

조위 변동성이 큰 연안 환경을 위한 GNSS-R 기반 조위 추정 기법의 타당성 평가

김수경[†], 고요한, 부성춘, 김수열

Feasibility Assessment of GNSS Reflectometry-Based Tide Estimation in Coastal Environments with Large Tidal Variability

Su-Kyung Kim[†] , Yo Han Ko , Sung Chun Bu , Suyeol Kim 

Satellite System Laboratory, LIG Nex1, Gyeonggi-do 13449, Korea

ABSTRACT

This study evaluates the performance of Global Navigation Satellites System, Reflectometry (GNSS-R)-based tide estimation techniques in coastal environments such as the Korean coastline, where the spatial and temporal variability of the sea level is large. GNSS-R estimates sea surface heights by analyzing multipath interference patterns in the signal-to-noise ratio (SNR) of GNSS signals. To enable the retrieval of sea level estimates with higher spatial and temporal resolution, several signal processing methods were applied, including a time-dependent phase model, optimal sliding-window spectral analysis, and multi-frequency consistency checking. The methods were tested at two coastal GNSS stations in the United States: CALC in Louisiana, which experienced Hurricane Harvey in 2017, and AT01 in Alaska, which was affected by a storm surge in 2019. GNSS-R-derived sea level estimates were compared with tide gauge observations at each site. At CALC, correlation coefficients reached 0.99 during the full period and 0.97 during the hurricane, with mean differences of 2.7 cm and 3.7 cm, respectively. At AT01, correlations were 0.96 and 0.87, with larger mean differences due to the spatial offset from the reference gauge. The results demonstrate that GNSS-R can effectively monitor tidal changes even during extreme weather conditions and can serve as a practical complement to traditional tide gauges. For implementation in Korea, further in-situ validation to account for local tidal characteristics, infrastructure compatibility, and vertical datum alignment should be performed.

Keywords: GNSS-reflectometry (GNSS-R), tide estimation, multipath interference, signal-to-noise ratio (SNR), storm surge monitoring

주요어: GNSS-Reflectometry (GNSS-R), 조위 추정, 다중경로 간섭, 신호대잡음비 (SNR), 폭풍 해일 모니터링

1. INTRODUCTION

해수면의 변화는 해양 재난 대응, 연안 항만 운영, 해양 인프라 설계, 조석 예보, 그리고 기후변화 분석에 이르기까지 다양한 분야에서 핵심적인 기초 정보로 활용된다. 특히 조위 정보는 선박의 안전한 항로 확보 (NOAA National Ocean Service 2024), 해수면 상승 추세 분석, 지반 침하 감지 (Qiao et al. 2022,

Wöppelmann & Marcos 2016) 등 국가 해양 관리에 있어 필수적인 역할을 수행하고 있다. 이러한 조위 정보를 안정적이고 장기적으로 제공하기 위해 설치된 조위 관측소는 수면의 변화를 고정된 기준점에서 연속적으로 측정하는 장비로, 평균 해수면, 최고 만조위 등의 수직 기준면을 정의하는 데에도 활용된다 (NOAA National Ocean Service 2024). 현재 우리나라는 국립해양조사원을 중심으로 약 50기의 조위관측소를 전국 연안에 설치·운영하

Received Sep 29, 2025 Revised Oct 09, 2025 Accepted Oct 14, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: sukyung.kim@lignex1.com



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고 있으며, 이들 관측소 대부분은 매 1분 간격의 고해상도 조위 데이터를 실시간으로 수집하고 있다 (KHOA 2024).

그러나 전통적인 조위계는 설치와 운영에 있어 여러 가지 기술적·환경적 한계를 갖고 있다. 대부분의 조위계는 부두, 방파제 등 기존 해안 구조물에 부착되어 설치되므로 부식에 취약한 해양 환경 속에서 센서 유지관리, 전력공급 서비스, 통신 장비 등의 운영 안정성을 확보하기 위해 정기적인 점검과 교체가 필요하다 (IOC 2016). 이러한 특성으로 인해 설치 및 운영·유지보수의 비용 부담이 상대적으로 큰 편으로 평가되며, 특히 접근성이 낮은 도서·외딴 해역에서는 전력·통신 인프라 확보와 부품 교체·정비가 어려워 기존 조위계의 운영 난도가 더 높다 (IOC 2016). 이와 유사한 사례로는 미국 알래스카 지역을 들 수 있는데, 이 지역은 조위관측소가 거의 설치되어 있지 않거나 간헐적으로만 운영되고 있다. 결빙, 조석 왜곡, 극지 기상 조건 등으로 인해 장비 운영 자체가 매우 어렵기 때문이며, 이로 인해 알래스카 연안의 상당수 지역에서는 정확한 수직 기준면이 정의되지 못하고 Global Navigation Satellites System (GNSS) 기반 고도정보와 해수면 간의 연결이 단절된 상황이 지속되고 있다 (AOOS 2016, Kim & Park 2019, Alaska DGGS 2025). 이러한 조위계의 한계는 단지 극지방이나 특수한 기후환경에 국한되지 않는다. 우리나라와 같이 짧은 공간 스케일에서 조위가 급변하는 구간이 많은 지역에서는 고밀도의 관측망 구축과 상시적 유지관리가 필수적이지만, 설치, 운영, 유지관리의 어려움이 따른다.

이러한 배경에서 최근 주목받고 있는 것이 GNSS-Reflectometry (GNSS-R)를 이용한 조위 관측이다. GNSS-R 기반 조위 관측은 Martin-Neira (1993)가 처음 제안한 개념으로, 해수면에서 반사된 위성 신호, 즉 다중경로로 인한 경로 지연이나 위상 변화를 분석하여 수면 높이 정보를 추정하는 기술이다. 다중경로는 반사 신호가 간접 경로를 따라 도달하면서 생기는 지연으로, 일반적인 GNSS 측위에서는 주요 오차 요인으로 간주된다. 그러나 GNSS-R에서는 이 반사 신호가 반사체의 물리적 정보를 담은 유효한 데이터로 해석되며, 반사 신호의 경로 지연 또는 수신 신호 강도 변화를 분석해 조위를 추정할 수 있다. GNSS-R을 이용한 조위 관측은 별도의 구조물이나 직접적인 해수면 접촉을 필요로 하지 않는 비접촉형 간접 조위 측정 방식으로, 기존 전통 조위계에 비해 구조적으로 간단하고 환경 내구성 측면에서도 우수하다 (Kim & Park 2019). 또한 방파제나 부두 등 기존 구조물에 의존하지 않고도 설치 및 관측이 가능하여, 설치 위치의 제약이 적고 초기 구축 비용도 상대적으로 경제적이다. 이러한 특성 덕분에 GNSS-R은 극한 기상 조건, 인프라 접근이 어려운 지역, 또는 기존 조위관측소의 설치 및 운영이 제한적인 지역에서 보완적이거나 대체 가능한 관측 시스템으로서 실용성과 확장 가능성이 크다.

GNSS-R 기반 수위 관측에 대한 연구는 1990년대 이후 다양한 환경과 기술 조건에서 꾸준히 발전해 왔다. Martin-Neira (1993)는 위성 신호의 반사 지연을 활용한 해수면 고도 추정 가능성을 최초로 제시하며 GNSS-R 개념의 기초를 마련하였고, Anderson (1994, 2000)은 signal-to-noise ratio (SNR) 상에서 나타나는 직접파와 반사파 간의 간섭 무늬를 분석하여, 추가 장비 없이 기준 측지용 GNSS 수신기만으로도 수위 관측이 가능한 방법을 제안

하였다. 이후 Larson et al. (2013a)은 SNR 기반 간섭 패턴 분석 기법을 적용해 풍랑이 강한 해역에서도 안정적인 수위 관측이 가능함을 입증하였으며, Kim & Park (2019)은 알래스카 연안에서의 GNSS-R 조석 분석을 통해 극한 기후 조건에서도 GNSS-R 기반 조위 관측소의 안정적인 운용 가능성을 제시하였다. 최근에는 Hu et al. (2024)에 의해 딥러닝 기반 신호처리 기법이 제안되는 등, GNSS-R 수위 추정의 정밀도 향상을 위한 다양한 연구들이 활발히 이루어지고 있다.

이 연구에서는 극한 연안 환경 조건에서의 GNSS-R 기반 수위 관측 가능성을 실증적으로 검토하였다. 위상 기반 반사고 추정의 체계적 오차를 효과적으로 보완할 수 있도록 GNSS-R 신호에 대한 대류권 지연 보정 절차를 적용하였으며, 최적의 프로세싱 원도우 설정 기법을 도입하여 조위 추정의 시간 및 공간 해상도를 향상하였다. 또한 복잡한 반사 환경에서도 조위 추정의 정밀도를 향상시키기 위하여 다주파 기반 일관성 검증 알고리즘을 적용하였다. 극한 연안 환경에서의 GNSS-R 기반 수위 관측 가능성을 실증적으로 확인하기 위하여 2017년 미국 텍사스 및 루이지애나 지역의 허리케인 Harvey와, 2019년 알래스카 서부 연안의 해안 폭풍 해일 사례를 대상으로 실험을 수행하였으며, 그 결과 GNSS-R 기반 조위계의 실용성과 확장 가능성을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 GNSS-R의 간접 특성과 이를 기반으로 조위 정보를 추정할 수 있는 이론적 배경 및 SNR 신호 처리 기법을 설명한다. 3장에서는 반사고 추정의 정확도 향상을 위한 시간 종속 위상 모델, 슬라이딩 원도우 기반 주파수 추정, 다주파 보정 등 다양한 개선 기법을 제시한다. 4장에서는 해당 기법들을 실제 해안 GNSS 관측소에 적용한 실험을 통해 GNSS-R 기반 조위 추정의 성능을 평가하고, 전통 조위계와의 비교 분석을 수행한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 주요 결과를 요약하고, 향후 국내 연안 적용을 위한 추가 과제를 제안한다.

2. INTERFERENCE ANALYSIS OF GNSS REFLECTED SIGNALS FOR TIDE LEVEL ESTIMATION

2.1 Interference Effects in GNSS Observables

GNSS 수신기는 위성에서 전파된 직접파뿐 아니라, 해수면이나 주변 구조물에서 반사되어 도달하는 반사파도 함께 수신하게 된다. 이로 인해 수신 신호에는 직접파와 반사파 간의 간섭 현상이 발생하며, 이는 다양한 GNSS 관측 변수에 영향을 미친다. 대표적으로 반송파 위상(carrier phase), 의사거리(pseudorange), 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR) 등의 항목에서 간섭으로 인한 변조가 관측된다. 이러한 관측값 중 의사거리나 위상 관측값은 수신기의 추적 루프가 일반적으로 가장 강한 신호, 즉 직접파에 잠금(lock-on)되도록 설계되어 있기 때문에, 반사파의 영향은 내부적으로 평균화되거나 필터링되는 경향이 있다. 그 결과 다중경로 간섭 효과는 뚜렷한 주기적 진동보다는 잔류 바이어스 또는 저주파 노이즈로 나타나는 경우가 많다 (Misra & Enge 2011, Bilich & Larson 2007). 반면, SNR은 직접파와 반사파의 전

력 합산 결과를 그대로 반영하므로, 간섭에 의한 진동이 위성 고도각에 따라 명확하게 나타난다 (Löfgren & Haas 2014). 이러한 특성 덕분에 SNR은 GNSS-R을 활용한 조위 관측에 가장 적합한 관측 변수로 평가된다.

실제로 초기 GNSS-R 기반 조위 관측 연구에서는 좌편원(LHCP) 및 우편원(RHCP) 안테나를 사용하여 반사파와 직접파를 분리 수신하고, 그 차이를 이용해 반송파 위상이나 의사거리 기반으로 수면 높이를 추정하려는 시도가 이루어졌다 (Löfgren et al. 2011). 그러나 위상 모호성 해소의 어려움, 수신기 성능 제약, 복잡한 후처리 등의 이유로 실용화에 한계가 있었고, 이에 따라 최근 연구들은 구조가 간단하면서도 간섭 패턴이 뚜렷하게 나타나는 SNR 기반 조위 추정 방법을 중심으로 발전하고 있다 (Larson et al. 2013b, Roussel et al. 2015).

2.2 SNR Interference Modeling and Reflector Height Estimation

GNSS-R 기반 조위 관측에서는 위성으로부터의 직접파와 해수면에서 반사된 반사파가 GNSS 수신기에 동시에 도달함으로써 간섭 현상이 발생한다. 이러한 간섭은 수신기 강도에 위상차 기반의 변조를 유발하며, SNR 신호에 주기적인 진동 형태로 나타난다. 이 진동 패턴은 수신기 안테나와 해수면 사이의 수직 거리인 반사고와 밀접한 관계가 있으며, 이를 이용하여 조위 변화를 추정할 수 있다.

수신된 신호의 총 전력 $P(e)$ 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P(e) = A_d^2 + A_r^2 + 2A_d A_r \cos \phi(e) \quad (1)$$

여기서 A_d 와 A_r 은 각각 직접파 및 반사파의 복소 진폭이며, $\phi(e)$ 는 위성 고도각 e 에 따른 위상차이다. 또한, 반사파는 위성 신호가 해수면에서 반사된 후 수신기에 도달하기 때문에, 직접파에 비해 더 긴 경로를 따라 전달된다. Fig. 1에 도시한 바와 같이, 반사파와 직접파의 경로는 수면을 기준으로 대칭 구조를 이루며, 수신기 안테나와 해수면 간의 수직 거리 h 및 위성의 고도각 e 에 따라 경로 차이 결정된다. 이 기하학적 배치를 기반으로 할 때, 두 신호 간 경로 차이 δ 는 식 (2)와 같이 근사할 수 있다.

$$\delta \approx 2h \sin e \quad (2)$$

여기서 h 는 안테나와 해수면 간의 수직 거리, 즉 반사고를 의미하며, λ 는 전파의 파장을 나타낸다. 식 (2)의 기하학적 관계를 고려하여 식 (1)의 위상차는 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\phi(e) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{4\pi}{\lambda} h \sin e \quad (3)$$

이와 같이 위상차 $\phi(e)$ 는 고도각의 사인값에 대해 선형적으로 변화하며, 이에 따라 SNR 신호는 $\cos \phi(e)$ 형태의 주기적 진동을 나타낸다. 이러한 진동은 고도각의 사인값을 독립변수로 하는 정현파로 표현될 수 있으며, 이때의 공간주파수 f 는 위상 함수의 기울기 즉, 미분을 통해 식 (4)와 같이 정의된다.

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi}{dx} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{4\pi h}{\lambda} = \frac{2h}{\lambda} \quad (4)$$

이는 SNR 신호에서 위상차에 따라 코사인 형태로 확인되는 진

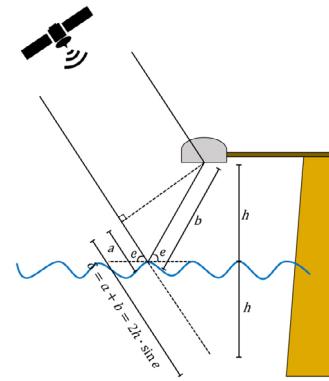


Fig. 1. Geometric configuration of direct and reflected GNSS signal paths for reflector height estimation (Kim & Park 2019).

동 성분이 고도각의 사인값에 대해 일정한 주기를 갖는 파형으로 나타남을 의미하며, 이러한 진동 주기는 위상 함수의 변화율로부터 정의되는 공간주파수에 의해 결정된다. 따라서 공간주파수 f 가 주어졌을 때, 반사고 h 를 식 (5)로 간단히 산출할 수 있다.

$$h = \frac{\lambda}{2} f \quad (5)$$

이러한 선형 관계를 바탕으로, 위상 진동의 주파수는 선형 추세가 제거된 SNR 데이터를 스펙트럼 분석함으로써 추정할 수 있으며, 이는 다시 안테나 높이로 환산될 수 있다. 그러나 식 (3)과 같은 선형 모델은 반사면이 이상적인 평면이고, 반사고가 일정 시간 동안 시간적으로 불변하다는 가정 하에 성립하는 1차 근사이다. 실제 해수면은 조석 및 기상 요인의 영향으로 지속적으로 변화하므로, 해당 모델은 현실적인 조건을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다. 특히 조차가 크거나 기상 변동성이 큰 지역에서는 이러한 단순 모델의 적용이 어렵다. 이러한 시간 종속성을 반영하기 위해, 식 (3)의 위상 함수를 시간에 종속적인 함수로 간주하면 식 (6)과 같이 시간 종속 위상 모델을 정의할 수 있다.

$$\phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} h(t) \sin e(t) \quad (6)$$

여기서 $h(t)$ 와 $e(t)$ 는 각각 시간에 따라 변하는 반사고 및 위성 고도각이다. 이때, 위상 함수의 미분은 식 (7)과 같이 유도된다.

$$\frac{d\phi}{d(\sin e)} = \frac{d\phi}{dt} / \frac{d(\sin e)}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\dot{h} \frac{\tan e}{\dot{e}} + h \right) \quad (7)$$

여기에서 \dot{h} 는 반사고의 시간 변화율, \dot{e} 는 고도각의 시간 변화율이다. 식 (7)은 시간 변화에 따른 반사고 변화를 고려한 보정 위상 변화율로 해석될 수 있으며, 괄호 안의 항은 유효 반사고 \bar{h} 로 식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$\bar{h} = \dot{h} \frac{\tan e}{\dot{e}} + h \quad (8)$$

따라서 최종 진동 주파수 f 는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$f = \frac{2}{\lambda} \bar{h} = \frac{2}{\lambda} \left(\dot{h} \frac{\tan e}{\dot{e}} + h \right) \quad (9)$$

각 전파 경로에 대한 진동 주파수, 즉 다중경로 주파수 f 가 정확히 산출되면, 식 (9)를 이용하여 정적 반사고 \bar{h} 를 계산할 수 있다. 이후, 최종적인 반사고 h 와 반사고의 시간 변화율 \dot{h} 은

Roussel et al. (2015)에서 제안한 방법을 바탕으로 산정할 수 있다. Roussel et al. (2015)은 특정 시점에서 가시 범위 내 모든 위성으로부터의 관측치를 활용하여, 최소자승법(Least Squares Method)을 통해 반사고와 그 변화율을 동시에 추정하는 기법을 제안하였다.

한편, 본 연구에서는 이러한 미지 파라미터 추정을 위해 칼만 필터 기반의 추정 기법을 적용하였다. 칼만 필터는 이전 시점에서 추정된 상태 변수값을 기반으로 현재 시점의 파라미터를 재귀적으로 갱신하는 방법으로, 시간적으로 연속적인 반사고 및 그 변화율을 안정적으로 추정할 수 있는 장점을 제공한다.

이와 같은 방식으로 시간 종속성을 고려하면, SNR 기반 주파수 추정 모델이 실제 해수면의 시간적 변동성을 보다 정확하게 반영할 수 있으므로, 우리나라 연안과 같이 고조 및 저조 변화가 큰 지역에서도 조위 추정의 정확도를 향상시킬 수 있다. SNR 신호 내 반사 신호로 인한 간섭 현상의 모델링 과정 및 관련 세부 이론에 대한 보다 구체적인 설명은 Larson et al. (2013a, 2017), Löfgren et al. (2014) 등의 선행 연구를 통해 확인할 수 있다.

3 REFINEMENTS TO THE REFLECTOR HEIGHT RETRIEVAL MODEL

기존 SNR 기반 반사고 추정 기법은 위성 고도각에 따른 위상 진동 주파수를 기반으로 단순한 선형 모델을 적용하여 해수면 높이를 산정할 수 있다. 그러나 실제 적용에서는 다양한 환경 요인과 시스템 제약으로 인해 주파수 추정 정확도 및 반사고 산정 신뢰도에 한계가 존재한다.

이에 따라 본 절에서는 이러한 오차 요인을 최소화하고, 실제 연안 환경에서 보다 안정적이고 정밀한 조위 추정을 가능하게 하기 위해 본 연구에서 추가적으로 적용한 보정 및 개선 기법들을 소개한다. 구체적으로는 (1) 대류권 지연 효과를 반영한 간접 보정 기법, (2) 조위 변화에 따른 진동 주파수의 시간 종속성을 고려한 최적 슬라이딩 윈도우 기반의 국소 주파수 추정 기법, (3) 동일 위성에서 수신된 다주파 신호 간의 반사고 일관성을 활용한 주파수 선택 보정 기법을 적용하였다.

3.1 Tropospheric Effect Correction

GNSS-R 기반 조위 추정에서 대류권 지연은 위상 기반 반사고 산출에 체계적인 척도 오차를 유발하는 주요 원인 중 하나이다. Williams & Nievinski (2017)는 전 세계 해안 GNSS 관측소를 대상으로 한 분석을 통해, 대류권 지연 보정을 생략할 경우 조위 진폭이 약 2% (2 cm/m) 작게 추정됨을 확인하고, 반사고의 정확한 산출을 위해 반드시 고려되어야 함을 제시하였다. 본 연구에서도 이러한 지연을 보정하기 위해, 건조 및 습윤 성분의 천정 지연을 각각 계산한 후 위성 고도각에 따른 사영 함수를 적용하여 시선 방향 지연을 산출하였다.

대류권 지연은 수신기 높이와 해수면 간의 천정 방향 지연 차이에 기반하며, 위성 신호가 해수면까지 도달한 후 반사되어 수신기로 되돌아오는 왕복 경로를 고려하면 전체 지연은 식 (10)과

같이 표현된다.

$$\tau_T = 2\Delta\tau_h^Z \cdot m_h(e) + 2\Delta\tau_w^Z \cdot m_w(e) \quad (10)$$

여기서 τ_T 는 시선 방향의 총 대류권 지연, $\Delta\tau^Z = \tau^Z(-h) - \tau^Z(0)$ 는 안테나와 수면 간의 천정 지연 차이이며, $m_h(e)$, $m_w(e)$ 는 각각 건조 및 습윤 지연에 대한 사영 함수이다. 앞서 식 (3)에서 설명한 바와 같이 위상 함수는 고도각의 사인값에 대해 선형적으로 변화하며, SNR 진동도 이에 따른 주기성을 갖는다. 따라서 대류권 지연이 SNR 위상 진동에 미치는 영향을 반사고 관점에서 분석하기 위해, 식 (10)을 고도각의 사인값에 대해 미분한 보정량 h_T 는 식 (11)과 같이 정의되며,

$$h_T = \frac{1}{2} \frac{d\tau_T}{d \sin e} \quad (11)$$

식 (11)을 시간 종속 보정항을 고려하는 식 (8)에 적용하여 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$\bar{h} = h \frac{\tan e}{\dot{e}} + h + h_T \quad (12)$$

본 연구에서는 천정 지연의 건조 및 습윤 성분을 계산하기 위해 Saastamoinen 모델 (Saastamoinen 1973)을 기반으로 한 UNB3 모델 (Leandro et al. 2006)을 적용하였다. UNB3는 기상관측 없이도 예측된 기상자료를 기반으로 작성된 참조표를 통해 시간과 위치에 따른 보다 현실적인 기상 변수를 제공한다는 점에서, 고정된 기상 상수를 사용하는 기존 모델에 비해 실제 환경 조건을 더 잘 반영할 수 있다. 한편, 시선 방향 사영을 위한 사영 함수로는 Boehm et al. (2006)이 제안한 Global Mapping Function (GMF)를 적용하였다. GMF는 Vienna Mapping Function (VMF)를 기반으로 개발되었으며, 기상자료 없이도 ECMWF 수치예보 데이터를 활용하여 변환 계수를 독립적으로 결정할 수 있어, 기상자료 접근이 제한된 해안 GNSS 관측소에서 유용하게 활용된다.

3.2 Determination of Optimal Sliding Window for Reliable Frequency Retrieval

GNSS-R 기반 조위 추정에서 해수면의 시간적 변동을 고해상도로 모니터링하기 위해, 본 연구에서는 슬라이딩 윈도우 기반의 스펙트럼 분석 기법을 적용하였다. 이 방식은 연속적인 SNR 데이터를 일정 간격의 윈도우로 분할하고, 각 구간에서 주기 성분을 추정함으로써 반사고를 시간적으로 연속적으로 산출할 수 있도록 한다.

슬라이딩 윈도우는 슬라이딩 간격과 윈도우 폭의 두 가지 주요 매개변수로 정의된다. 슬라이딩 간격은 반사고를 추정하는 연속 시점 간의 시간 간격을 의미한다. 이 간격은 GNSS 수신기의 데이터 샘플링 간격 수준까지 줄일 수 있으며, 더 짧은 간격을 적용할수록 해수면의 빠른 변화를 정밀하게 추적할 수 있다. 짧은 슬라이딩 간격은 다소 계산 로드를 증가시킬 수는 있지만, 고시간 해상도의 조위 모니터링이 요구되는 환경에서는 매우 효과적인 추정 전략이 될 수 있다. 한편, 윈도우 폭은 각 시점에서 주파수 분석에 사용되는 SNR 데이터의 시간 구간 길이를 의미한다. 이는 다중경로 간섭으로 인한 진동 주파수를 안정적으로 추정할 수 있을 만큼 충분히 커야 하지만, 지나치게 길 경우 해수면의 급

격한 변화가 평균화되어 조위 변동을 적절히 반영하지 못할 수 있으며, 급격한 조위 변화가 발생하는 환경에서 시간 응답성을 저하시킬 수 있다. 특히, 조위의 빠른 변화가 나타나는 악천후나 극한 연안 환경에서는 짧은 시간 내의 변화를 민감하게 포착하는 것이 중요하므로, 적절한 윈도우 폭의 설정은 정밀도와 반응성 간의 균형을 결정짓는 핵심 요소가 된다. 이러한 고려는 일일 조차가 크고 조석 변동성이 높은 우리나라 연안과 같은 환경에서 GNSS-R 기반 조위 추정의 실효성을 확보하는 데 매우 중요하다. 본 연구에서는 계산 효율성과 실시간 처리 가능성을 모두 고려하였다. 각 슬라이딩 윈도우 내에서 반사고의 시간 변화율 \dot{h} 은 무시하고 정적인 반사고를 가정하였다. 이는 각 분석 구간 내에서 반사고가 급격히 변하지 않는다는 전제 하에, 처리 속도를 높이고 알고리즘 구조를 단순화하기 위한 선택이다. 대신, 다중경로 간섭 패턴이 명확하게 나타나고, 신뢰성 있는 주파수 추정이 가능할 정도의 최소 분석 구간을 기준으로 윈도우 폭을 설정하였다. 이 기준은 SNR 신호 내에서 우세 주파수가 안정적으로 식별될 수 있을 만큼의 데이터 길이를 확보하는 것을 목표로 하며, 주파수 스펙트럼의 분해능을 확보함과 동시에 출력의 시간 해상도를 최대한 유지할 수 있도록 조절된다.

윈도우 폭을 정량적으로 결정하기 위해, 반사고의 물리적 범위를 기반으로 다중경로 간섭에 따른 주파수의 유효 범위를 먼저 산정하고, 이를 통해 주파수 추정에 필요한 최소 데이터 길이를 도출하는 방식을 적용하였다. 반사고의 최소 및 최대 값을 \bar{h}_{\min} , \bar{h}_{\max} 라 할 때, 이들에 대응되는 주파수 범위 f_{\min} , f_{\max} 는 식 (9)에 따라 식 (13)과 같이 계산된다:

$$f_{\min} = \frac{2\bar{h}_{\min}}{\lambda} \text{ and } f_{\max} = \frac{2\bar{h}_{\max}}{\lambda} \quad (13)$$

이어서 반사고의 범위에 따라 결정된 주파수 범위와 스펙트럼 분석을 통해 주파수를 안정적으로 추정하기 위해 필요한 최소 요구 진동수 N_0 를 이용하면, 윈도우 내 고도각의 사인값 변화 범위, 즉, 윈도우 폭 $\Delta \sin e$ 의 범위를 식 (14)와 같이 추정할 수 있다.

$$\frac{N_0}{f_{\max}} \leq \Delta \sin e \leq \frac{N_0}{f_{\min}} \quad (14)$$

따라서, 식 (14)의 범위 내에서 윈도우 폭을 설정함으로써, 최소 N_0 개의 주기성이 확보되도록 보장하면서도 반사고의 실제 범위에 기반한 유효 주파수 추정이 가능해진다고 할 수 있다.

본 연구에서는 주파수 스펙트럼의 분해능을 최대화하고, 진동 주기의 안정적인 확보를 우선적으로 보장하기 위해, 식 (15)와 같이 식 (14)의 범위 중 가장 보수적인 조건으로 최종 윈도우 폭을 결정하였다. 이 값은 반사고가 가능하게 나타날 경우(즉, 해수면이 가장 높은 경우)를 가정한 주파수에 해당하며, 주어진 N_0 주기를 안정적으로 확보할 수 있는 최대 윈도우 폭을 의미한다. 이러한 설정은 다중경로 패턴이 불규칙하거나 약하게 나타나는 환경에서도 신뢰도 높은 주파수 추정을 가능하게 한다.

$$\Delta \sin e = \frac{N_0}{f_{\min}} \quad (15)$$

3.3 Multipath Frequency Correction via Multi-Frequency Height Consistency Check

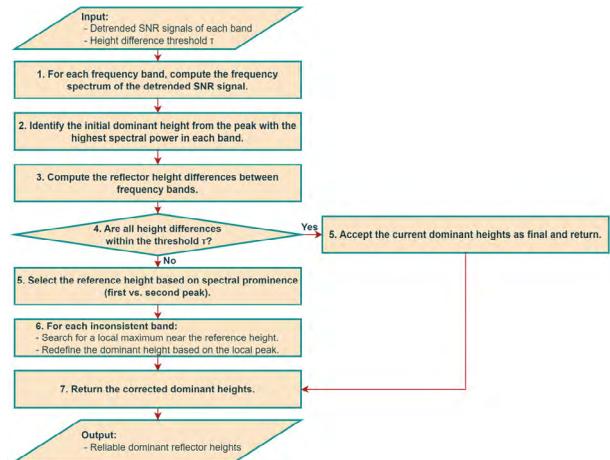


Fig. 2. Flowchart of the multi-frequency consistency check algorithm for multipath frequency correction.

SNR 신호에서 나타나는 진동 주파수는 해수면 기준 안테나 높이와 선형적인 관계를 가지며, 이를 통해 해수면 높이를 간접적으로 추정할 수 있다. 따라서 해수면 반사에 의한 진동 중에서 우세 주파수를 정확히 판별하는 것은 조위 산정의 정밀도를 결정짓는 핵심 요소이다. 그러나 실제 해양 환경에서는 해수면의 거칠기, 강한 조류, 풍랑 등의 외부 요인과 더불어 GNSS 안테나 주변 구조물에 의한 다중 반사 등으로 인해 스펙트럼 내에 복수의 피크가 발생하게 된다. 이로 인해 해수면에서 반사된 신호가 아닌, 기타 반사체에 의한 간섭 성분과의 구분이 어려워지며, 잘못된 주파수를 선택할 가능성이 높아진다. 특히 해수면 가까이에서 예상치 못한 반사가 발생하는 경우, 주파수 선택의 불확실성은 더욱 증가하게 된다.

이에 본 연구에서는 동일 위성에서 송신되는 다주파 신호가 동일한 전파 경로를 따라 도달한다는 특성을 활용하여, 다주파 기반 겸중 방식을 본 조위 추정 알고리즘에 적용하였다. 이 방식은 각 주파수 대역에서 독립적으로 산출된 반사고의 일치성을 검토함으로써, 잘못된 피크 선택으로 인한 주파수 추정 오류를 보정하는 것을 목표로 한다. 전체 알고리즘의 절차는 Fig. 2에 도시하였다.

우선, 각 주파수 대역의 SNR 신호에 대해 주파수 스펙트럼을 계산하고, 최대 피크의 파워를 기준으로 초기 우세 주파수를 설정한다. 이후 동일 위성으로부터 수신된 다주파 신호 간의 반사고 차이를 계산하고, 이 차이가 사전에 정의된 임계값 이하인 경우, 해당 주파수를 최종 결과로 채택한다. 반면, 특정 대역의 반사고가 다른 대역과 일치하지 않을 경우에는, 스펙트럼 내 피크 간 파워의 차이를 활용하여 가장 신뢰도 높은 참조 높이를 설정한 뒤, 신뢰도가 낮은 주파수 대역에 대해서는 해당 참조 높이 인근의 로컬 최대값을 탐색하여 우세 주파수를 재설정한다. 이 알고리즘은 단순히 개별 대역의 피크 파워만을 기준으로 삼는 것보다, 다주파 신호 간의 상호 일관성을 기반으로 하므로, 복잡한 반사 환경에서도 보다 신뢰성 높은 결과를 도출할 수 있다.

실제 적용 사례로서, Fig. 3은 동일한 GPS 위성으로부터 수신된 L1, L2, L5 신호에 대한 스펙트럼 분석 결과를 보여준다. L1 신

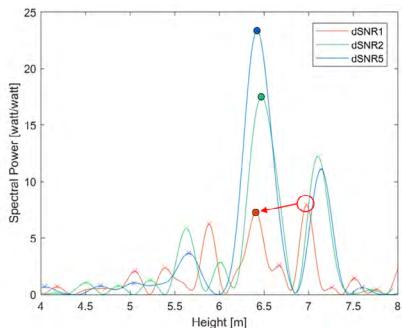


Fig. 3. Example of multipath frequency correction performed using the algorithm described in Fig. 2.

호에서는 약 7 m 부근에서 최대 피크가 검출된 반면, L2 및 L5 신호에서는 약 6.5 m에서 일치하는 강한 피크가 확인되었다. 이러한 불일치는 L1 대역의 초기 주파수 선택이 잘못되었을 가능성을 시사한다. 따라서 본 알고리즘에 따라 첫번째, 두번째 우세 피크 파워의 차이가 가장 크게 나타나는 L5 대역이 참조 높이로 설정되었으며, 이를 기준으로 L1 대역의 스펙트럼에서 6.6 m 인근의 로컬 최대값을 재탐색하여 최종적으로 세 대역 간 일관성을 확보한 반사고 추정이 이루어졌다.

이와 같이, 동일 위성의 다주파 신호를 활용한 주파수 교차 검증 절차는 주파수 선택 오류를 효과적으로 보완하고, 조위 추정의 신뢰도를 높이는 데 기여할 수 있다. 특히 극한 기상 조건이나 반사 환경이 복잡한 연안 지역에서도, 본 기법은 안정적인 반사고 추정을 가능하게 하여 조위 변화가 심한 우리나라 연안에서 GNSS-R 기반 조위 관측의 실용성과 적용 범위를 확장하는 데 유용하다.

4. EXPERIMENTAL EVALUATION OF TIDE LEVEL RETRIEVAL FROM GNSS REFLECTED SIGNALS

이번 장에서는 2장과 3장에서 제안한 GNSS-R 기반 조위 추정 알고리즘을 실제 GNSS 관측 데이터에 적용하여, 다양한 환경에서의 성능을 검증하였다. 실험은 미국 내 서로 다른 조건을 가진 두 개의 해안 GNSS 관측소(CALC, AT01)를 대상으로 수행되었으며, 각 관측소의 GNSS-R 기반 조위 시계열을 산출한 후 인근 조위계의 자료와 비교하여 알고리즘의 정확성과 적용 가능성을 평가하였다.

4.1 Experimental Sites and Data Overview

CALC 관측소는 미국 루이지애나 주에 위치한 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)의 National Water Level Observation Network (NWLON) 센터널 스테이션 (ID: 8768094) 내에 설치되어 있다 (Fig. 4). NWLON 센터널 스테이션은 허리케인과 같은 극심한 기상 재해 상황에서도 안정적으로 운영될 수 있도록 철제 구조물 기반의 타워 형식으로 설계되



Fig. 4. Photos of GNSS-R experimental stations installed at coastal sites with open visibility to the sea surface: (left) CALC station in Louisiana, (right) AT01 station in Alaska.

어 있으며, 수위 및 풍속에 대한 중요한 정보를 실시간으로 제공함으로써 긴급 대응 기관의 의사 결정에 핵심적인 역할을 수행한다 (NOAA 2024). 또한, Fig. 4에서 확인되는 바와 같이 NWLON 센터널 스테이션은 전 방향(360°)으로 바다가 탁 트인 시야를 확보할 수 있도록 구성되어 있어, GNSS-R 기반 조위 추정에 필수적인 해수면 반사 신호의 안정적인 수신 환경을 제공한다. CALC는 NOAA National Geodetic Survey (NGS)에서 운영하는 상시 GNSS 관측소로, 관측 장비는 Trimble 57971 Zephyr GNSS Geodetic II 안테나와 Trimble NetR9 수신기로 구성되어 있으며, GPS, GLONASS, Galileo 위성 신호를 수신할 수 있다. 본 연구에서는 2017년 8월 14일부터 9월 8일까지 수집된 SNR 데이터를 기반으로 조위 추정 실험을 수행하였다. 해당 기간은 허리케인 Harvey가 루이지애나 해안에 상륙하여 조위가 급격히 상승하고 해안 침수 피해가 발생한 시기로, 극한 기상 조건에서도 GNSS-R 알고리즘이 유효하게 작동하는지를 검증하기 위해 실험 대상으로 선정되었다. 또한, GNSS-R 기반 추정값의 타당성을 평가하기 위해서 CALC 관측소와 동일한 NWLON 센터널 스테이션 내에 설치된 전통 조위계의 실측 수위 자료를 비교 기준으로 활용하였다.

AT01 관측소는 미국 알래스카 주 St. Michael에 위치한 관측소로, UNAVCO에서 운영하는 Permanent GNSS Stations for Geodynamics (PBO) 네트워크의 일환으로 GNSS-R을 활용한 조위 관측 가능성을 검토하기 위해 특별히 설계된 관측소이다. 이에 따라 AT01 관측소는 해안을 향한 방위각 0°부터 230°까지의 넓고 개방된 시야를 확보하고 있어 해수면에서 반사되어 들어오는 위성 신호를 안정적으로 수신할 수 있는 환경을 갖추고 있음을 Fig. 4를 통해 확인 가능하다. AT01 관측소에는 Trimble 159800 초크링 안테나와 Septentrio PolaRx5 수신기가 구성되어 있으며, 이를 관측 장비는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou 위성의 신호를 모두 수신 가능하다. 따라서 본 연구에서도 수신 가능한 모든 다중 GNSS 신호를 분석에 활용하여 시간 및 공간 해상도가 높은 조위값을 산출할 수 있도록 하였다. 2019년 1월 26일부터 2월 20일까지 약 한 달간 수집된 SNR 데이터를 기반으로 조위 추정 실험을 수행하였으며, 분석 기간 중 2월 12일에는 알래스카 서해안에 폭풍해일이 발생하였다. 본 연구에서는 폭풍해일이라는 극한 조건에서도 GNSS-R 알고리즘이 견고하게 작동하는지를 검증하기 위해 해당 시기를 실험 기간으로 포함하였다. 조위 추정 결과의 검증을 위해 AT01에서 약 1.5 km 떨어진 St. Michael 조위계 (ID: 9468132)의 활용을 고려하였으나, 알래스카의 극한 환경으로 인해 현재 운영되고 있지 않아 실제 수위 측정값을 제공하지 않

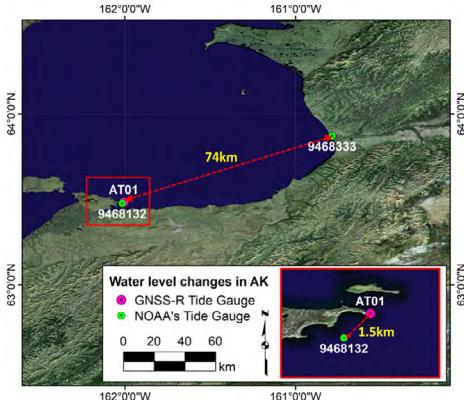


Fig. 5. Map showing the location of the AT01 station and two nearby tide gauges: St. Michael (1.5 km, not used due to unavailable data) and Unalakleet (74 km, used for validation).

았다. 이에 따라 약 74 km 떨어진 Unalakleet 조위계(ID: 9468333)의 실측 조위 데이터를 기준으로 GNSS-R 기반 조위 결과의 정성적 타당성을 평가하였다 (Fig. 5).

4.2 Tide Estimation and Validation Results

GNSS-R 기반 조위계의 성능을 검증하기 위해, 전통 조위계의 실측 자료와 비교를 수행하였다. Fig. 6은 CALC(상단) 및 AT01(하단) 관측소에서의 GNSS-R 기반 추정 조위(빨간 점)와 비교 조위계 실측값(파란 점)을 시간 축에 따라 함께 도시한 결과이다. 두 관측소 모두에서 GNSS-R 기반 조위계는 실측 조위의 주기성과 기상 사건에 의한 급격한 변화 패턴을 안정적으로 추적하였다. 특히 CALC의 경우, 허리케인 Harvey의 영향으로 발생한 급격한 수위 상승이 GNSS-R 결과에 명확히 반영되었으며, 고조 및 저조 시점에서도 전반적으로 높은 일치도를 보였다. 한편, AT01 관측소에서는 약 74 km 떨어진 Unalakleet 조위계와의 비교를 통해 정성적 검증을 수행하였음에도 불구하고, 전체 기간 동안 전반적인 조위 변화 추세가 유사하게 나타났다. 다만, 폭풍 해일 발생 시기에는 두 관측소 간 거리로 인해 일부 시점에서 조위의 불일치가 발생하였고, 특히 극값의 크기와 시점에서 다소 차이가 관찰되었다.

정량적 분석을 위해, GNSS-R 기반 조위값과 조위계 실측값 간의 산점도 분석을 수행하였으며, 전체 분석 기간과 이벤트 기간의 상관계수를 각각 산출하였다 (Figs. 7, 8). CALC의 경우 전체 기간 동안 상관계수 0.99로 매우 높은 상관성을 보였으며, 허리케인 기간에도 0.97로 매우 높은 수준을 유지하였다 (Fig. 7). AT01에서는 전체 기간 동안 0.96, 폭풍 해일 기간 동안에는 0.87로 상대적으로 낮게 계산되었는데 (Fig. 8), 이는 비교 조위계가 원거리(74 km)에 위치함에 따라 이벤트 기간 동안 지역 간 수위 차이의 영향이 반영된 결과로 해석할 수 있다 (Fig. 5).

조위차에 대한 통계적 분석도 추가로 수행하였다. CALC에서는 전체 기간 동안 GNSS-R과 비교 조위계 사이의 평균 조위 차이가 2.7 cm, RMS는 3.8 cm였으며, 이벤트 기간 중에는 평균 조위차 및 RMS가 각각 3.7 cm, 5.5 cm로 소폭 증가하였다. 반면,

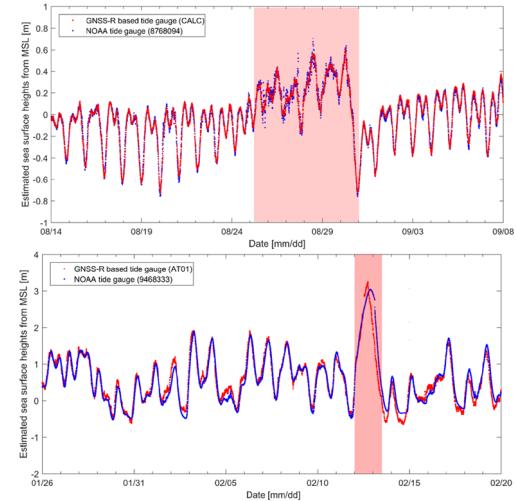


Fig. 6. Time series of GNSS-R-derived sea surface heights and tide gauge observations used for validation (co-located at CALC; 74 km distant at AT01). Red boxes highlight the event periods: Hurricane Harvey at CALC (top), storm surge at AT01 (bottom).

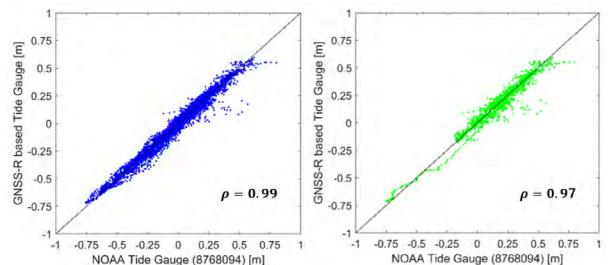


Fig. 7. Correlation analysis between GNSS-R-derived sea surface heights from the CALC station and tide gauge observations from the same NWLON sentinel station: (left) full analysis period, (right) event period during Hurricane Harvey.

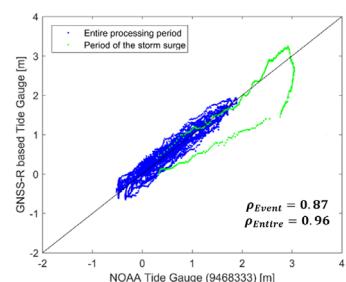


Fig. 8. Correlation analysis between GNSS-R-derived sea surface heights at AT01 and tide gauge observations from Unalakleet (74 km away). The plot includes both the full analysis period and the storm event period, distinguished by color.

AT01에서는 전체 기간 평균 조위 차이가 14.0 cm, 이벤트 기간 동안에는 41.0 cm로, RMS 20.0 cm에서 54.0 cm로 큰 폭으로 증가하였다. 이와 같이 AT01 사이트에서 이벤트 기간 동안 확인된 조위 차이값 증가는 GNSS-R의 성능 문제로 해석하기보다는 관측소 간 물리적 거리로 인한 구조적인 오차 증가로 설명된다.

이와 같이 두 사이트에서 진행된 실험 결과는 제안된 GNSS-R 기반 조위 추정 알고리즘이 다양한 환경에서 유효하게 작동하며, 특히 허리케인 및 폭풍 해일과 같은 극한 연안 환경 조건에서도 조위 변화를 안정적으로 추적할 수 있음을 입증한다.

5. SUMMARY AND CONCLUSION

본 연구는 우리나라 연안과 같이 조위의 시간적 · 공간적 변동성이 큰 해양 환경에서, GNSS-R을 활용한 조위계의 적용 가능성을 평가하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 GNSS 수신기의 SNR 신호에 포함된 다중경로 간섭 패턴을 분석하여, 해수면 높이를 고해상도로 추정할 수 있는 다양한 신호처리 기법을 적용하였으며, 산출된 조위값을 기준 조위계의 실측값과 비교하여 정량적 성능 분석을 수행하였다.

고해상도 조위값 산출을 위해, 반사면의 시간적 변동성을 반영한 시간 종속 위상 모델을 도입하고, 칼만 필터를 적용하여 추정값의 시간 연속성을 확보하였다. 또한 실제 조위 변동에 민감하게 반응할 수 있도록 최적 슬라이딩 윈도우 기반의 주파수 분석 기법을 활용하였으며, 다중 GNSS 주파수 대역 간 반사고의 일관성을 검토함으로써 주파수 선택 오류를 최소화하였다.

이러한 기법들을 실제 관측 환경에 적용하기 위해, 미국 내 서로 다른 환경 조건을 가진 두 개의 해안 GNSS 관측소(CALC, AT01)를 대상으로 실험을 수행하였다 (Fig. 4). CALC 관측소에서는 허리케인 Harvey 상륙이라는 극한 기상 조건을 포함한 기간 동안, AT01 관측소에서는 알래스카 연안의 폭풍 해일 발생 시기를 중심으로 GNSS-R 기반 조위 추정을 수행하였다. 실험 결과, GNSS-R 기반 조위 추정값은 전통 조위계의 실측값과 전반적으로 높은 상관성을 보였으며, 특히 CALC에서는 전체 기간 상관계수 0.99, 이벤트 기간 중 0.98를 기록하여 매우 우수한 일치도를 나타냈다. AT01의 경우에도 전체 기간 상관계수 0.96을 보였으며, 비록 이벤트 기간에는 0.87로 다소 감소하였지만, 이는 GNSS 수신기와 조위계 간 거리(약 74 km)에 기인한 구조적인 차이로 해석된다.

이상의 결과는 GNSS-R 기반 조위 추정 기법이 실제 해안 환경, 특히 극한 기상 조건에서도 신뢰도 높은 결과를 제공할 수 있음을 실증적으로 보여준다. 특히 고해상도 조위 데이터 확보가 어려운 극지방, 도서 해역, 인프라 취약 지역은 물론, 조위의 공간적 · 시간적 변화가 큰 우리나라 연안과 같은 환경에서는 GNSS-R 기반 조위계가 전통적인 방식의 보완 또는 대체 수단으로서 실용성과 확장 가능성을 갖춘 기술로 평가된다.

향후 연구에서는 GNSS-R 기반 조위 추정의 적용 범위를 더욱 확장하기 위해, 다양한 위성 신호 조합, 반사면 상태 추정 기법, 머신러닝 기반의 품질 판별 알고리즘 등을 접목한 고도화된 분석 기법 개발이 필요하다. 또한, GNSS-R 기반 조위값과 전통 조위계 간의 수직 기준면 차이 문제를 정량적으로 분석하고, 이를 보정할 수 있는 기준면 정합 절차의 정립이 요구된다. 아울러, 본 연구의 실험 대상이 해외 관측소에 국한되었다는 점을 고려할 때, 우리나라 연안 환경에서의 적용 가능성을 평가하기 위한 후속 연구가 반드시 필요하다. 특히, 한반도 연안에 설치된 해안 GNSS

관측소 및 조위계로부터 실측 데이터를 수집 · 분석하고, 조석 특성과 해안 구조물 조건 등을 반영한 지역 맞춤형 성능 검증을 수행함으로써, GNSS-R 기반 조위 추정 기술의 국내 적용 가능성을 심층적으로 평가할 필요가 있다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, S.-K. Kim; investigation, S.-K. Kim; resources, S.-K. Kim; writing—original draft preparation, S.-K. Kim; writing—review and editing, S.-K. Kim, Y.H. Ko, S.C. Bu, S. Kim; visualization, S.-K. Kim, S. Kim; supervision, S.-K. Kim, Y.H. Ko; project administration, Y.H. Ko, S.C. Bu; funding acquisition, Y.H. Ko, S.C. Bu

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Anderson, K. D. 1994, Tropospheric refractivity profiles inferred from low elevation angle measurements of Global Positioning System (GPS) signals, in Proceedings of the AGARD Conference the Sensor and Propagation Panel Symposium (Bremerhaven, Germany: AGARD), September 19-22, 1994.
- Anderson, K. D. 2000, Determination of water level and tides using interferometric observations of GPS signals, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17, 1118-1127. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<1118:DWLAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<1118:DWLAT>2.0.CO;2)
- AOOS (Alaska Ocean Observing System). 2016, *Coastal Nearshore Water Level Observations in Alaska: Challenges, Assets, Gaps, and Next Steps*, ver.1.0. Retrieved from <https://aoos.org/wp-content/uploads/2016-Alaska-Water-Level-Observations-report.pdf>
- Alaska DGGs (Division of Geological & Geophysical Surveys). 2025, *Alaska Tidal Datum Portal*. Retrieved from <https://dggs.alaska.gov/hazards/coastal/ak-tidal-datum-portal.html>
- Bilich, A. & Larson, K. M. 2007, Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR), *Radio Science*, 42, RS6003. <https://doi.org/10.1029/2007RS003652>
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H. 2006, Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophysical Research Letters*, 33, L07304. <https://doi.org/10.1029/2005GL024004>

- org/10.1029/2005GL025546
- Hu, Y., Tian, A., Yan, Q., Liu, W., Wickert, J., et al. 2024, Advancing Accuracy in Sea Level Estimation with GNSS-R: A Fusion of LSTM-DNN-Based Deep Learning and SNR Residual Sequences, *Remote Sensing*, 16, 1874. <https://doi.org/10.3390/rs16111874>
- IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission). 2016, Manual on Sea Level Measurement and Interpretation, Volume III. Retrieved from https://www.pacioos.hawaii.edu/wp-content/uploads/2016/08/Manual_On_Sea_Level_Measurement_and_Interpretation_Volume_III.pdf
- KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency). 2024, KHOA Ocean Observation Network Real-Time Data Service. Retrieved from https://www.khoa.go.kr/oceangrid/koofs/kor/observation/obs_real.do
- Kim, S.-K. & Park, J. 2019, Monitoring Sea Level Change in Arctic using GNSS-Reflectometry, in Proceedings of the 2019 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Reston, Virginia, 28-31 January 2019, pp.665-675. <https://doi.org/10.33012/2019.16717>
- Larson, K. M., Löfgren, J. S., & Haas, R. 2013a, Coastal Sea Level Measurements Using a Single Geodetic GPS Receiver, *Advances in Space Research*, 51, 1301-1310. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.017>
- Larson, K. M., Ray, R. D., Nievinski, F. G., & Freymueller, J. T. 2013b, The accidental tide gauge: A GPS reflection case study from Kachemak Bay, Alaska, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10, 1200-1204. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2236075>
- Larson, K. M., Ray, R. D., & Williams, S. D. P. 2017, A 10-year comparison of water levels measured with a geodetic GPS receiver versus a conventional tide gauge, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 34, 295-307. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0101.1>
- Leandro, R., Santos, M., & Langley, R. B. 2006, UNB neutral atmosphere models: Development and performance, in Proceedings of ION GNSS 2006 (Fort Worth, TX: ION).
- Löfgren, J. S. & Haas, R. 2014, Sea level measurements using multi-frequency GPS and GLONASS observations, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014, Article number: 50. <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2014-50>
- Löfgren, J. S., Haas, R., & Scherneck H. G. 2014, Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS sites in different parts of the world, *Journal of Geodynamics*, 80:66-80. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.02.012>
- Löfgren, J. S., Haas, R., Scherneck, H.-G., & Bos, M. S. 2011, Three months of local sea level derived from reflected GNSS signals, *Radio Science*, 46, RS0C05. <https://doi.org/10.1029/2011RS004693>
- Martin-Neira, M. 1993, A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry, *ESA Journal*, 17, 331-355.
- Misra, P. & Enge, P. 2011, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Rev. 2nd ed. (Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press).
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2024, National Water Level Observation Network (NWLON). Retrieved from <https://tidesandcurrents.noaa.gov/nwlon.html>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) National Ocean Service. 2024, What is a tide gauge? Retrieved from <https://oceanservice.noaa.gov/facts/tide-gauge.html>
- Qiao, X., Chu, T., Tissot, P., Louis, J., & Ali, I. 2022, Land subsidence estimation with tide gauge and satellite radar altimetry measurements along the Texas Gulf Coast, USA, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 3007905. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3194108>
- Roussel, N., Ramillien, G., Frappart, F., Darrozes, J., Gay, A., et al. 2015, Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver, *Remote Sensing of Environment*, 171, 261-277. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.011>
- Saastamoinen, J. 1973, Contributions to the theory of atmospheric refraction – Part II: Refraction corrections in satellite geodesy, *Bulletin Géodésique*, 107, 13-34. <https://doi.org/10.1007/BF02522083>
- Williams, S. D. P. & Nievinski, F. G. 2017, Tropospheric delays in ground-based GNSS multipath reflectometry – Experimental evidence from coastal sites, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 2310-2327. <https://doi.org/10.1002/2016JB013612>
- Wöppelmann, G. & Marcos, M. 2016, Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability, *Reviews of Geophysics*, 54, 64-92. <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>



Su-Kyung Kim is a senior research engineer in LIG Nex1. She received a Ph.D. in Geomatics from Oregon State University in 2021. Her research interests include Satellite-Based Augmentation System (SBAS), GNSS Interferometric Reflectometry (GNSS-IR), as well as other geospatial related topics.



Yo Han Ko received the Doctor's degree in Information Communication Engineering from Chung-Ang University, Korea, in 2011. He is now a principal researcher at LIG Nex1 Satellite Lab. He worked on the development and research of multi-beamforming, MIMO-OFDM modems, navigation receiver, and navigation systems. His research interests include Korean Positioning System and LEO navigation systems.



Sung Chun Bu is currently principal research engineer in LIG Nex1. He received B.S. and M.S. degrees in electronics engineering from Konkuk University, Korea in 2002 and 2004 respectively. He is interested in SBAS and GNSS receiver signal processing.



Suyeol Kim is a research engineer in LIG Nex1. He received a Master's degree from Sejong University in 2024. His research interests include GNSS augmentation system, integrated positioning and anomalous measurement monitoring.