal refletido, que para satélites em baixos ângulos de elevação apresentam polarização e direções de chegada similares. Isto significa que GNSS-MR permite o monitoramento do nível do mar a partir de sensores instalados na costa e afastados do corpo d'água. Esta opção de posicionamento de sensor pode permitir grande economia e versatilidade com a instalação de dispositivos, visto que o monitoramento via GNSS-MR, diferente de mareógrafos por RADAR e réguas linimétricas, não necessita estruturas estáveis sobre a água para operação do dispositivo.

No estudo realizado por Fagundes et al. (2021), foi demonstrada com equipamentos alternativos (de baixo custo), a possibilidade de se recuperar altura da superfície de corpos d'água através de GNSS-MR. Atualmente existem 3 estações mareográficas operando com esta tecnologia nos municípios de Balneário Rincão,

Imbituba e Porto Alegre. Uma limitação atual é a baixa resolução temporal, que se deve ao método de identificação da influência do sinal refletido no multicaminho, que ocorre através da análise da potência do sinal associada ao movimento dos satélites no céu, que pode levar cerca de meia hora por medida para sensores em plataformas terrestres (mais detalhes na sessão 2.3). Esta latência temporal acaba impossibilitando o uso desta tecnologia para aplicações que dependem do fornecimento dos dados em tempo real, como exemplo dos alarmes para enchentes. Porém isto não invalida sua necessidade, pois grande parte das aplicações dos dados de monitoramento de corpos d'água não necessitam de seu fornecimento em tempo real, como exemplo das modelagens e séries históricas. Outros autores (RIBOT *et al.*, 2014), demonstraram que a movimentação vertical de uma antena pode possibilitar o aumento da resolução temporal de monitoramentos de altura de superfícies via GNSS-R (Figura 4). Em outro estudo (PEPPA; PSIMOULIS; MENG, 2019), analisando a potência do sinal, foi possível recuperar a frequência de vibração de uma antena GNSS. Já no posicionamento GNSS, é possível mitigar o multicaminho, submetendo a antena GNSS em movimento de alta frequência (ERTAN *et al.*, 2013; PANY; EISSFELLER, 2008; VAN DEN BREKEL; VAN NEE, 1992; WANG; ZHANG, 2018).

Figura 4 - Aplicação da refletometria com antena móvel



Fonte: Ribot *et al.* (2014)

1.1 Proposição

Este estudo tem como objetivo geral melhorar a cobertura de medição maregráfica através da costa brasileira. Ao introduzir novo método de medição refletométrica de baixo custo e de maior eficiência, espera-se facilitar a instalação de novos pontos de monitoramento do nível do mar. A melhor distribuição de maregrafos pode proporcionar dados para planejamento de medidas de mitigação e prevenção de desastres naturais causados por eventos extremos de maré em cidades costeiras.

Nota-se que soluções baseadas em GNSS-MR são promissoras para densificação de pontos de monitoramento de maré. Portanto, da mesma forma que Ribot *et al.* (2014), neste estudo pretende-se aplicar GNSS-MR em uma antena submetida a uma oscilação vertical (varredura vertical). Neste caso, a proposta envolve realizar esta varredura de forma automatizada, com amplitude e frequência conhecidas e constantes. A adição de movimento à antena, combinada à processamento dos dados posteriores, pode permitir aumento da resolução temporal do monitoramento da altura de superfícies d'água através do GNSS-R. Isso se deve à adição de elemento de alta frequência à potência do sinal GNSS. O movimento mecânico permite realizar ajustes da função da onda em intervalos proporcionais ao período de varredura da antena. Diferente da solução realizada por Ribot *et al.* (2014), que utilizou a oscilação vertical da antena apenas para obtenção de parâmetros de calibração inicial para recuperação de altura com antena estática. O movimento pode ser tanto mecânico quanto eletrônico, ou seja, pode ser sintetizado a partir da comutação de circuitos associada a um conjunto de antenas em diferentes alturas e verticalmente alinhadas. Esta configuração permite sintetização do movimento vertical através da leitura alternada entre estas antenas. A nossa hipótese é: A taxa de medição pode ser melhorada com uma movimentação vertical automatizada da antena, com frequência e amplitude de oscilação conhecidas.

Como objetivos específicos, foram realizadas diversas etapas para desenvolvimento da solução proposta. Elas se dividiram nas determinações das formulações necessárias para solução da elevação e experimentos de campo com dispositivos desenvolvidos durante o estudo. Mais detalhadamente:

- Avaliar o funcionamento da matriz vertical de sensores para maregrafia de forma teórica

- Avaliar o funcionamento da matriz vertical de sensores em ambiente controlado (Terreno previamente medido).
- Avaliar funcionamento do método em medição de corpos d'água, com rastreamento de duração média (aproximadamente 5 horas)

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação foi produzida na forma de dois artigos científicos, preparados durante o curso de pós-graduação. Os artigos contêm a descrição de dois experimentos realizados, seus resultados e suas conclusões. O primeiro experimento foi uma prova de conceito da metodologia aqui proposta, enquanto o segundo trata-se de uma avaliação mais aprofundada do funcionamento do dispositivo. Devido ao limite rígido para número de páginas impostos pelas revistas escolhidas, os artigos foram produzidos de forma sucinta, sendo 5 páginas o limite do primeiro artigo e 6 páginas para o segundo artigo. O custo para publicação com excesso de páginas também contribuiu para a redução na extensão das publicações.

Para compensar a brevidade dos artigos, incluímos uma seção de Metodologia, normalmente opcional em dissertações no modelo de artigos. Salientamos ainda que neste modelo, a formatação original dos artigos deve ser mantida inalterada, apesar de contrastar com o restante da dissertação.

1.2.1 Primeiro artigo

O primeiro artigo, intitulado “*High-rate altimetry in SNR-based GNSS-R: Proof-of-concept of a synthetic vertical array*”, contém a prova de conceito da metodologia desenvolvida nesta dissertação. Os dados haviam sido coletados anos atrás no campus da Universidade Estadual Paulista (Unesp), mas não haviam sido analisados anteriormente. Os testes tiveram como alvo o solo no entorno do dispositivo. Neste artigo foi possível provar a viabilidade desta metodologia. A recuperação de altura da superfície medida foi realizada em intervalo de rastreamento de 5 minutos. O artigo foi submetido em 31 de agosto de 2020 e publicado em 6 de abril de 2021 no periódico *IEEE - Geoscience and Remote Sensing Letters* (IEEE - GRSL).

Este artigo é focado no desenvolvimento da metodologia para processamento dos dados obtidos pelo receptor GNSS e os resultados de sua aplicação no experimento realizado. A solução desta metodologia envolve ajuste de função, que

modela o comportamento da potência do sinal de uma antena GNSS em movimento, à observação SNR obtida (mais detalhes no artigo). Com a medição de solo no lugar de corpos d'água, foi possível realizar a comparação da recuperação da elevação do solo via GNSS-R com levantamento topográfico do terreno. O uso de alvo estável (solo) foi essencial para controle dos resultados obtidos para prova de conceito.

1.2.2 Segundo artigo

O segundo artigo, intitulado “*First water level results of a synthetic GNSS-R vertical array*”, contém avaliação aprofundada da metodologia desenvolvida nesta dissertação. O experimento foi realizado em 2020 no Cais Mauá em Porto Alegre, RS. Os testes tiveram como alvo a superfície do Lago Guaíba. Neste artigo foi possível mostrar o comportamento do sensor em maior intervalo de rastreamento e com menos obstrução do horizonte. O rastreamento teve duração aproximada de 6 horas.

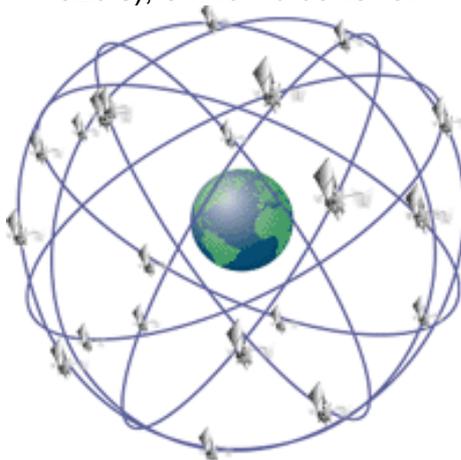
Este artigo tem foco na avaliação do funcionamento do dispositivo em longos períodos de rastreamento. Os dados obtidos foram suficientes para avaliar o funcionamento da metodologia em praticamente toda trajetória dos satélites no céu visível. Com a medição de água no lugar de solo, foi possível observar o funcionamento do dispositivo em alvo mais próximo ao objetivo deste estudo. Neste artigo foi possível realizar a análise do comportamento das variáveis que compõem o modelo matemático desta solução.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS)

NAVSTAR-GPS, ou apenas GPS (*Global Positioning System* - Sistema Global de Posicionamento), como é mais comumente conhecido, é uma instância de Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (MONICO, 2007). Outros GNSS incluem o sistema russo (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* - GLONASS), europeia (GALILEO) e chinesa (BEIDOU). O objetivo inicial do GPS era a determinação instantânea de posição, velocidade e tempo de um usuário em qualquer lugar da Terra ou próximo a esta (MONICO, 2007).

Figura 5 – Constelação de satélites GPS, distribuídos em seis planos (círculos azuis), em torno da terra.



Fonte: *Federal Aviation Administration (FAA)* (2021)

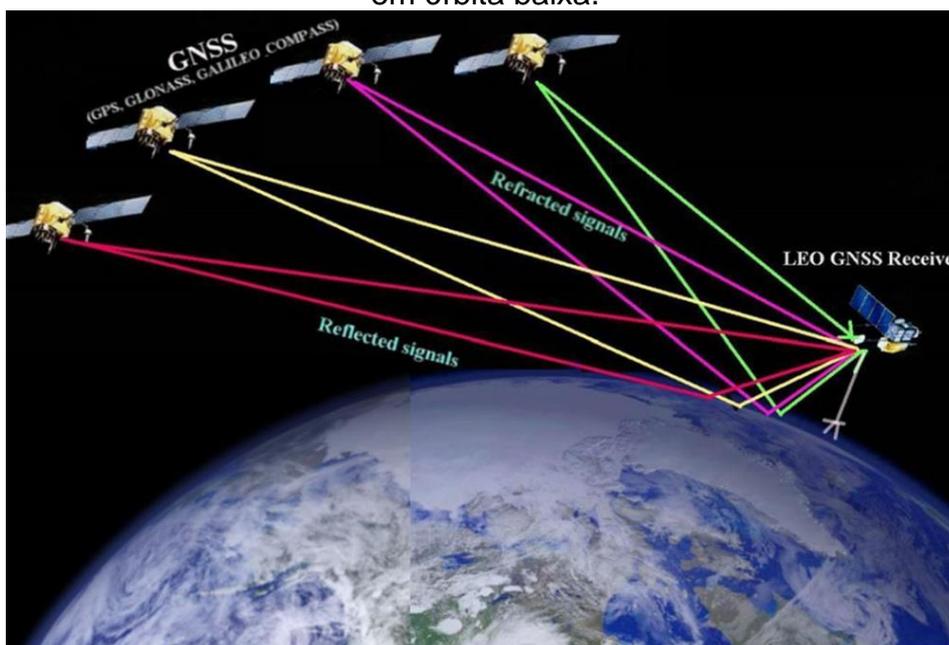
O segmento espacial do GPS consta de no mínimo 24 satélites de média órbita (aproximadamente 20.200 km), distribuídos de maneira que seja possível observar no mínimo quatro satélites em qualquer ponto da terra em qualquer momento (Figura 5). O sinal transmitido pelos satélites GPS tem três ondas portadoras: L1, L2 e L5, com frequências de 1575,42 MHz, 1227,60 MHz e 1176,45 MHz respectivamente. As principais observáveis são: pseudodistância, fase da portadora, Doppler e potência de recepção. A última costuma ser expressa na forma da razão sinal ruído (RSR ou S/R), também conhecida em inglês como *signal-to-noise ratio* (SNR ou S/N).

2.2 Refletometria GNSS (GNSS-R)

Refletometria GNSS (GNSS-R) é uma técnica de sensoriamento remoto, primeiramente concebida por Martin-Neira (1993), que utiliza o sinal GNSS refletido em uma superfície, para análise de diversas propriedades do alvo, alguns exemplos são: altura de superfície d'água, rugosidade, permeabilidade e umidade do solo. A diferença mais importante entre GNSS-R e radar tradicional é que o radar trata-se de um sensor de retroespalhamento monoestático (transmissor e receptor colocalizados), enquanto o GNSS-R representa um radar biestático, onde o receptor e o emissor estão separados a uma distância significativa (ZAVOROTNY *et al.*, 2014). Além disso, trata-se de um modo de sensoriamento remoto oportunístico ou parasítico, pois explora transmissões artificiais já existentes do crescente número de satélites transmissores GNSS. Eles cobrem a superfície terrestre, fornece radiação constante para aplicação do GNSS-R com cada vez maior cobertura temporal.

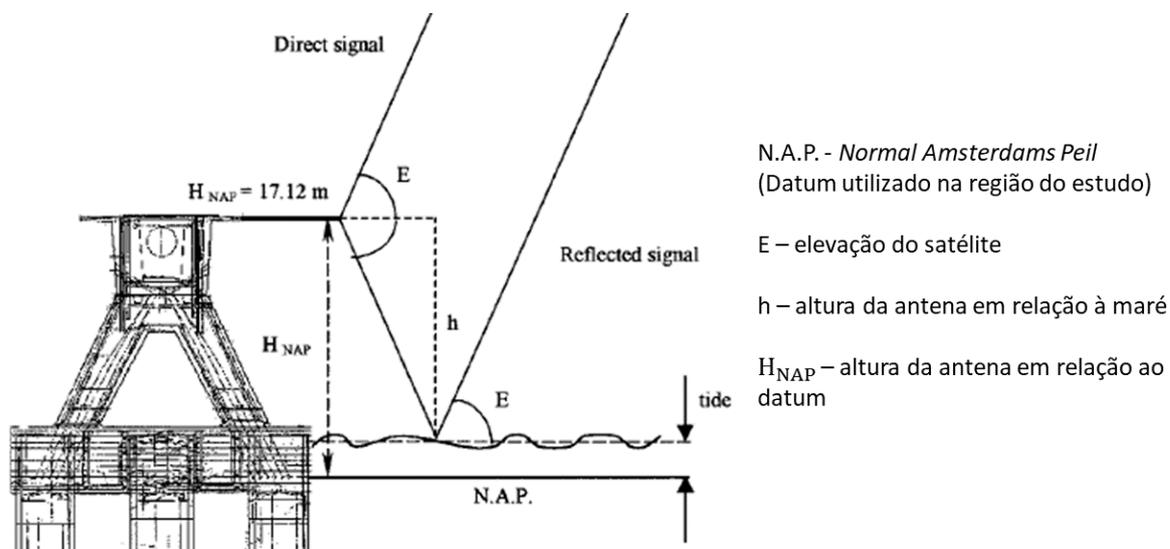
GNSS-R é bastante versátil com relação às suas observáveis, alvos geofísicos, plataformas de observação e configuração das antenas receptoras. As plataformas podem ser terrestres, aéreas e orbitais (Figura 6). Neste trabalho, o foco será em plataformas terrestres e observações do tipo SNR aplicados à altimetria do mar (como ilustrado na Figura 7).

Figura 6 – Reflexão de sinal GNSS na superfície terrestre registradas por receptor em órbita baixa.



Fonte: Jin; Feng; Gleason (2011)

Figura 7 - Geometria do sinal direto e refletido.



Fonte: Martin-Neira et al. (2001)

2.3 Refletometria por multicaminho GNSS (GNSS-MR)

Diferente da GNSS-R, que tipicamente realiza leitura do sinal direto e refletido separadamente (com duas antenas), a refletometria por multicaminho GNSS¹ (*GNSS multipath reflectometry* - GNSS-MR) faz uso da leitura combinada do sinal direto e refletido do sinal de rádio (Figura 8) para realização destas medições (WILLIAMS; NIEVINSKI, 2017). Esta metodologia se aproveita da interferência (Figura 9) causada pelo deslocamento de fase entre estes dois sinais de rádio. Uma técnica popular emprega a potência do sinal, também conhecida como razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio* - SNR). A utilização de GNSS-MR baseada em SNR para medição de nível do mar foi primeiramente demonstrada por Anderson (2000). Neste estudo foi utilizada apenas uma antena GNSS para recuperar elevação da superfície do mar. Por utilizar a combinação dos sinais refletido e direto, GNSS-MR possibilita o emprego de receptores GNSS geodésicos convencionais. Diversos grupos de pesquisa demonstraram a viabilidade do uso de instrumentos GNSS geodésicos convencionais para aplicações de GNSS-MR (GEREMIA-NIEVINSKI *et al.*, 2020). O princípio de funcionamento do GNSS-MR baseado em SNR para medição do nível do mar, é descrito por Geremia-Nievinski et al. (2020) da seguinte forma:

¹ O fenômeno de multicaminho também afeta o posicionamento GNSS através das observáveis de pseudodistância e fase da portadora, porém isto está fora do escopo deste trabalho

O princípio de funcionamento do GNSS-MR baseado em SNR é a recepção do sinal de multicaminho, da sobreposição coerente entre as ondas do sinal direto e refletido. Esta sobreposição resulta em interferência construtiva e destrutiva de forma periódica à medida que os dois caminhos (direto e refletido) entram e saem de fase. Altimetria pode ser executada, baseada na oscilação observada à medida que o satélite nasce ou se põe no céu. Esta oscilação exibe frequência proporcional à altura relativa da antena ao nível do mar (GEREMIA-NIEVINSKI et al., 2020).

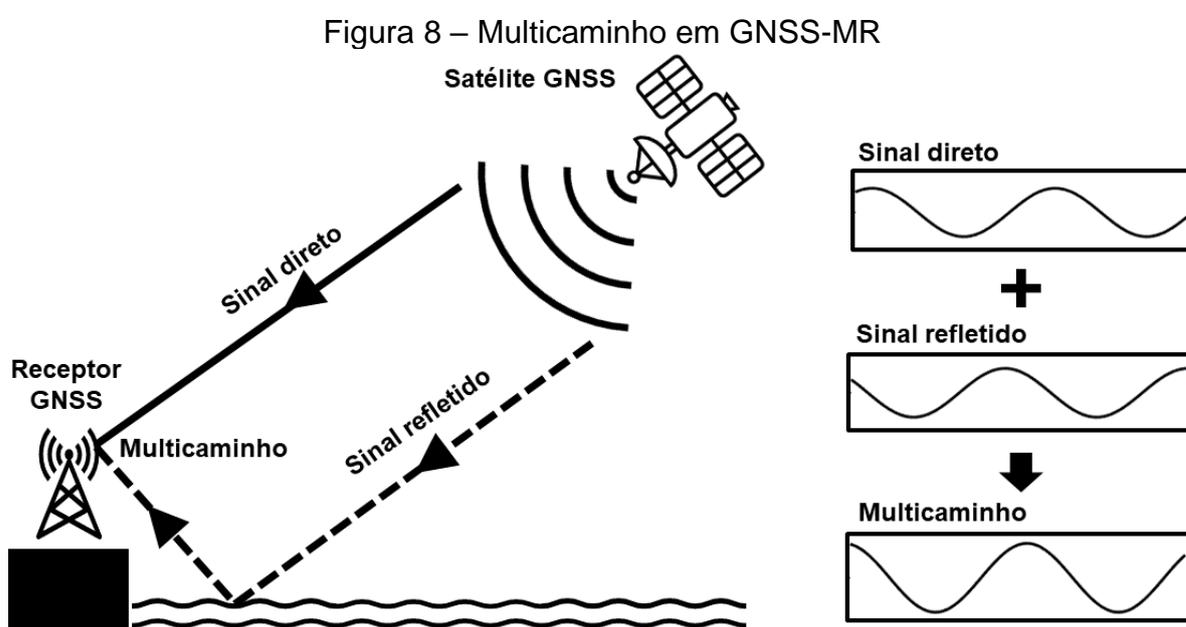
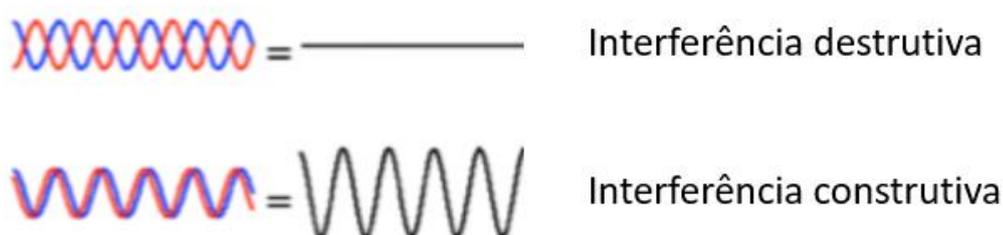


Figura 9 – Interferência construtiva e destrutiva



Fonte: O Autor

A recuperação de altura da antena em relação à superfície refletida, tipicamente (Figura 11) é realizada através de análise espectral do SNR (LARSON; LÖFGREN; HAAS, 2013). Tradicionalmente (NIEVINSKI; LARSON, 2014b), GNSS-R baseado em

observações de SNR $S(t)$ envolve primeiramente a remoção da tendência do dado $\bar{S}(t)$ bruto através de um polinômio de ordem baixa (2 ou 3). Então o resíduo $s(t)$ é ajustado em uma senoide da forma:

$$s(t) = A_S \cos(\phi) \quad (1)$$

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

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

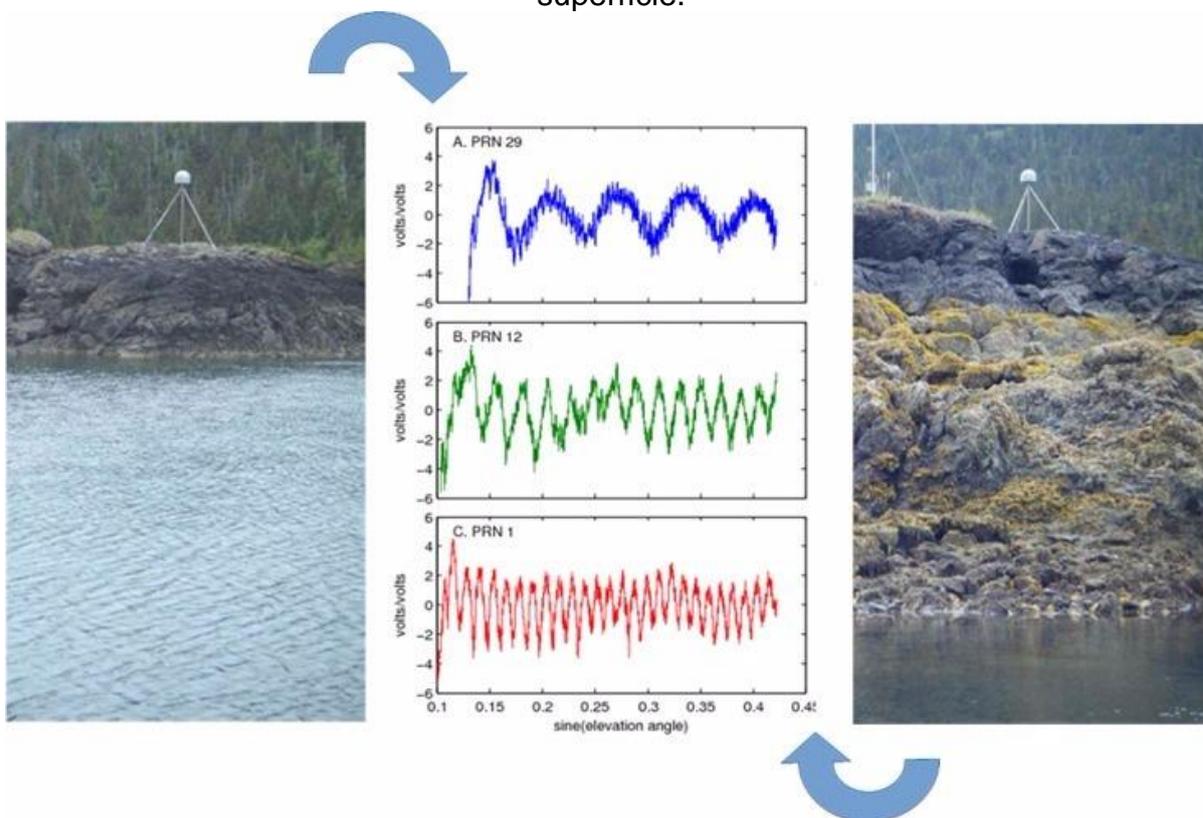
onde H é a altura da antena acima da superfície, tipicamente desconhecida (por causa das marés); já $k_z = 4\pi\lambda^{-1} \sin(e)$ é chamado de comprimento de onda vertical; e ϕ_0 é um deslocamento de fase inicial arbitrário.

Uma forma simplificada de se recuperar altura de uma antena através de GNSS-MR, pode ser realizada através da Equação 3.

$$H = 0,5\lambda \frac{N}{\sin(e_2) - \sin(e_1)} \quad (3)$$

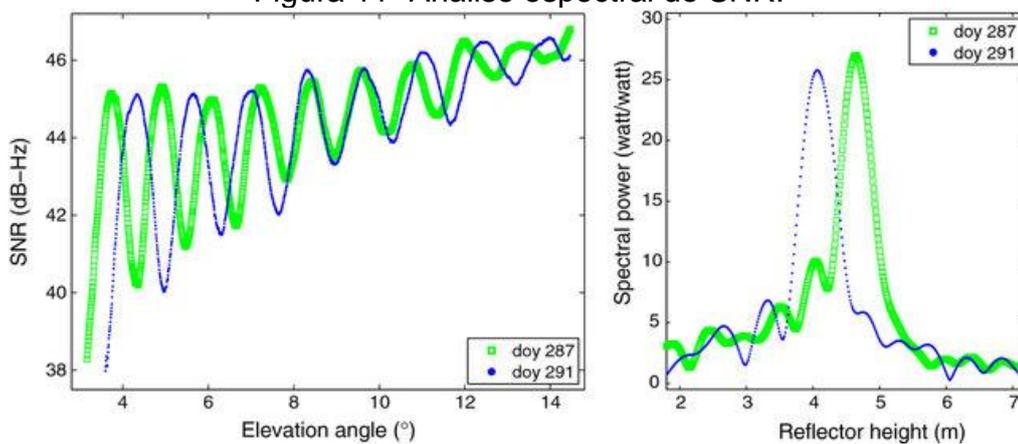
Considerando: H a altura da antena, λ é o comprimento da onda portadora GNSS, e_1 e e_2 são as elevações inicial e final do intervalo de elevação do satélite e N o número de oscilações observadas na potência do sinal no intervalo de elevação de satélite. Quanto mais elevada a antena em relação à superfície refletida, maior será a frequência de oscilação da potência causada pela variação de elevação do satélite. Este comportamento está ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Padrão do SNR em antenas de diferentes alturas com relação à superfície.



Fonte: Adaptado de Larson et al. (2013)

Figura 11- Análise espectral do SNR.



Fonte: Hobiger; Haas; Lofgren, (2016)

3 METODOLOGIA

Nos experimentos realizados, foi acoplado um receptor GNSS em um bastão movido por motor elétrico, que realiza movimento vertical cíclico da antena. A aplicação de GNSS-MR através de uma antena móvel, depende do padrão senoidal do movimento desenvolvido pela varredura. A varredura deve produzir um padrão senoidal ao longo do tempo. Este comportamento é essencial para realização do ajuste dos modelos matemáticos aplicados à potência do sinal em função do tempo. A metodologia divide-se no modelo direto, ajuste do SNR e recuperação de altura da antena. O dispositivo mecânico e as equações descritas neste capítulo foram desenvolvidas durante a produção deste estudo.

3.1 Modelo direto

Para uma antena em movimento, é introduzido um novo termo $\delta\phi(t)$ na equação 2, que representa a contribuição da varredura mecânica na fase do sinal:

$$\phi = Hk_z + \phi_0 + \delta\phi(t) \quad (4)$$

Este novo termo é calibrado de forma precisa, baseado na construção do mecanismo de varredura:

$$\delta\phi(t) = A_\phi \cos(2\pi ft + \varphi_0) \quad (5)$$

A amplitude de oscilação da fase $A_\phi = A_H k_z$ segue a amplitude do deslocamento A_H 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:

$$S(t) = \bar{S} + A_S \cos(Hk_z + \phi_0 + k_z A_H \cos(2\pi ft + \varphi_0)) \quad (6)$$

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.

3.2 Ajuste do SNR

Os elementos presentes na eq. 6 são agrupados em três partes, devido à forma como são conhecidos. Primeiramente, os seguintes elementos da equação são conhecidos previamente e compõem a variável independente, número 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)

Alguns elementos da equação são fixos, seus valores são determinados pela construção do dispositivo mecânico:

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

Parte dos elementos necessários para a solução da altura são incógnitas livres, estimadas através de ajustamento não-linear da curva dada pela eq. 6:

- valor médio do SNR (\bar{S});
- amplitude do SNR (A_S);
- fase inicial de varredura (φ_0);
- fase inicial de reflexão (ϕ_0)
- altura combinada (H).

Os valores das incógnitas livres são obtidos através de ajustamento não linear, que é realizado em diversos ciclos sucessivos de varredura. Foi utilizada a função “lsqnonlin” da plataforma *Matlab*, com critério de tolerância para parada das iterações de 10^{-6} .

3.3 Recuperação de altura da antena

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

$$\Delta\phi = \phi_0 + \Delta H k_z \quad (7)$$

O referido ajustamento é realizado em diversos ciclos sucessivos do SNR, é obtido uma série de valores independentes 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:

$$\Delta H = \partial \Delta \phi / \partial k_z \quad (8)$$

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

$$\Delta \phi^j = \Delta H \cdot k_z^j + \phi_0 \quad (9)$$

Nesta equação, ΔH representa a inclinação da reta e ϕ_0 é o intercepto da regressão.

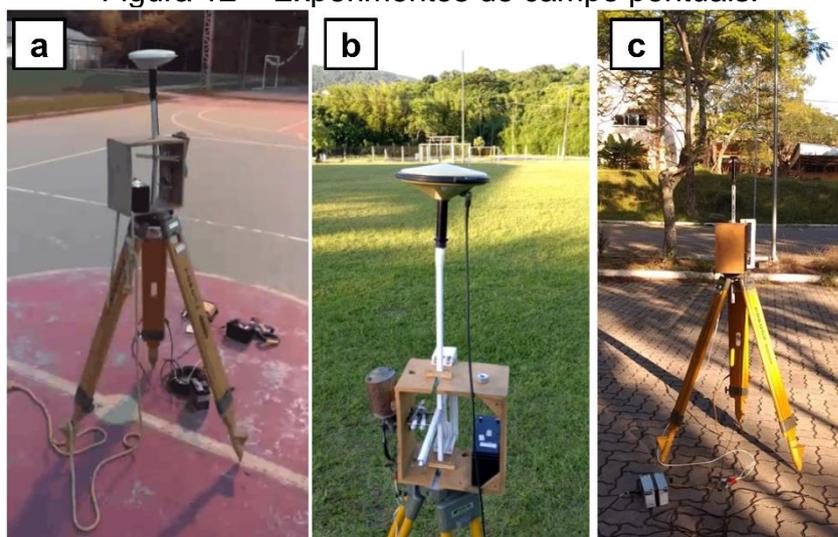
3.4 Dispositivo eletromecânico

O deslocamento vertical senoidal é obtido com um dispositivo eletromecânico *Scotch yoke*, que converte o movimento angular em movimento linear por meio de um mecanismo de elo em fenda. Um motor elétrico de 12 V aciona o sistema mecânico a uma determinada frequência de varredura (f). A amplitude de varredura (A_H) é basicamente o comprimento do braço de alavanca do dispositivo de elo em fenda.

3.5 Testes metodológicos

Além dos experimentos de campo apresentados nos artigos que compõem esta dissertação, foram realizados outros testes com diferentes receptores GNSS e antenas. Durante estes experimentos foi possível identificar as vantagens e desvantagens apresentados pelos sensores utilizados. Além disso, durante esta etapa do desenvolvimento, foram realizadas diversas melhorias no dispositivo mecânico, como lubrificação do elo deslizante, adição de um trilho guia adicional para a haste e a substituição da bateria por uma de maior capacidade. Durante realização destes testes não foi realizada validação com instrumentos independentes, como estação total ou linígrafo. Pode-se observar na Figura 12 alguns testes realizados durante o desenvolvimento deste estudo.

Figura 12 – Experimentos de campo pontuais.



Fonte: O Autor

A Figura 12a ilustra o experimento realizado em junho de 2019. Neste teste foi empregado uma combinação de receptor geodésico TRIMBLE NET RS e uma antena GNSS geodésica. O experimento foi realizado em uma quadra de esportes localizada no Colégio Aplicação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O rastreamento teve duração aproximada de 10 minutos. O dispositivo eletromecânico de varredura foi alimentado por uma bateria estacionária de 12 V. Devido sua baixa capacidade foi observada alta deriva no período de varredura durante o experimento.

A Figura 12b ilustra o experimento realizado em janeiro de 2020. Este teste foi realizado em um campo de futebol, localizado nas dependências do Colégio Aplicação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A duração do rastreamento foi de aproximadamente 1 hora. Foi empregado uma combinação de receptor geodésico e antena geodésica. Para este experimento foram realizadas melhoras no dispositivo eletromecânico de varredura como: Adição de trilho guia lateral para maior estabilidade do movimento e alimentação do motor elétrico através de fonte externa, o que possibilitou operação prolongada do dispositivo sem deriva no período de varredura ao longo do tempo.

A Figura 12c ilustra o experimento realizado em fevereiro de 2020. Este teste foi realizado no estacionamento do campus da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O rastreamento teve duração aproximada de meia hora. Foi empregado um sensor GNSS de navegação, como utilizado por Fagundes *et al.* (2021). Neste experimento foi observada maior influência da varredura vertical na potência do sinal GNSS.

4 HIGH-RATE ALTIMETRY IN SNR-BASED GNSS-R: PROOF-OF-CONCEPT OF A SYNTHETIC VERTICAL ARRAY

© 2021 IEEE. Reprinted, with permission, from M. K. Yamawaki, F. Geremia-Nievinski and J. F. G. Monico, "High-Rate Altimetry in SNR-Based GNSS-R: Proof-of-Concept of a Synthetic Vertical Array," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, doi: 10.1109/LGRS.2021.3068091 (*early access*).

High-rate altimetry in SNR-based GNSS-R: Proof-of-concept of a synthetic vertical array

M. K. Yamawaki¹, F. Geremia-Nievinski², J. F. Galera Monico³

Abstract — Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS-R) has emerged as a promising remote sensing technique for coastal sea level monitoring. The GNSS-R based on signal-to-noise ratio (SNR) observations employs a single antenna and a conventional receiver. It performs best for low elevation satellites, where direct and reflected radio waves are very similar in polarization and direction of arrival. One of the disadvantages of SNR-based GNSS-R for sea level altimetry is its low temporal resolution, which is of the order of one hour for each independent satellite pass. Here we present a proof-of-concept based on a synthetic vertical array. It exploits the mechanical movement of a single antenna at high rate (about 1 Hz). SNR observations can then be fit to a known modulation, of the order of the antenna sweeping rate. We demonstrate that centimetric altimetry precision can be achieved in a 5-minute session.

Index Terms—GNSS; GNSS Reflectometry;

I. INTRODUCTION

Coastal regions are vulnerable to sea level rise and frequent extreme events. For climate change mitigation and adaptation, it is fundamental to monitor sea surface height variations [1]. Unfortunately, conventional tide gauges are not as numerous as necessary. This is because they require a supporting structure very close to the water, which is costly to install and maintain, and not even feasible at more challenging coast lines [2]. Furthermore, tide gauges require geodetic monitoring for vertical land motion control [3].

Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS-R) is a promising alternative for coastal sea level altimetry [4]. One of the pioneering works was [5], who employed signal-to-noise ratio (SNR) observations. It demonstrated the feasibility of measuring sea level via the interference pattern between direct and reflected ray paths. SNR-based GNSS-R has better response at low elevation satellites, where the multiple ray paths have similar polarization and direction of arrival [6]. Furthermore, as sensing occurs at slant incidence, sea surface altimetry is feasible from a sensor installed away from the water [7].

Unfortunately, SNR-based GNSS-R needs approximately one hour per altimetry retrieval, as it relies on satellite

elevation angle variations. The low retrieval rate is one of the main weakness of this technique [5]. Decreasing the period between altimetry retrievals has the potential to improve the monitoring of fast-changing extreme events, such as tide storm surges [8], [9].

To improve the temporal resolution, [10] introduced a calibration step, displacing the GNSS antenna vertically by means of a manually operated rope and pulley assembly. They were thus able to retrieve reflector height with centimeter level accuracy within 10 minutes for a single satellite. It is also possible to combine multiple simultaneous satellites through a filter for improved resolution [11]. Another study [12] was able to retrieve the GNSS antenna vibration frequency by analyzing SNR readings. In GNSS positioning, it is possible to mitigate multipath via randomization by subjecting the antenna to high frequency movement [13]–[16].

Here we demonstrate a proof-of-concept of a synthetic vertical array for GNSS-R. By vertically displacing a single GNSS antenna in a sweeping fashion, spatial diversity can be leveraged for high-rate altimetry. The antenna displacement allows us to synthesize an antenna array, as if we had several real antennas aligned vertically. This is not unlike the use of forward motion in a synthetic aperture radar.

SNR-based GNSS-R employing a single static antenna can take about 1 hour to retrieve reflector height. In contrast, we can perform altimetry within 5 minutes. Below we describe the Materials and Methods; Experiment Setup; Results and Discussion. We end the study with conclusions and recommendations for future work.

II. MATERIALS AND METHODS

In the following subsections, we describe the mathematical models applied for modeling the data and the electromechanical device design and assembly. Before field experiment, we tested the proposed methodology on SNR data obtained on an open source GNSS multipath simulator

© 2021 IEEE. Reprinted, with permission, from M. K. Yamawaki, F. Geremia-Nievinski and J. F. G. Monico, "High-Rate Altimetry in SNR-Based GNSS-R: Proof-of-Concept of a Synthetic Vertical Array," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, doi: 10.1109/LGRS.2021.3068091.

This work was funded by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) grants number 372541/2013-5, 457530/2014-6, and 433099/2018-6, as well as by the Rio Grande do Sul State Research Funding Agency (Fapergs) grant number 26228.414.42497.26062017

¹ M. K. Yamawaki: Postgraduate Program in Remote Sensing, Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), RS, 91509-900, Brazil; (kenji.yamawaki@gmail.com). (ORCID: 0000-0002-9522-225X).

² F. Geremia-Nievinski: Department of Geodesy and Postgraduate Program in Remote Sensing, Federal University of Rio Grande do Sul, RS, 91509-900, Brazil; (e-mail: felipe.nievinski@ufrgs.br) (ORCID: 0000-0002-3325-1987).

³ J. F. Galera Monico: Department of Cartography and Postgraduate Program in Cartographic Sciences, São Paulo State University, SP, 19060-900, Brazil; (e-mail: galera.monico@unesp.br) (ORCID: 0000-0003-4101-9261).

[17]. This way we could determinate beforehand the optimal setup for the field experiment and some expected results.

A. Forward Model

SNR-based GNSS-R starts with raw SNR data, S (in linear power scale) being detrended [18]:

$$s(t) = S(t) - \bar{S}(t), \quad (1)$$

where the SNR trend, \bar{S} , is a low order polynomial stemming from the antenna gain pattern. Detrended SNR, s , is then fit to a damped sinusoid of the form:

$$s(t) = A_S \cos(\phi) \quad (2)$$

It involves the SNR oscillation amplitude A_S (in watts per watt) and the interferometric phase $\phi = \phi_r - \phi_d$, the difference between reflected and direct phases.

Normally a static planar reflecting surface is assumed, $\phi \cong \Delta\phi$, producing:

$$\Delta\phi = k_z H + \phi_0, \quad (3)$$

where H is the antenna height above the surface (the reflector depth), typically unknown; $k_z = 2k \sin(e)$ is the so-called vertical wavenumber, in terms of the ordinary wavenumber $k = 2\pi/\lambda$, where λ is the wavelength (all known quantities); and ϕ_0 is a phase shift. The satellite elevation angle e changes slowly with time, so its temporal dependence is postponed for section II.D. This standard model is appropriate for altimetry applications; it neglects a smaller phase component stemming from the antenna pattern and the surface material [18].

In the proposed method, the static phase model above $\Delta\phi$ caused by the slow satellite movement is complemented by a dynamic phase variation $\delta\phi$ of instrumental origin:

$$\phi(t) = \Delta\phi + \delta\phi(t) \quad (4)$$

This new fast-changing term $\delta\phi$ has a known functional form, based on the sensor construction. Here we postulate a sinusoidal phase variation over time,

$$\delta\phi(t) = A_\phi \cos(2\pi f \cdot t + \varphi_0) \quad (5)$$

where A_ϕ is the phase amplitude (in radians), f is the sweeping frequency (in hertz), and φ_0 is another arbitrary phase-shift. Detrended SNR will thus read:

$$s(t) = A_S \cos(\Delta\phi + \delta\phi(t)) \quad (6)$$

It should be noted that although the dynamic phase term $\delta\phi$ has a sinusoidal form, the corresponding variation induced in SNR is no longer a damped sinusoid, as the cosine of a cosine is a non-trivial function.

B. Electromechanical Apparatus

The dynamic phase variation $\delta\phi = k_z \delta H$ arises from the antenna vertical displacement $\delta H = A_H \cos(2\pi f t + \varphi_0)$, with A_H being the antenna sweeping amplitude (in meters). It gets projected in the interferometric geometry implied by the vertical wavenumber k_z . For example, for a satellite at zenith, $\delta\phi$ is simply the round-trip distance between antenna and surface, expressed in radians; for a low-elevation satellite, the phase amplitude will be near zero, meaning that the vertical displacement is not effective for a satellite near the horizon.

The sinusoidal vertical displacement is achieved in practice with the electromechanical apparatus shown in Fig. 1 and Fig. 2. A scotch Yoke converts angular motion into linear motion by means of a slotted link mechanism. A 12-V DC electric motor drives the mechanical system at a given sweeping frequency f of the order of 1 Hz. The sweeping phase shift φ_0 is related to the starting position of the

mechanism. The sweeping amplitude A_H (in meters) is basically the lever arm length, of the order of a decimeter.

Ideally the parameters related to the apparatus design and construction would be calibrated based on external measurements. For example, an *a priori* value of A_H may be obtained simply with a ruler or tape measurement. The sweeping phase shift φ_0 is more difficult to determine but it should remain constant for each time series.

C. SNR Fitting

SNR is sampled multiple times per sweeping cycle. The resulting time series is partitioned in N short-duration non-overlapping sets, each lasting for about one sweeping cycle, $\{S_i^j\}$, where the indices are $i = 1, 2, \dots, N$ for each cycle and $j = 1, 2, \dots, M_i$ for each measurement in the i -th set. As the sweeping period is short enough, the satellite elevation angle $e_i^j \approx e_i$ can be approximated as piece-wise constant, and in fact so can the whole static phase component $\Delta\phi_i^j \approx \Delta\phi_i$.

SNR can then be fit via non-linear least squares as follows:

$$S_i^j(t) = \bar{S}_i + A_{Si} \cos(\Delta\phi_i + \delta\phi_i^j(t)) \quad (7)$$

$$\delta\phi_i^j(t) = k_{zi} A_H \cos(2\pi f t_i^j + \varphi_{0i})$$

The independent variables are time, t_i^j , recorded as a data time stamp, and vertical wavenumber, $k_{zi} = 2k \sin e_i$, where the elevation angle is interpolated from satellite ephemeris. The mechanical sweeping frequency (f) and amplitude (A_H) are regarded as known values. The unknown parameters involved in SNR fitting are:

- static phase ($\Delta\phi_i$ [rad])
- sweeping phase shift (φ_{0i} [rad])
- SNR trend (\bar{S}_i [W/W])
- SNR amplitude (A_{Si} [W/W])

Notice the SNR trend $\bar{S}_i^j \approx \bar{S}_i$ and SNR amplitude $A_{Si}^j \approx A_{Si}$ are here approximated as piece-wise constant values.

D. Altimetry Retrieval

Repeating the SNR fitting above yields a series of independent static phase values $\Delta\phi_i$. The altimetry retrieval is then achieved via a simple linear regression of $\Delta\phi_i$ on k_{zi} (eq.3):

$$[H, \phi_0] = \operatorname{argmin}(\sum |\Delta\phi_i - k_{zi} H - \phi_0|^2) \quad (8)$$

The regression intercept is the phase-shift ϕ_0 and the regression slope is the surface height H , which is the main quantity of interest. We assume the satellite elevation angle has changed sufficiently during the regression period.

III. EXPERIMENT SETUP

The experiment was carried out on January 30, 2014 at latitude -22.12257° and longitude -51.4078° . The antenna was setup upright (boresight facing zenith) on top of a 1.2-meter concrete pillar in a green field (Fig. 3). There was moderate clearance to the horizon (Fig. 4); some quadrants were compromised by trees and buildings below 10° elevation.

We have utilized a Trimble R9 GNSS receiver to record SNR at 50-hertz sampling rate. A Septentrio PolaNt-x MF antenna was coupled to the upper end of the Scotch yoke device (Fig. 1). The sweeping frequency was about 0.75 Hz (~ 1.3 s period) and the sweeping amplitude was 6.5 cm. Those values were verified via post-processed kinematic positioning relative to a base station over a short 300-meter

baseline (not shown). Of the total session duration (20 minutes), we selected a ~ 5 -minute portion during which the sweeping frequency was most stable.

For altimetry validation, we performed an optical survey of the site terrain around the antenna. A total station (theodolite with laser distance meter) was setup on the same pillar and 70 points were measured radially at several azimuths (Fig. 3). A planar surface was fit to points, resulting in a slight tilting (2.1°) facing northeast (53.3° aspect angle); the root-mean-square error of the fit was 10.3 cm.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

We focus on two GLONASS satellites that had the best observation conditions: R02 due northeast and R24 due southeast. The satellite elevation angles could not be too high, otherwise the first Fresnel zone would contain the pillar, or the antenna gain pattern would suppress the reflections. Conversely, the elevation could not be too low, otherwise the surface reflections would leave the green field, or the satellite line of sight could be blocked by clutter in the horizon.

Previous GNSS-R studies have concluded that GLONASS SNR observations have less noise [19]. That may explain the better quality of R02 and R24, in comparison to GPS satellites at similar azimuth and elevation. Other satellites, such as G05 and R01, did not have enough variation in elevation angle. The altimetry retrieval is obtained from the regression slope of the reflection phase-shift versus vertical wavenumber (Fig. 7). As the latter is related directly to the sine of elevation angle, a satellite that remains at a fixed elevation cannot be used in SNR-based GNSS-R, regardless of the tracking time.

As stated in section III, we selected the best 5 minutes of the entire 20 minutes session. This was necessary to guarantee the sweep frequency stability. As described in section II-C (eq. 7), the sweeping frequency is considered a known value, so a significant drift may hamper the SNR fitting solution. This drift was primarily caused by the motor's draining battery and fatigue of the mechanical parts (Scotch yoke).

Fig. 5 shows the SNR measurements recorded for satellite R02 in the L2 carrier and civil modulation. The high-frequency SNR oscillations, stemming from the intentional antenna sweeping, produce a few-dB wide envelope in the SNR curve. To facilitate the visualization, we show in Fig. 6 a zoom on just a few cycles. It can be noticed that SNR measurements have quarter-dB numerical resolution and near sinusoidal shape.

The SNR curve fitting is shown superimposed to SNR measurements in Fig. 6. Each cycle produces an independent static phase estimate $\Delta\phi_i$, depicted as black dots in Fig. 7. Despite some phase noise, a linear trend is readily noticed. The regression line is superimposed on the experimental phase estimates in Fig. 7. As explained in section II-D, the regression slope amounts to the altimetry retrieval.

For satellites R02 and R24, we obtained respectively $H = 1.412$ m and $H = 1.570$ m. The corresponding terrain height evaluated at different azimuths based on the field survey (Table I), yields absolute errors of 7.7 cm and 11.5 cm, respectively. These centimetric values are of the same order of magnitude as the surface fitting RMSE reported at the end of section III. Besides genuine non-planar surface deviations, other possible sources of systematic error are atmospheric refraction [16] as well as the antenna pattern and the surface

material composition [18]. It is remarkable that we could perform altimetry in about 5 minutes with a near-surface SNR-based GNSS-R sensor. Fig. 8 shows a simulation for a moving antenna (black line) and a static antenna (red line). The simulation setup had similar satellite elevation and time interval as for the field experiment data of satellite R02 (Fig. 5). For a static antenna, this time interval is insufficient to retrieve reflector height, due to the lack of at least one full SNR oscillation cycle. With a moving antenna, we could expedite the reflector height retrieval, thus significantly improving the temporal resolution of SNR-based GNSS-R altimetry.

V. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

SNR-based GNSS-R is a proven remote sensing method for coastal sea altimetry. One of its main weaknesses is the low temporal resolution, which is dependent on the satellite movement in the sky. We demonstrated a proof-of-concept for improving the temporal resolution by means of a synthetic vertical array, displacing a single antenna to exploit spatial diversity. Altimetry results were of centimetric accuracy for a 5-minute session, which is reasonable given the terrain at the site and other neglected biases.

For future work, we recommend choosing a site with fewer obstructions of the horizon around the antenna. We also expect better results using a smaller antenna, with less multipath mitigation, allowing deeper interference nulls. The power supply of the Scotch-yoke mechanism should also be revisited, to avoid sweeping frequency drift with battery power depletion.

In addition to altimetry, the high-rate retrievals demonstrated here could be helpful for the calibration of antennas installed at GNSS-R tracking stations and for the investigation of systematic effects, such as atmospheric delays [20].

ACKNOWLEDGMENTS

We thank Italo Tsuchiya for helping with the device assembly and Matheus Ferreira e Silva for the topographical surveying, both from São Paulo State University, campus Presidente Prudente.

REFERENCES

- [1] O. Pörtner *et al.*, "Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate." 2019, [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/technical-summary/>.
- [2] Intergovernmental Oceanographic Commission, "Manual on sea level measurement and interpretation, v. V: Radar gauges." UNESCO, 2016, [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000246981>.
- [3] P. Woodworth, G. Wöppelmann, M. Marcos, M. Gravelle, and R. Bingley, "Why We Must Tie Satellite Positioning to Tide Gauge Data," *Eos*, Jan. 2017, doi: 10.1029/2017EO064037.
- [4] F. Geremia-Nievinski *et al.*, "SNR-based GNSS reflectometry for coastal sea-level altimetry – Results from the first IAG inter-comparison campaign,"

- Journal of Geodesy*, 2020, doi: 10.1007/s00190-020-01387-3.
- [5] K. D. Anderson, “Determination of water level and tides using interferometric observations of GPS signals,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 17, no. 8, pp. 1118–1127, Aug. 2000, doi: 10.1175/1520-0426(2000)017<1118:DOWLAT>2.0.CO;2.
- [6] F. G. Nievinski and K. M. Larson, “Forward modeling of GPS multipath for near-surface reflectometry and positioning applications,” *GPS Solutions*, vol. 18, no. 2, pp. 309–322, Apr. 2014, doi: 10.1007/s10291-013-0331-y.
- [7] M. A. R. Fagundes, I. Mendonça-Tinti, A. L. Iescheck, D. M. Akos, and F. Geremia-Nievinski, “An open-source low-cost sensor for SNR-based GNSS reflectometry: Design and long-term validation towards sea level altimetry,” *GPS Solutions (accepted)*, p. 20, 2021.
- [8] D. Peng, E. M. Hill, L. Li, A. D. Switzer, and K. M. Larson, “Application of GNSS interferometric reflectometry for detecting storm surges,” *GPS Solut*, vol. 23, no. 2, p. 47, Mar. 2019, doi: 10.1007/s10291-019-0838-y.
- [9] P. L. Vu *et al.*, “Identifying 2010 Xynthia Storm signature in GNSS-R-based tide records,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 7, p. 782, Apr. 2019, doi: 10.3390/rs11070782.
- [10] M. Ribot *et al.*, “Normalized GNSS Interference Pattern Technique for Altimetry,” *Sensors*, vol. 14, no. 6, pp. 10234–10257, Jun. 2014, doi: 10.3390/s140610234.
- [11] J. Strandberg, T. Hobiger, and R. Haas, “Real-time sea-level monitoring using Kalman filtering of GNSS-R data,” *GPS Solut*, vol. 23, no. 3, p. 61, Apr. 2019, doi: 10.1007/s10291-019-0851-1.
- [12] I. Peppas, P. Psimoulis, and X. Meng, “Modelling antenna vibrations using the Signal-to-Noise Ratio (SNR) of GNSS signals,” presented at the Proceedings of the 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Athens, Greece, May 2019.
- [13] B. J. H. van den Brekel and D. J. R. van Nee, “GPS multipath mitigation by antenna movements,” *Electronics Letters*, vol. 28, no. 25, pp. 2286–2288, Dec. 1992, doi: 10.1049/el:19921471.
- [14] T. Pany and B. Eissfeller, “Demonstration of a Synthetic Phased Array Antenna for Carrier/Code Multipath Mitigation,” in *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, Savannah, GA, Sep. 2008, pp. 663–668.
- [15] T. Ertan, M. L. Psiaki, B. W. O’Hanlon, R. A. Merluzzi, and S. P. Powell, “GNSS Multipath Mitigation using High-Frequency Antenna Motion,” in *Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013)*, Nashville, TN, Sep. 2013, pp. 154–175.
- [16] J. Wang and K. Zhang, “Low-cost positioning with rotating antenna in constrained environment for global navigation satellite systems,” *Electronics Letters*, vol. 54, no. 1, pp. 45–47, Jan. 2018, doi: 10.1049/el.2017.3381.
- [17] F. G. Nievinski and K. M. Larson, “An open source GPS multipath simulator in Matlab/Octave,” *GPS Solutions*, vol. 18, no. 3, pp. 473–481, Jul. 2014, doi: 10.1007/s10291-014-0370-z.
- [18] F. G. Nievinski and K. M. Larson, “Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation—Part I: Formulation and Simulations,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 6555–6563, 2014, doi: 10.1109/TGRS.2013.2297681.
- [19] S. Tabibi, F. G. Nievinski, and T. van Dam, “Statistical Comparison and Combination of GPS, GLONASS, and Multi-GNSS Multipath Reflectometry Applied to Snow Depth Retrieval,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 7, pp. 3773–3785, Jul. 2017, doi: 10.1109/TGRS.2017.2679899.
- [20] S. D. P. Williams and F. G. Nievinski, “Tropospheric delays in ground-based GNSS multipath reflectometry—Experimental evidence from coastal sites,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 122, no. 3, pp. 2310–2327, 2017, doi: 10.1002/2016JB013612.

TABLE I
FULL RESULTS FOR TWO SATELLITES.

Satellite ID	Satellite elevation	Satellite azimuth	GNSS-R height	Terrain height	Height error
R02	18.73°	66.05°	1.412 m	1.335 m	-0.077 m
R24	14.0°	142.1°	1.570 m	1.455 m	-0.115 m



Fig. 1. Photograph time lapse of the antenna vertical displacement device.

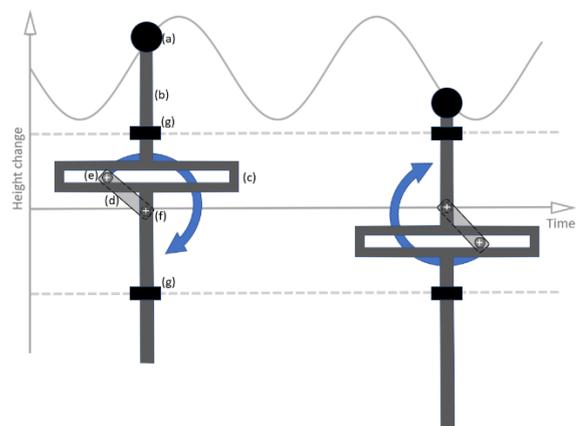


Fig. 2. Diagram of the Scotch yoke device at two times; parts are labeled as: (a) GNSS antenna; (b) connecting rod; (c) sliding yoke; (d) rotating arm; (e) sliding link pin; (f) motor axis; (g) fixed guides.

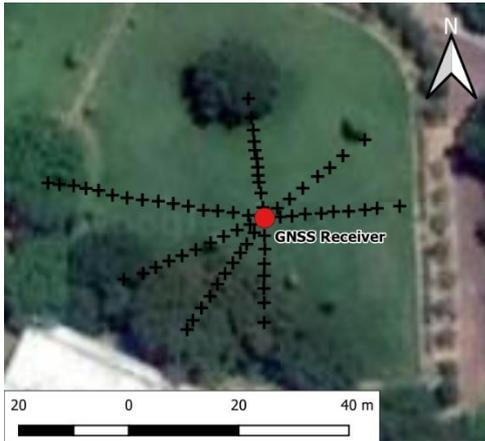


Fig.3. GNSS antenna location and topography survey points

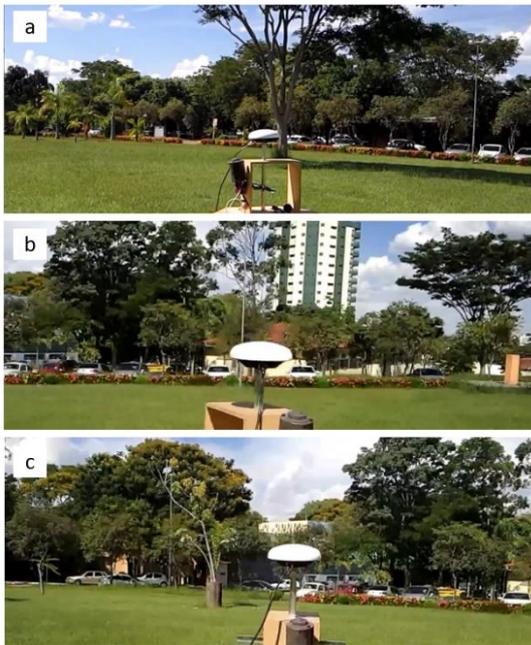


Fig. 4. View of horizon from the antenna site due north (a), east (b), and southeast (c).

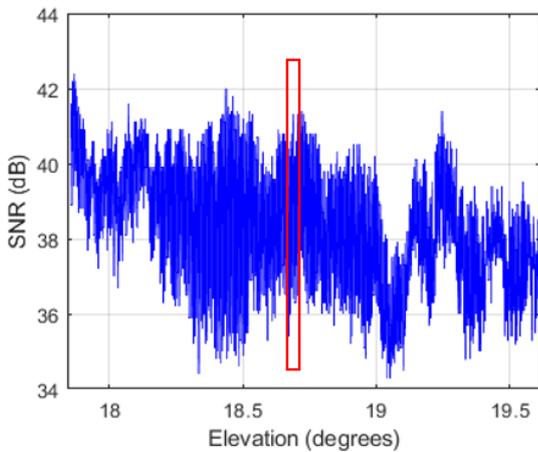


Fig. 5. SNR measurements recorded for satellite R02; the red box is shown with a zoom in Figure 6.

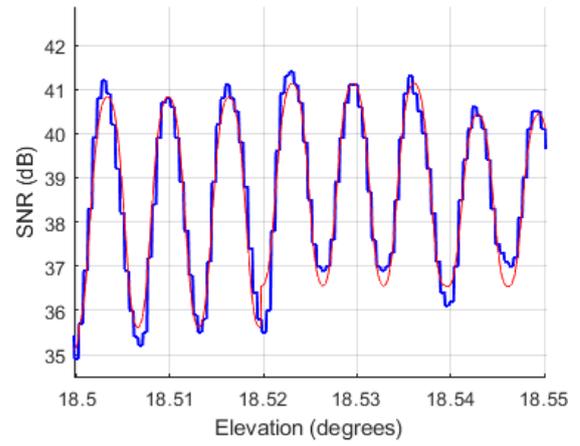


Fig. 6. Zoom on a few sweeping cycles for satellite R02; SNR measurements (blue line) and SNR fitting curve (red line).

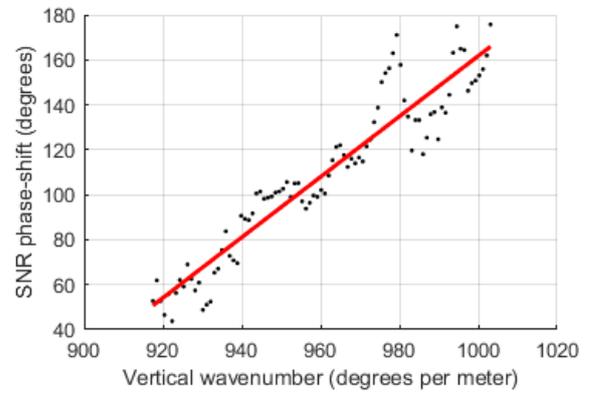


Fig. 7. Static interferometric phase $\Delta\phi$ versus vertical wavenumber k_z obtained from SNR fitting for satellite R02 (black dots); simple linear regression fit (red line).

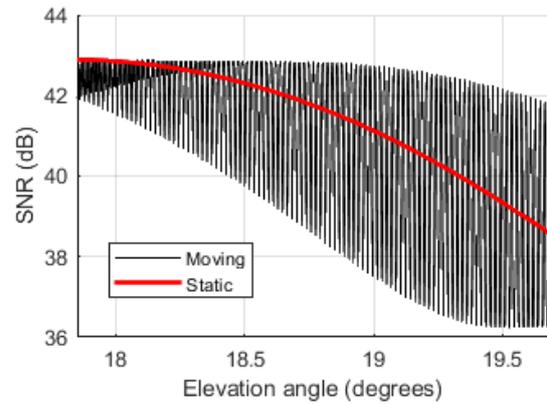


Fig. 8. SNR simulation of a moving antenna (black) and a static antenna (red) with satellite elevation angle corresponding to satellite R02 of the experiment shown in Fig. 5.

5 FIRST WATER LEVEL RESULTS OF A SYNTHETIC GNSS-R VERTICAL ARRAY

M. K. Yamawaki and F. Geremia-Nievinski " First water level results of a synthetic GNSS-R vertical array " (*preprint*).

First water level results of a synthetic GNSS-R vertical array

M. K. Yamawaki¹, F. Geremia-Nievinski²

Abstract—GNSS Reflectometry (GNSS-R) is an established remote sensing method for coastal sea level altimetry. The GNSS-R methods in which are employed signal multipath (GNSS multipath reflectometry - GNSS-MR) are an effective solution for its low cost and measure in distance. The low time resolution of GNSS-MR is an obstacle to its application for real-time water level monitoring. Several studies have tried to increase GNSS-MR time-resolution by vertically moving the GNSS antenna. Previously, we obtained promising results by employing a Scotch-yoke device for a sweeping GNSS-MR application. We concluded that a sweeping antenna could retrieve ground height in a 5-minute scan time. For this paper, we employed a sweeping GNSS-MR device for water level height retrieval on a 6-hour scan time. For its almost-isotropic gain pattern, we used a low-cost navigation GNSS antenna. In this study, we focused on only one GPS satellite (PRN 07). An exception to some moments that the SNR behaved unexpectedly, we could retrieve reliable water level height. By retrieving instantaneous height values, we noted an oscillation pattern with a frequency near the SNR baseline. This height pattern ended up allowing reliable height retrieval only on intervals longer than a full SNR baseline cycle. The instantaneous height oscillation and the SNR behavior should be further researched for the evolution of high-rate altimetry in SNR-based GNSS-R.

Index Terms—GNSS, GNSS-R

I. INTRODUCTION

Global navigation satellite system reflectometry (GNSS-R) an established remote sensing technique for coastal sea level altimetry [1], [2]. With the rise of additional GNSS constellations, GNSS-R water level have increasing precision and resolution. It is done by a comparison between the GNSS direct signal to the signal that has reflected on the water body surface. GNSS-R is becoming more reliable due to the rise of GNSS satellites number on each constellation.

There are several ways to utilize GNSS-R for water level height retrieval. The use of the combination of the direct and reflected GNSS signals (multipath signal) was previously proposed and proven effective for sea surface height retrieval [3]. This type of GNSS-R is defined as GNSS multipath reflectometry (GNSS-MR) [4]. Its height retrieval is based on the signal-to-noise ratio (SNR) reading pattern as the satellite elevation changes in the sky. It was shown that GNSS-MR can be done on low-cost GNSS sensors [5] and devices not specific for GNSS-R. GNSS-MR can operate on low elevation satellites, which allows water elevation height retrieval on distance. This makes available the sensor

installation away from dangerous sites.

Unfortunately, GNSS-MR has a low time resolution (around 30 minutes for each height retrieval). It is due to the method used by GNSS-MR to recognize the reflected signal interference to the direct signal. Since it acquires both signals in a combined form, it depends on the satellite movement in the sky to identify the reflected signal path.

Previous studies have improved SNR-based GNSS-R time resolution. Some of these required manually move the antenna [6]. By varying antenna height, we synthesize SNR multipath's constructive and destructive interference patterns without satellite movement in the sky. Another solution [7], is based on an automatic sweep, done by a GNSS antenna coupled to a mechanical device powered by an electric motor. It was shown that a constantly moving antenna can retrieve ground height within 5 minutes of GNSS data.

This paper employed the synthetic vertical array GNSS-R for water surface height instead of ground height. By doing this experiment, we solve several obstacles faced in the previous experiment [7]. Such as horizon obstruction, antenna gain for multipath, and the target's physical characteristics. We expect to acquire enough data for synthetic vertical array GNSS-R performance analysis.

II. FORMULATION

Here, we briefly recapitulate the background concepts; for more details, please see [7]. For a static antenna, raw SNR (S), converted from decibels to linear scale, is decomposed in a SNR trend (\bar{S}), modeled by a low-order polynomial, and detrended SNR, $s = S - \bar{S} = A_s \cos(\Delta\phi)$, modeled as a dampened sinusoid. The cosine argument, here called static phase, involves the reflector depth (H) and a phase-shift ϕ_0 :

$$\Delta\phi = H \cdot k_z + \phi_0 \quad (1)$$

The vertical wavenumber $k_z = 2\pi\lambda^{-1} \sin e$ can be interpreted as the vertical sensitivity of the interferometer, in terms of the satellite elevation angle (e).

To the usual low-frequency or static phase $\Delta\phi$ we sum an instrumental high-frequency or dynamic phase $\delta\phi$:

$$\delta\phi_i^j = k_{zi} A_H \cos(2\pi t_i^j / T + \varphi_{0i}) \quad (2)$$

The sinusoidal form is achieved in practice with a vertical sweeping movement by means of an electromechanical apparatus attached to the GNSS antenna [7]. The augmented SNR model reads:

Paper submitted on XX/XX/XXXX for review. This work was funded by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) grants number 372541/2013-5, 457530/2014-6, and 433099/2018-6, as well as by the Rio Grande do Sul State Research Funding Agency (Fapergs) grant number 26228.414.42497.26062017

¹ M. K. Yamawaki: Postgraduate Program in Remote Sensing, Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), RS, 91509-900, Brazil; (kenji.yamawaki@ufrgs.br).

² F. Geremia-Nievinski: Department of Geodesy and Postgraduate Program in Remote Sensing, Federal University of Rio Grande do Sul, RS, 91509-900, Brazil; (e-mail: felipe.nievinski@ufrgs.br)

$$\tilde{S}_i^j = \tilde{S}_i + A_{Si} \cos(\Delta\phi_i + \delta\phi_i^j) \quad (3)$$

Eq. (3) is fitted to raw SNR by a nonlinear regression. We split the SNR series into $i = 1, 2, \dots, N$ intervals, each with $j = 1, 2, \dots, M_i$ observations. The independent variables are time (t_i^j) and vertical wavenumber ($k_{zi} = 2k \sin e_i$). The piecewise constant unknown parameters are static phase or SNR phase-shift ($\Delta\phi_i$), dynamic phase-shift (φ_{0i}), SNR amplitude (A_{Si}), and low-frequency static SNR or SNR baseline (\tilde{S}_i). Nonlinear regression also provides the precision of each parameter, based on the least-squares covariance matrix and the root-mean-square of SNR residuals. The dynamic height amplitude (A_H) and sweeping period (T) are regarded as known values.

Finally, altimetry is retrieved via weighted linear regression of static phase versus vertical wavenumber (eq.1), where height (H) is the slope and phase-shift (ϕ_0) is the intercept. Alternatively, instantaneous height can be obtained via numerical derivative of static phase series (possibly low-pass filtered):

$$H_i = \frac{\partial \Delta\phi_i}{\partial k_z} \approx \frac{\Delta\phi_{i+1} - \Delta\phi_{i-1}}{k_{z,i+1} - k_{z,i-1}} \quad (4)$$

III. EXPERIMENT CONFIGURATION

We employed the ‘‘MPHW’’ GNSS-R sensor [5]. We have modified the datalogger for high-rate data acquisition (10 Hz). This sensor is capable of only GPS L1 signal reading. The GNSS antenna is a low-profile patch design, usually employed for low-precision navigation, chosen due to its more isotropic gain pattern compared to geodetic antennas [8].

To apply the mechanical sweep to the antenna, we used a previously crafted Scotch-yoke device [7]. To guarantee reliable sweeping, we used a high-capacity stationary battery (30 Ah). The smaller antenna presented little weight load, enabling smoother movement. The antenna sweeping cycle period was ~ 1.5 seconds (Fig. 1).

We carried out the experiment on April 20th of 2020. The target was Lake Guaiba (Fig. 2), located in Porto Alegre, Brazil (-30.0212 latitude and -51.2214 longitude). The reflector depth was about 4.5 m. It had calm waters during the GNSS-R scan and the water variation was negligible for the duration of the experiment. The installation setup can be seen in Fig. 3, which shows both the dynamic sensor and a stationary sensor [5], used for comparison.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

We selected the GPS satellite PRN 07, whose azimuth was in the direction of the target (around 330°) and elevation angle varied from 0° to 67°. As can be seen in Fig. 5, there were some obstructions by islands on the lake, which prevented analysis near the horizon.

The SNR data (Fig. 6) exhibited the expected high frequency interference pattern from a sweeping GNSS antenna, with a period of ~ 1.5 seconds. As intended, the chosen antenna allowed a stronger multipath interference: the SNR amplitude (A_S), between upper and lower envelope

limits, was ~ 10 times greater than in the original experiment, that used a geodetic antenna [7]. Additionally, there was a low-frequency SNR variation, captured by the static SNR (\tilde{S}), that seems to represent the interference pattern for a fictitious static antenna, near the center of the vertical array: $\tilde{S} \cong \bar{S} + A_S \cos(\Delta\phi)$. Via spectral analysis of SNR baseline, we recovered 4.50 m height. The SNR fit was good most of the time; for more detail, Fig. 8 (top) displays a zoom of region (a), where we can see that the SNR fit follows the raw SNR closely.

For each sweeping cycle fit, we obtained one static phase estimate, $\Delta\phi_i$, shown over time in Fig. 7 (top), along with its precision (bottom). It shows a clear linear trend of $\sim 14^\circ/\text{s}$, as expected from the linear eq. (1), with small precision (median value of 27.8°). More detail is displayed in Fig. 8 (bottom), which zooms on region (a). We could recover reliable water level height values by linear regression (eq.1) in intervals where the static phase behavior was stable (Table 1).

Superimposed on the static phase trend, there were two steps, around 18 minutes and 50 minutes (Fig. 7, top). The steps were accompanied by spikes of imprecision on (Fig. 7, bottom). They coincide with raw SNR irregularities, in the form of abrupt amplitude decrease or even vanishing amplitude. Fig. 9 (top) presents an irregular SNR section, while Fig. 9 (bottom) shows the static phase step and the corresponding precision spike. We attribute some of these irregularities in raw SNR to the GPS receiver tracking difficulties.

Besides the phase steps, we noted an oscillation in detrended static phase (Fig. 10, middle), which seemed to coincide with the static SNR baseline (Fig. 10, top). We speculate these small-scale phase oscillations might be caused by an instability in the Scotch yoke mechanism.

By extracting the instantaneous height from static phase series (eq.4, after filtering to remove random noise), we noted that it also oscillated around the mean value. This oscillation degraded the height retrieval at very short time intervals. It was still possible to recover reliable water level height values by averaging over multiple phase oscillation cycles (TABLE 1).

V. CONCLUSIONS

GNSS-MR is proven to be an effective remote sensing method for coastal marine altimetry. One of its main weaknesses is its low time resolution, which depends on the satellite's movement in the sky. This experiment proposed the evaluation of the dynamic GNSS-MR performance in a long-time-interval scan. The 6-hour experiment showed that instantaneous height retrieval may be disturbed by the high noise. However, its value across scanning time presented an interesting pattern, that must be further researched.

The use of only PRN 07 was enough for a couple of altimetry measures along its trajectory. We expect to increase measures by employing a GNSS receiver capable of multi-GNSS reception and L2 carrier frequency. The receiver antenna was able to detect GNSS multipath from the target, even on high elevation satellites (more than 45°). We should maintain this antenna type for future GNSS-MR devices. Also, we must assert the source of the SNR behavior by verifying if it is a hardware-related problem.

The height retrieval by linear regression of SNR phase-shift is robust on long intervals. But near SNR phase-shift steps it can produce unreliable altimetry data. Those steps generally come with inconsistencies in the SNR pattern and spikes on fit precision. Those SNR inconsistencies should be further evaluated to remove those steps.

The instantaneous height, obtained by gradient, showed that the height values oscillated around their expected value. This oscillation had a frequency similar to the SNR baseline oscillation. This shows that the height could not be reliably retrieved in less than one full SNR baseline cycle. It may be one limitation of SNR-based GNSS-R on a synthetic vertical array.

In future work, we plan to compare GNSS-R data to absolute water altimetry (radar, ruler, etc.). This shall help us to isolate GNSS-R-related systematic errors. Additionally, we plan on employing other GNSS, such as GLONASS, GALILEO, and BEIDOU.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank M. Fagundes for providing the stationary GNSS-R sensor data.

VI. REFERENCES

- [1] F. Geremia-Nievinski *et al.*, “SNR-based GNSS reflectometry for coastal sea-level altimetry: results from the first IAG inter-comparison campaign,” *Journal of Geodesy*, vol. 94, no. 8, p. 70, Jul. 2020, doi: 10.1007/s00190-020-01387-3.
- [2] S. Tabibi, F. G. Nievinski, and T. van Dam, “Statistical Comparison and Combination of GPS, GLONASS, and Multi-GNSS Multipath Reflectometry Applied to Snow Depth Retrieval,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 7, pp. 3773–3785, Jul. 2017, doi: 10.1109/TGRS.2017.2679899.
- [3] K. D. Anderson, “Determination of water level and tides using interferometric observations of GPS signals,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 17, no. 8, pp. 1118–1127, Aug. 2000, doi: 10.1175/1520-0426(2000)017<1118:DOWLAT>2.0.CO;2.
- [4] S. D. P. Williams and F. G. Nievinski, “Tropospheric delays in ground-based GNSS multipath reflectometry—Experimental evidence from coastal sites: Tropospheric Delays in GNSS-MR,” *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 122, no. 3, pp. 2310–2327, Mar. 2017, doi: 10.1002/2016JB013612.
- [5] M. A. R. Fagundes, I. Mendonça-Tinti, A. L. Iescheck, D. M. Akos, and F. Geremia-Nievinski, “An open-source low-cost sensor for SNR-based GNSS reflectometry: design and long-term validation towards sea-level altimetry,” *GPS Solut.*, vol. 25, no. 2, p. 73, Apr. 2021, doi: 10.1007/s10291-021-01087-1.
- [6] M. Ribot *et al.*, “Normalized GNSS Interference Pattern Technique for Altimetry,” *Sensors*, vol. 14, no. 6, pp. 10234–10257, Jun. 2014, doi: 10.3390/s140610234.
- [7] M. K. Yamawaki, F. Geremia-Nievinski, and J. F. G. Monico, “High-Rate Altimetry in SNR-Based GNSS-R: Proof-of-Concept of a Synthetic Vertical Array,” *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, pp. 1–5, 2021, doi: 10.1109/LGRS.2021.3068091.
- [8] D. J. Purnell, N. Gomez, W. Minarik, D. Porter, and G. Langston, “Precise water level measurements using low-cost GNSS antenna arrays,” *Physical: Geophysics*, preprint, Jan. 2021. doi: 10.5194/esurf-2020-108.
- [9] F. G. Nievinski and K. M. Larson, “An open source GPS multipath simulator in Matlab/Octave,” *GPS Solutions*, vol. 18, no. 3, pp. 473–481, Jul. 2014, doi: 10.1007/s10291-014-0370-z.

TABLE 1
WATER LEVEL HEIGHT RETRIEVALS; HEIGHT ERROR STEMS FROM VALIDATION BY COMPARISON TO THE STATIONARY GNSS-R SENSOR ($H=4.47\text{ M} \pm 0.016\text{ M}$).

Initial time	End time	Min elevation	Max elevation	GNSS-R Height	Height Error
04.0 min	14.2 min	21.687°	25.922°	4.40 m	-7 cm
20.3 min	48.7 min	28.517°	40.475°	4.46 m	+1 cm
52.7 min	70.0 min	44.144°	49.185°	4.43 m	+4 cm

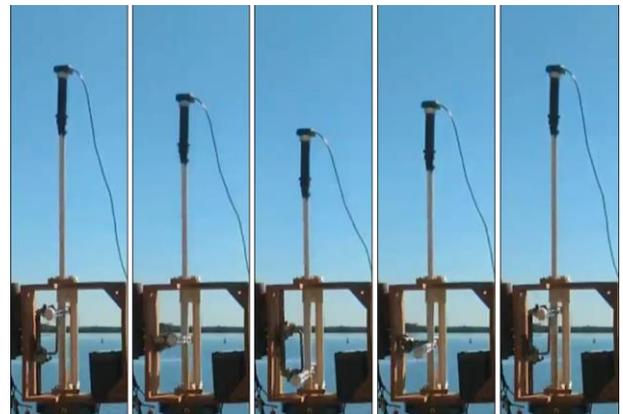


Fig. 1. Device movement pattern over 1.5 seconds.

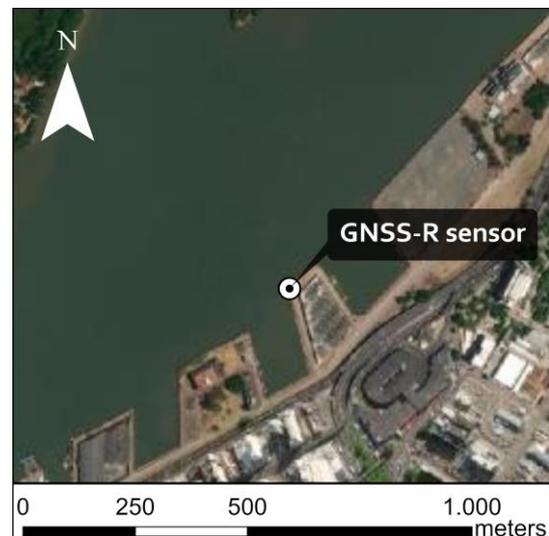


Fig. 2. Experiment campaign site.

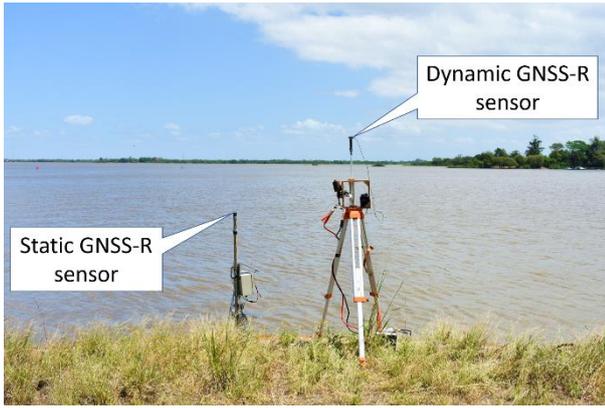


Fig. 3. Sensor installation setup.

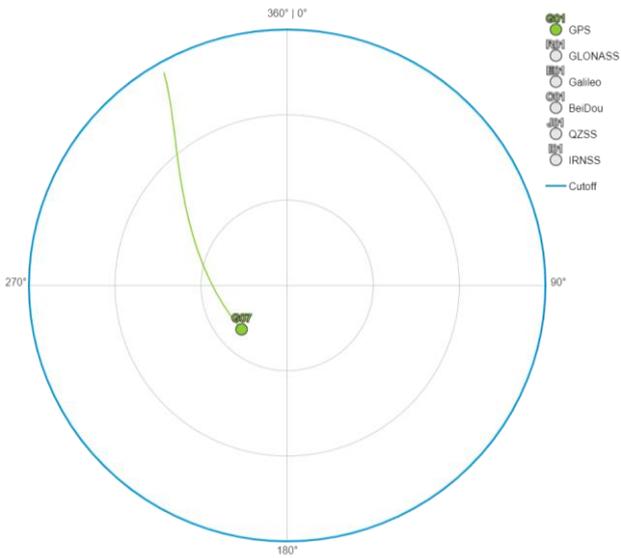


Fig. 4. PRN 7 sky plot.



Fig. 5. Horizon on 330° azimuth

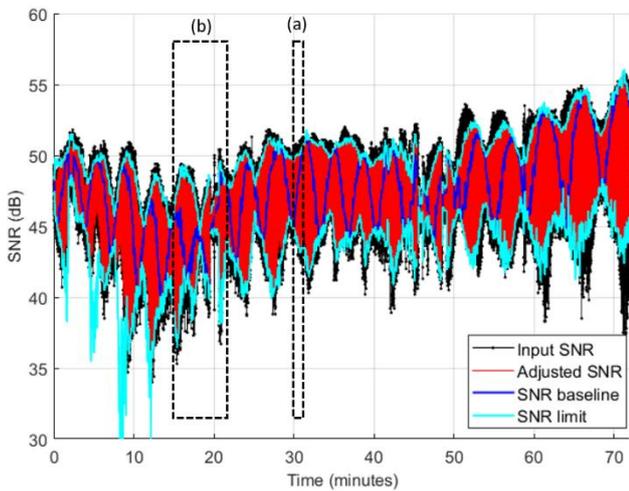


Fig. 6. SNR fit result for PRN 7.

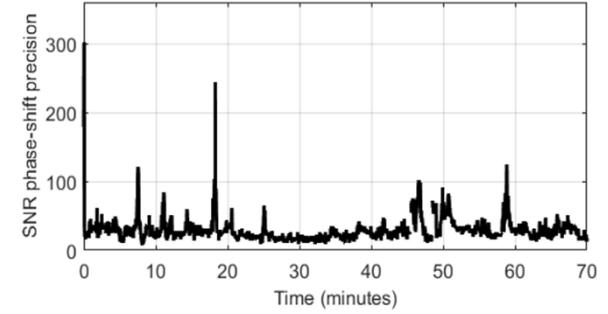
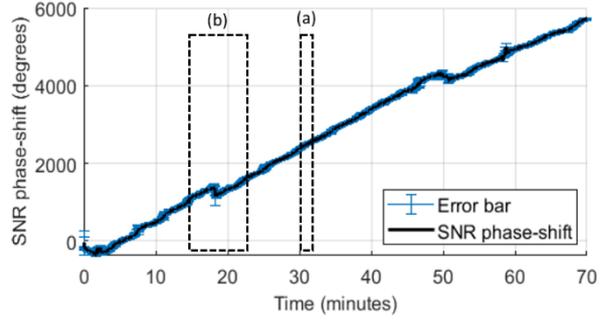


Fig. 7. Fit SNR phase-shift (top); SNR phase-shift precision (bottom).

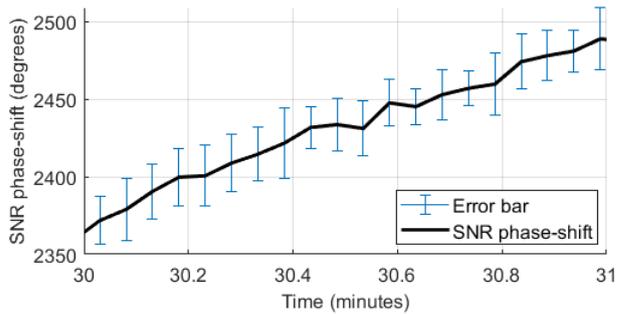
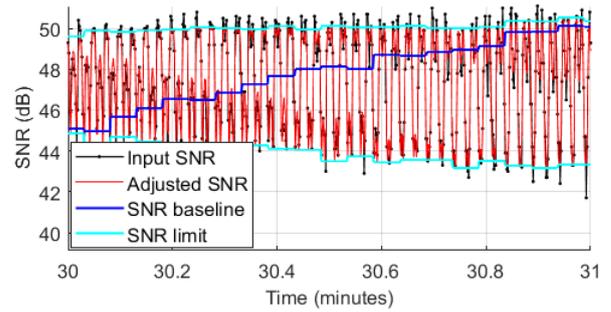


Fig. 8. Zoom (a) of fig. 6 (top); zoom (a) of fig. 7 (bottom).

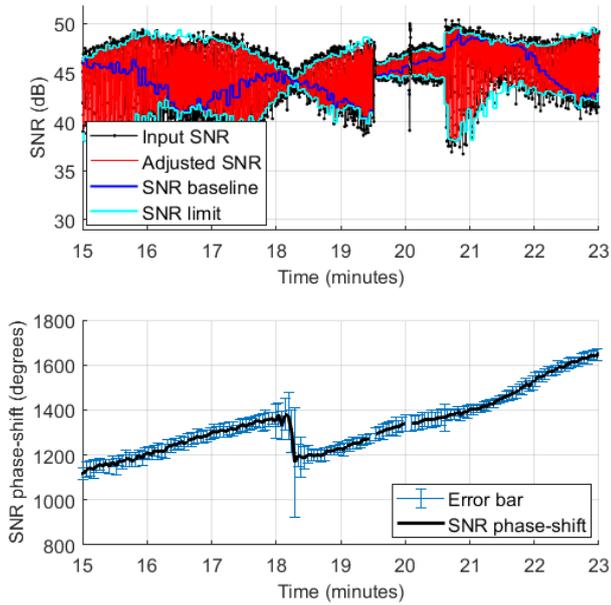


Fig. 9. Zoom (b) of Fig. 6 (top); zoom (b) of Fig. 7 (bottom).

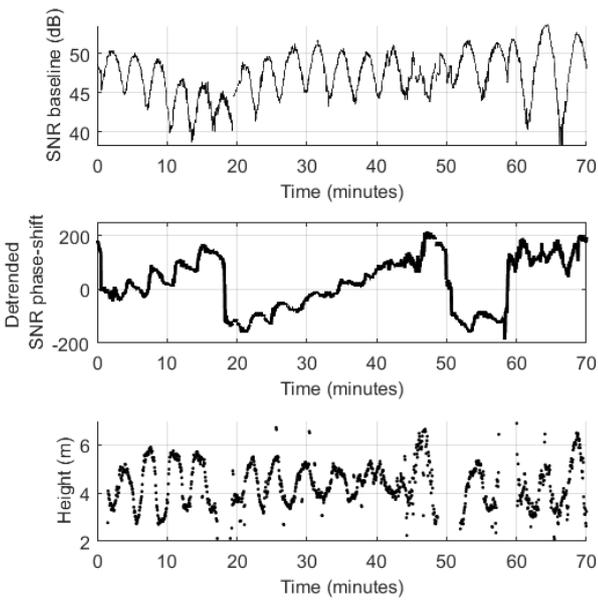


Fig. 10. SNR baseline (top); Detrended SNR phase-shift (mid); instantaneous height (botto

6 SIMULAÇÕES

Com o objetivo de investigar as limitações fundamentais da técnica proposta e prever o comportamento esperado do dispositivo nas condições dos experimentos, foram realizadas diversas simulações com uso de biblioteca de simulação de SNR (NIEVINSKI; LARSON, 2014a). Ao realizar simulações em condições ideais, ou seja, a partir de dados livres de ruído e com elementos fixos (amplitude de varredura e frequência de varredura) constantes e conhecidos, foi possível realizar recuperação de altura instantânea com os algoritmos propostos neste trabalho. Porém, nas condições de campo podem ser encontrados diversos erros, sistemáticos e aleatórios. Alguns exemplos são: as imperfeições na construção do equipamento mecânico, falhas na parte elétrica do equipamento, ruído no sinal GNSS e influência da atmosfera na direção do sinal GNSS. Portanto, foram realizadas diversas simulações com o objetivo de medir o impacto das fontes de erro sistemáticos na recuperação de altura instantânea. Todas as simulações adotaram período de varredura de 1,5 segundos, amplitude de varredura de 7 cm e altura de do dispositivo em relação à superfície d'água de 4,5 metros.

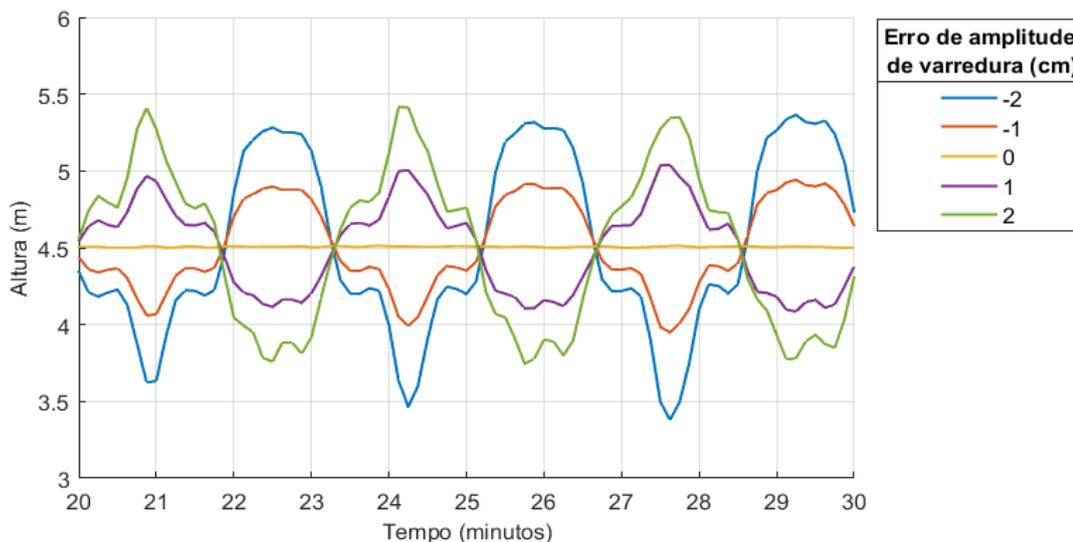
6.1 Erro em amplitude de varredura

A amplitude de varredura pode ser influenciada pela construção do dispositivo mecânico e sua instalação. Caso o dispositivo apresente defeitos de fabricação, a amplitude de varredura pode apresentar variações sistemáticas. Além disso, seu nivelamento incorreto durante o levantamento pode provocar incoerência entre a amplitude inclinada e a amplitude vertical. Aconselha-se o uso de um nível de bolha circular (o que não foi feito nos experimentos de campo acima), que geralmente possibilitaria 11' de precisão no nivelamento de um dispositivo (OGUNDARE, 2015); tal erro angular provocaria um erro inferior à 1 milímetro na amplitude de varredura no dispositivo utilizado neste estudo. Da mesma forma, a deflexão da vertical também teria impacto desprezível (FRANÇA; KLEIN; VEIGA, 2021).

A simulação da recuperação de altura instantânea, considerando diversos erros de amplitude de varredura (Figura 13), demonstrou grande influência no resultado da altura recuperada. Foi observado que, uma discrepância na amplitude de varredura provoca oscilação da altura instantânea em torno do valor esperado (4,5 m). Pode-se

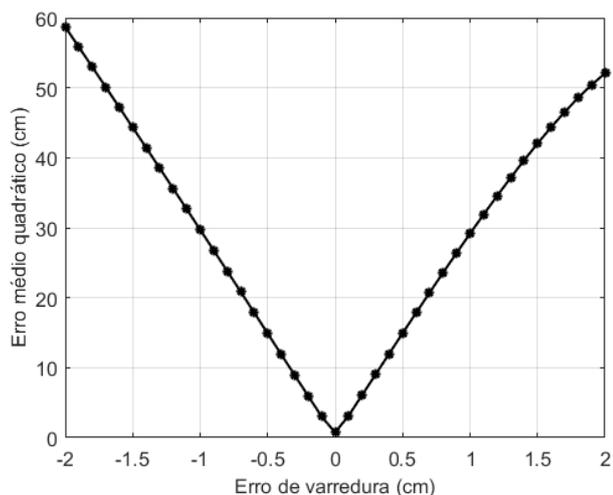
observar erros próximos a 0,5 metros para 1 cm de discrepância na amplitude de varredura. Ao extrair o erro médio quadrático das alturas obtidas para cada um dos casos (Figura 14), pode-se notar um valor crescente e linear deste erro à medida que nos afastamos do valor correto da amplitude de varredura.

Figura 13 – Simulação da recuperação de altura instantânea em diferentes erros de amplitude de varredura.



Fonte: O autor.

Figura 14 – Erro médio quadrático da altura instantânea em diferentes erros de amplitude de varredura.



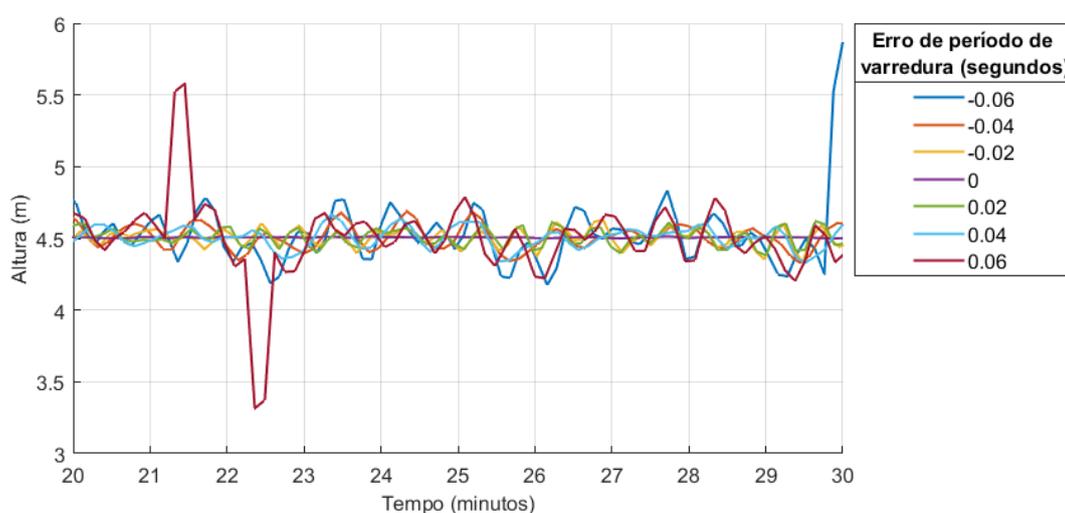
Fonte: O Autor

6.2 Erro em período de varredura

O período de varredura é outro elemento constante que depende da construção do dispositivo mecânico (definido como o inverso da frequência de varredura). A

fadiga mecânica e redução da carga da bateria podem causar deriva no período de varredura. Os resultados da simulação (Figura 15) mostraram grande impacto do erro do período de varredura na recuperação de altura. Erros acima de 0,1 segundo impossibilitaram a recuperação de altura. Para erros mais baixos, a altura instantânea apresentou padrão oscilatório em torno do valor esperado (4,5 m). Para um período de varredura com erro de 0,04 segundos (40 ms), foi observado pico de erro de altura de 30 cm.

Figura 15 – Simulação da recuperação de altura instantânea em diferentes erros de período de varredura.



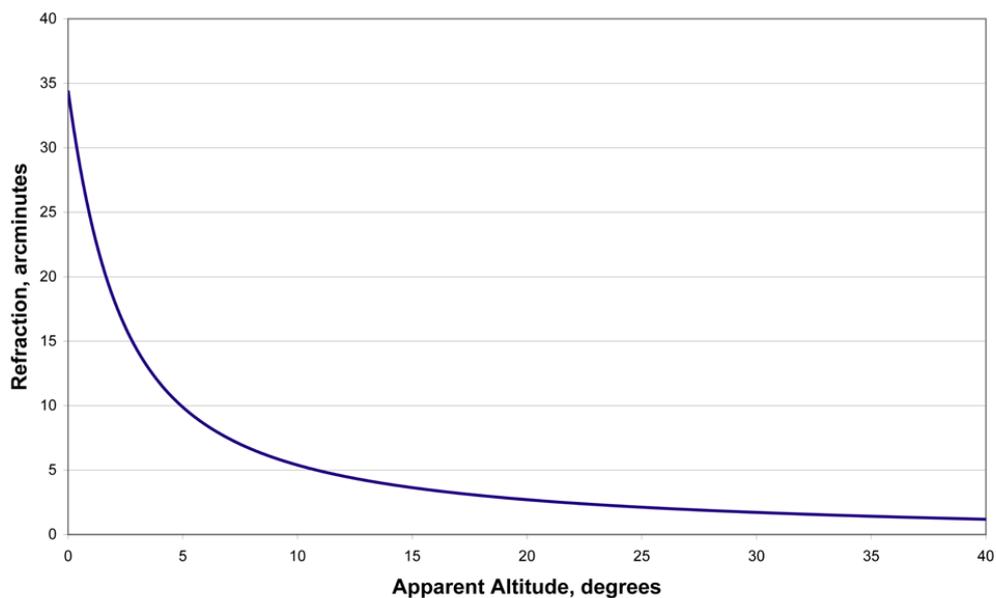
Fonte: O autor.

6.3 Erro de elevação do satélite

Um dos fatores que podem provocar erro na medida de elevação do satélite é a refração atmosférica. Pode-se observar na Figura 16 a relação entre a elevação aparente e influência da refração atmosférica, obtida pela fórmula de Bennett (1982). A maior influência da refração atmosférica ocorre em baixas elevações, chegando a aproximadamente $0,58^\circ$ em 0° de elevação.

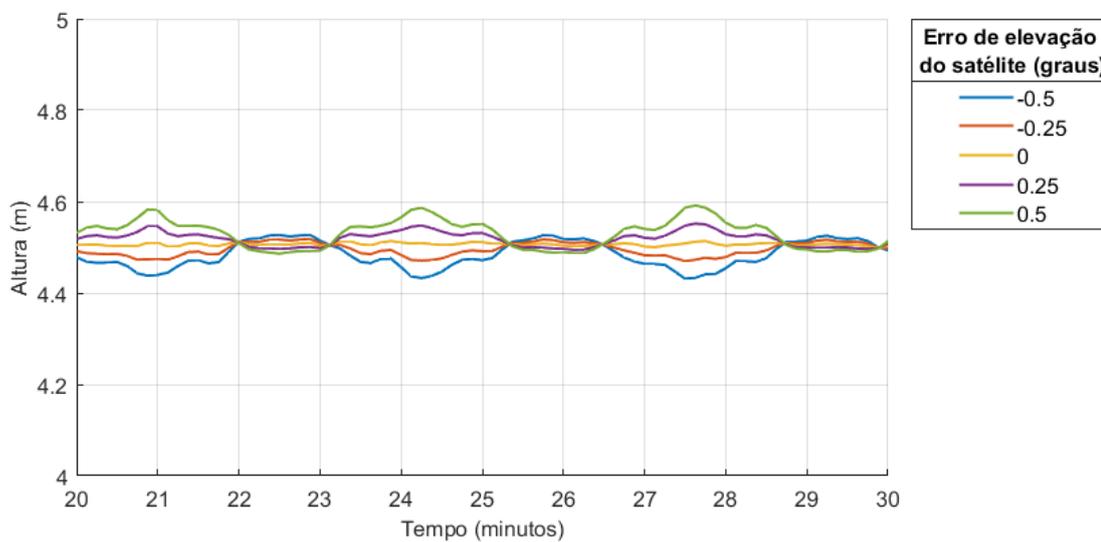
A simulação da recuperação de altura em diferentes erros de elevação também apresentou padrão oscilatório ao longo do tempo (Figura 17). Embora esta simulação tenha apresentado erros na ordem de 10 cm para $0,5^\circ$ de erro de elevação, deve-se salientar que este é um caso extremo, já que este representa o erro máximo causado pela refração atmosférica para elevações aparentes próximas a 0° . Já para elevações aparentes acima de 10° , a refração causaria erros desprezíveis para recuperação de altura instantânea.

Figura 16 – Erro da elevação aparente causada pela refração atmosférica.



Fonte: Conrad (2011)

Figura 17 – Simulação da recuperação de altura instantânea em diferentes erros de elevação de satélite.



Fonte: O autor.

7 CONCLUSÃO

Refletometria de multicaminho GNSS (GNSS-MR) é um método comprovado de sensoriamento remoto para altimetria marítima costeira. Um de seus principais pontos fracos é a baixa resolução temporal, que depende do movimento do satélite no céu. Demonstramos uma prova de conceito para melhorar a resolução temporal, deslocando uma única antena e, com isso, explorando a diversidade espacial da recepção. Para desenvolvimento desta metodologia, foram realizados diversos experimentos, além da solução para processamento dos dados. Os artigos se dividiram na prova de conceito da metodologia e a avaliação aprofundada de seu desempenho em longos períodos.

O primeiro artigo teve foco na prova de conceito da metodologia proposta neste trabalho. Esta etapa consistiu na determinação da solução algébrica e execução de um experimento de curta duração. Os resultados da altimetria apresentaram precisão centimétrica, o que é razoável, dado o terreno no local e outros vieses negligenciados. Para este experimento, foi utilizado receptor GNSS geodésico, que possui diversas vantagens, como a alta resolução temporal e capacidade de recepção de sinal GPS e GLONASS nas portadoras L1 e L2. Foi notado que a influência do multicaminho foi atenuada pelos filtros presentes na antena utilizada. Embora a eliminação de multicaminho seja benéfica para posicionamento GNSS, estes filtros podem dificultar recuperação de altura via GNSS-R. Foi concluído neste primeiro artigo que, uma matriz vertical sintética de sensores pode melhorar a resolução temporal de altimetria via GNSS-R baseada em SNR. Além disso, foram indicadas diversas alterações necessárias para melhor operação do dispositivo. Estas melhorias incluíram: maior estabilidade do dispositivo de varredura, utilização de antena GNSS simples (menor atenuação de multicaminho) e escolha de local de experimento com menos obstrução do horizonte.

O segundo artigo teve foco na análise da performance da metodologia em um rastreamento de longo intervalo de duração. Para o sensor, foram implementadas as diversas melhorias indicadas nas conclusões do primeiro artigo. O dispositivo mecânico operou de forma estável durante todo experimento. O uso de uma antena GNSS mais simples permitiu maior influência do multicaminho na potência do sinal, que facilitou a altimetria via GNSS-R. O receptor GNSS de baixo custo foi suficiente para registrar os dados para esta análise. Porém, este sensor apresentou algumas

inconsistências pontuais no sinal registrado, degradando altimetria nestes momentos. Com os dados obtidos neste experimento, foi possível analisar o comportamento das diversas variáveis ao longo do tempo. Em especial, foi notado que os valores de fase do sinal apresentavam uma leve oscilação em torno de sua tendência. Ao extrair a altura instantânea também se observou oscilação, desta vez em torno da sua média. Este comportamento degradou o valor de altura em curtos intervalos de tempo. Porém, ao se extrair a média da altura instantânea dentro de intervalos que continham alguns ciclos desta oscilação de fase do sinal, foi possível recuperar valores confiáveis da altura da superfície d'água. As alturas recuperadas através destas médias, ao serem comparados com valor obtido por sensor GNSS-R previamente instalado no local, apresentaram erro centimétrico.

As simulações foram essenciais para o entendimento da metodologia proposta. Foi possível observar algumas de suas limitações e apontar as fontes de alguns erros observados em testes de campo. Além disso, foi possível identificar os limites de aceitáveis de incerteza para os valores do dispositivo eletromecânico, sendo estes amplitude de varredura e frequência de varredura. A influência da refração atmosférica também foi avaliada com testes do comportamento do processamento em diferentes erros de elevação de satélite.

Vale destacar algumas recomendações para o uso de dispositivo mecânico de varredura para GNSS-R. O local deve ter pouca obstrução do horizonte ao redor da antena. Observou-se melhores resultados usando uma antena mais simples, com menos mitigação de multicaminho, permitindo nulos de interferência mais profundos. A fonte de alimentação do mecanismo *Scotch-yoke* deve fornecer energia uniforme ao longo do tempo. A deriva da frequência de varredura com o esgotamento da bateria é altamente prejudicial para processamento dos dados. Deve-se utilizar nível de bolha circular para nivelamento do equipamento antes de iniciar o rastreamento. O receptor GNSS deve ter frequência de leitura consideravelmente superior à frequência de varredura do mecanismo (no mínimo sete vezes maior).

7.1 Trabalhos futuros e recomendações metodológicas

Futuramente, recomenda-se empregar sensores compatíveis com múltiplos GNSS, como GLONASS, que podem auxiliar na melhora de resolução temporal devido ao maior número de satélites. Outra solução seria o emprego de receptor GNSS geodésico conectado a uma antena GNSS simples (como a utilizada no

segundo artigo). Desta forma teremos a alta resolução temporal e maior precisão de um sensor geodésico, com o ganho isotrópico de uma antena simples.

Deve ser avaliado o impacto da amplitude do deslocamento de varredura, uma constante dependente da fabricação do mecanismo, na qualidade da altimetria via GNSS-R. Foi observado a variação na potência do sinal era consideravelmente menor para satélites em baixos ângulos de elevação. De fato, a amplitude de varredura ideal pode ser maior do que o valor adotado nesta pesquisa, já que é dependente da elevação do satélite observado (RIBOT *et al.*, 2014).

Um dos maiores desafios encontrados no processamento dos dados foi a falta de controle da frequência de varredura do dispositivo eletromecânico. Portanto, vale indicar algumas possíveis melhorias para o dispositivo de varredura. O emprego de um motor de passo pode possibilitar melhor controle do período de varredura do dispositivo. Alternativamente, pode-se adotar um dispositivo auxiliar, que permita acompanhar a frequência de oscilação do dispositivo, possibilitaria a atualização dinâmica do valor nominal da frequência de varredura durante o processamento.

Deve-se avaliar a origem das inconsistências apresentadas pelo sinal registrado pelo receptor GNSS de baixo custo. Esta característica do sinal pode ser uma limitação deste tipo de dispositivo. Também espera-se isolar a origem das oscilações de fase do sinal, a fim de possibilitar recuperação de altura instantânea via GNSS-R.

Além da altimetria diretamente, as recuperações altimétricas em alta taxa demonstradas aqui podem ser úteis para a calibração de antenas instaladas em estações de rastreamento GNSS-R (WILLIAMS; NIEVINSKI, 2017) e para a investigação de efeitos sistemáticos, como atrasos atmosféricos (NIKOLAIDOU, 2020). Pode-se assumir que o resíduo da medida de altura seja originado da contribuição da fase de elementos não geométricos ao sinal da onda portadora. Este método pode possibilitar o dimensionamento da interferência causada por elementos como rugosidade e material da superfície refletida, efeitos atmosféricos e propriedades físicas da antena.

Próximos estudos devem realizar levantamentos com objetivo de se recuperar altura da superfície marítima (costeira e/ou oceânica). Para possibilitar a aplicação de maregrafia com equipamento instalado em terra firme e afastado da costa, é necessário que o equipamento realize leitura de pontos horizontalmente afastados da antena. Para isto, deve-se realizar levantamento com antena GNSS em pontos altos e utilizar satélites em baixos ângulos de elevação.

O desenvolvimento da matriz vertical sem partes móveis é essencial para tornar a metodologia aplicável ao monitoramento maregráfico a longo prazo. O dispositivo dinâmico não proporciona autonomia suficiente para permitir operação contínua em longos períodos. O motor elétrico utilizado neste estudo tem alto consumo de energia e o dispositivo *Scotch-yoke* pode sofrer fadiga com o tempo de uso, tornando o movimento da antena instável. Como foi verificado neste estudo, a deriva de frequência de varredura da antena pode prejudicar a recuperação de altura. Então espera-se que um dispositivo estático, com varredura virtual, elimine as inconveniências inerentes de um dispositivo móvel. Uma forma de se realizar GNSS-MR em varredura, sem utilizar dispositivo mecânico, seria através do emprego de uma matriz de sensores, assim como realizado por Purnell *et al.* (2021). Porém, diferente deste estudo que possibilitou apenas melhora de precisão, visamos melhorar resolução temporal utilizando uma matriz vertical de sensores. Neste caso, a varredura ocorreria através da leitura alternada entre os diversos sensores da matriz.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, Kenneth D. Determination of water level and tides using interferometric observations of GPS signals. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, [s. l.], v. 17, n. 8, p. 1118–1127, 2000.
- BENNETT, G. G. The Calculation of Astronomical Refraction in Marine Navigation. **Journal of Navigation**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 255–259, 1982.
- CHURCH, J. A. *et al.* **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- CONRAD, Jeff. Plot of atmospheric refraction vs. apparent altitude, using G.G. Bennett's 1982 formula. *In*: WIKIMEDIA COMMONS. 27 mar. 2011. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BennettAtmRefractVsAlt.png>. Acesso em: 7 set. 2021.
- ERTAN, Tunc *et al.* GNSS Multipath Mitigation using High-Frequency Antenna Motion. *In*: PROCEEDINGS OF THE 26TH INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS+ 2013), 2013, Nashville, TN. **Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013)**. Nashville, TN: [s. n.], 2013. p. 154–175.
- EVANILDO DA SILVEIRA. Um sinal do céu. **Revista Unesp Ciência**, [s. l.], v. 58, p. 26–29, 2014.
- FAGUNDES, M A R *et al.* An open-source low-cost sensor for SNR-based GNSS reflectometry: Design and long-term validation towards sea level altimetry. **GPS Solutions (accepted)**, [s. l.], p. 20, 2021.
- FRANÇA, Rovane Marcos de; KLEIN, Ivandro; VEIGA, Luis Augusto Koenig. THE INFLUENCE OF THE DEFLECTION OF THE VERTICAL ON GEODETIC SURVEYS IN BRAZIL. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [s. l.], v. 27, n. spe, p. e2021020, 2021.
- GEREMIA-NIEVINSKI, F. *et al.* SNR-based GNSS reflectometry for coastal sea-level altimetry: results from the first IAG inter-comparison campaign. **Journal of Geodesy**, [s. l.], v. 94, n. 8, p. 70, 2020.
- GLOBO.COM. Ressaca provoca estragos na orla de Niterói. Rio de Janeiro, 29 maio 2011. Disponível em: <http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2011/05/ressaca-provoca-estragos-na-orla-de-niteroi.html>. Acesso em: 14 jun. 2021.
- HOBIGER, Thomas; HAAS, Rudiger; LOFGREN, Johan. Software-Defined Radio Direct Correlation GNSS Reflectometry by Means of GLONASS. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [s. l.], v. 9, n. 10, p. 4834–4842, 2016.

JIN, Shuanggen; FENG, G.P.; GLEASON, S. Remote sensing using GNSS signals: Current status and future directions. **Advances in Space Research**, [s. l.], v. 47, n. 10, p. 1645–1653, 2011.

LARSON, K. M. *et al.* The accidental tide gauge: A GPS reflection case study from Kachemak Bay, Alaska. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 1200–1204, 2013.

LARSON, Kristine M.; LÖFGREN, Johan S.; HAAS, Rüdiger. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. **Advances in Space Research**, [s. l.], v. 51, n. 8, p. 1301–1310, 2013.

MARENGO, Jose *et al.* **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. [S. l.: s. n.], 2016.

MARTIN-NEIRA, Manuel. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to ocean altimetry. **ESA Journal**, [s. l.], v. 17, p. 331–355, 1993.

MARTIN-NEIRA, M. *et al.* The PARIS concept: an experimental demonstration of sea surface altimetry using GPS reflected signals. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 142–150, 2001.

MONICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2007.

NIEVINSKI, Felipe G.; LARSON, Kristine M. An open source GPS multipath simulator in Matlab/Octave. **GPS Solutions**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 473–481, 2014a.

NIEVINSKI, Felipe G.; LARSON, Kristine M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation—Part I: Formulation and Simulations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [s. l.], v. 52, p. 6555–6563, 2014b.

NIKOLAIDOU, Thalia. **Atmospheric delay modelling for ground-based GNSS reflectometry**. 2020. 137 f. PhD thesis - University of New Brunswick, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://unbscholar.lib.unb.ca/islandora/object/unbscholar%3A10426>.

PANY, T; EISSFELLER, B. Demonstration of a Synthetic Phased Array Antenna for Carrier/Code Multipath Mitigation. *In*: PROCEEDINGS OF THE 21ST INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS 2008), 2008, Savannah, GA. **Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)**. Savannah, GA: [s. n.], 2008. p. 663–668.

PEPPA, Ioulia; PSIMOULIS, P.; MENG, Xiaolin. Modelling antenna vibrations using the Signal-to-Noise Ratio (SNR) of GNSS signals. *In*: PROCEEDINGS OF THE 4TH JOINT INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DEFORMATION MONITORING (JISDM), 2019, Athens, Greece. **Anais [...]**. Athens, Greece: [s. n.], 2019.

PURNELL, David J. *et al.* **Precise water level measurements using low-cost GNSS antenna arrays**. [S. l.]: Physical: Geophysics, 2021. preprint. Disponível em: <https://esurf.copernicus.org/preprints/esurf-2020-108/>. Acesso em: 1 jun. 2021.

RIBOT, Miguel *et al.* Normalized GNSS Interference Pattern Technique for Altimetry. **Sensors**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 10234–10257, 2014.

STANDARDS AND SPECIFICATIONS FOR PRECISION SURVEYS. *In*: OGUNDARE, John Olusegun. **Precision Surveying**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2015. p. 47–86. *E-book*. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119147770.ch3>. Acesso em: 11 abr. 2018.

STOCKER, Thomas F.; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (org.). **Climate change 2013: the physical science basis; summary for policymakers, a report of Working Group I of the IPCC, technical summary, a report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail and frequently asked questions ; part of the Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. New York: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.

VAN DEN BREKEL, B.J.H.; VAN NEE, D.J.R. GPS multipath mitigation by antenna movements. **Electronics Letters**, [s. l.], v. 28, n. 25, p. 2286–2288, 1992.

WANG, Jin; ZHANG, Kai. Low-cost positioning with rotating antenna in constrained environment for global navigation satellite systems. **Electronics Letters**, [s. l.], v. 54, n. 1, p. 45–47, 2018.

WILLIAMS, S. D. P.; NIEVINSKI, F. G. Tropospheric delays in ground-based GNSS multipath reflectometry—Experimental evidence from coastal sites. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, [s. l.], v. 122, n. 3, p. 2310–2327, 2017.

ZAVOROTNY, Valery U. *et al.* 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, 2014.