

스마트폰 GNSS 위치 정확도 향상을 위한 C/N_0 와 코드의사거리 잔차 기반 가중값 모델 개발

이종성¹, 박관동^{1,2†}, 박봉규¹, 김미소^{1,2}

Development of a Weighting Model Based on C/N_0 and Code Pseudorange Residuals for Smartphone GNSS Positioning

Jong-Sung Lee¹, Kwan-Dong Park^{1,2†}, Bong-Gyu Park¹, Miso Kim^{1,2}

¹Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²PP-Solution Inc., Seoul 08504, Korea

ABSTRACT

With the availability of smartphone GNSS raw measurement data, research on enhancing positioning accuracy using smartphones has become increasingly prominent. Despite the widespread use of C/N_0 -based weighting models to mitigate multipath errors, these models do not sufficiently account for the intrinsic characteristics of the observations, resulting in unstable positioning accuracy. To address this limitation, this study proposes a novel weighting model that incorporates the inherent characteristics of GNSS observations by combining code pseudorange residuals and C/N_0 . The proposed model utilizes a sliding window technique to calculate residuals through curve fitting of code pseudorange observations. These residuals are then combined with C/N_0 to better reflect the unique features of the observations. Experimental results from tests conducted at Inha University demonstrate significant improvements in positioning accuracy. The proposed model achieved 40%, 32%, and 33% improvements in horizontal positioning accuracy and 32%, 20%, and 23% improvements in vertical accuracy for DOY 022, DOY 058, and DOY 253, respectively, compared to conventional elevation-based and C/N_0 -based models. These findings confirm that the proposed approach effectively improves both the accuracy and precision in smartphone GNSS positioning by addressing both observation noise and signal quality.

Keywords: smartphone GNSS, C/N_0 , observation noise, code pseudorange residuals

주요어: 스마트폰, 신호대잡음비, 관측 잡음, 코드의사거리 잔차

1. INTRODUCTION

2016년 Google이 Android 7.0 운영체제를 출시하면서, 스마트폰에서 Global Navigation Satellite System (GNSS)의 원시데이터를 사용자에게 제공하기 시작했다 (Håkansson 2019). 이는 기존의 Position, Velocity and Time (PVT) 정보에 더해 코드의사거리, 반송파 위상, 도플러 관측치 등의 원시데이터를 제공함으로써 더욱 정밀한 위치 추정을 가능하게 만들었다 (Fortunato et al. 2019).

그러나 스마트폰 GNSS는 저가의 GNSS 칩셋과 선형 편광 방식의 안테나를 탑재하고 있어 다중경로 오차와 관측 잡음에 취약한 구조적 한계를 지니고 있다 (Yun et al. 2022). 일반 GNSS 수신기와 비교하였을 때, 스마트폰의 Carrier-to-Noise Density Ratio (C/N_0)는 약 10 dB-Hz 정도 낮아 신호 강도가 약하고 잡음 수준이 높다 (Zangenehjad & Gao 2021). 더불어 스마트폰의 반송파 위상 관측값은 잦은 불연속성과 빈번한 데이터 누락이 발생하여 연속적인 신호 처리와 정밀한 위치 추정을 어렵게 만든다. 이러한 기술적 한계를 극복하고 위치 추정 성능을 향상시키기 위해서는

Received Jan 16, 2025 Revised Jan 31, 2025 Accepted Feb 13, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: kdpark@inha.ac.kr



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.

스마트폰 GNSS의 특성을 반영하는 확률적 모델이 필요하다.

기존 연구에서는 GNSS 관측값의 품질에 따라 가중값을 부여하는 다양한 확률적 모델이 제안되었다. 스마트폰 GNSS의 경우, 위성 고도각 기반 가중값 모델이 아닌 C/N_0 기반 가중값 모델이 적합하다고 평가되고 있다. Bahadur & Schön (2024)는 스마트폰 환경에 맞도록 수정된 C/N_0 기반 가중값 모델과 Robust Kalman Filter를 설계하였고 이를 통해 관측값의 확률적 특성을 평가하고 이상치를 줄여 3D 위치 정확도를 기존 고도각 기반 모델 대비 약 45% 향상시켰다. 또한, 고도각 기반 모델과 C/N_0 기반 모델을 결합하여 측위 정확도를 향상시키려는 연구도 있었다. Li et al. (2022)는 고도각과 C/N_0 기반 가중값 모델을 결합하여 각 모델의 장점을 융합함으로써 개활지에서 고도각 기반 모델 대비 3D 위치 정확도를 약 22% 향상시켰다. Zangenehjad & Gao (2023)은 최소 제곱 분산 성분 추정(LS-VCE) 기법을 사용하여 GNSS 관측값의 분산과 공분산을 추정하고 이를 기반으로 C/N_0 와 고도각을 결합한 확률적 모델을 설계하였다. 해당 연구에서 제안된 모델을 Precise Point Positioning (PPP)에 적용하였을 때, 수평 위치 정확도가 약 25% 향상되었다.

앞서 기술한 선행 연구들은 스마트폰 GNSS의 다중경로 오차와 관측 잡음 문제를 해결하기 위해 C/N_0 와 고도각을 활용한 확률적 모델을 제안하였다. 이러한 신호 품질 지표는 환경적 요인을 반영하는 데 효과적이지만 관측값 자체의 특성을 충분히 고려하지 못한다는 한계를 가진다. 따라서 본 연구에서는 스마트폰 GNSS 관측값 자체의 특성을 반영하여 관측 잡음과 신호 품질을 종합적으로 평가할 수 있는 새로운 확률적 모델을 제안한다. 연구에 사용된 Samsung Galaxy S21+의 코드의사거리 관측값에 슬라이딩 윈도우 기반 2차 다항식 곡선 접합 기법을 적용하여 각 윈도우 내 관측값의 변화를 모델링하였다. 이후, 모델로부터 계산된 잔차와 C/N_0 를 결합함으로써 다중경로 오차와 관측 잡음을 통합적으로 고려하는 새로운 가중값 모델을 설계하였다.

이 논문의 2장에서는 스마트폰 GNSS에 적합한 확률적 모델을 설계하기 위해 데이터의 품질 및 잡음 특성을 분석한다. 3장에서는 기존의 가중값 모델의 구조와 그 한계를 기술하고, 4장에서는 코드의사거리 기반 다항식 곡선 접합 방법과 C/N_0 와의 결합 기법에 대해 설명한다. 5장에서는 제안된 가중값 모델의 성능을 입증하기 위한 실험 결과를 다루며, 마지막으로 6장에서는 분석 결과와 향후 연구 방향에 대해 논의한다.

2. 스마트폰 GNSS 관측 데이터 품질, 잡음 분석

이번 장에서는 스마트폰 GNSS에 적합한 확률적 모델을 설계하기 위해 관측 데이터의 기본적인 품질과 잡음 수준을 확인한다. 2.1절에서는 데이터 취득 과정에 대해 기술하며, 2.2절에서는 일반 GNSS 수신기와 스마트폰에서 고도각, C/N_0 의 상관관계를, 2.3절에서는 관측 잡음의 특성을 분석한다.

2.1 데이터 수집

스마트폰 GNSS 데이터의 품질과 잡음 수준을 분석하기 위



Fig. 1. The setup of RTAP2U and Galaxy S21+ during data collection.

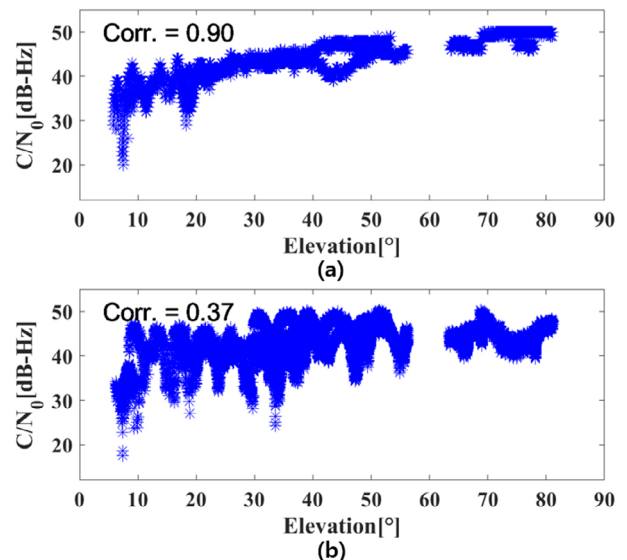


Fig. 2. Correlation between elevation angle and C/N_0 in (a) RTAP2U and (b) Galaxy S21+.

해 2024년 9월 1일(DOY 253), 인하대학교 농구장에서 Samsung Galaxy S21+와 (주)피피솔의 RTAP2U 수신기를 이용해 30분간 데이터를 동시 취득하였다. 테스트 환경은 Fig. 1과 같으며, 관측 데이터는 Google의 GNSS Logger를 사용하여 기록하였다.

2.2 고도각과 C/N_0 의 상관관계

일반 GNSS 수신기는 다중경로 오차를 최소화하고 낮은 고도각에서도 신호를 효과적으로 수신하기 위해 우측 원형 편광 안테나(RHCP)를 사용한다. 반면 스마트폰은 설계와 크기 제한으로 인해 선형 편광 안테나를 사용하며 다중경로 오차와 신호 강도 저하에 취약하다 (Bisnath & Aggrey 2024). 이러한 안테나 설계의 차이는 위성 고도각과 C/N_0 의 상관관계에서 명확히 나타난다. Fig. 2는 Fig. 1의 환경에서 일반 수신기(Fig. 2a)와 스마트폰(Fig. 2b)으로 30분간 데이터를 직접 수집한 결과로, 위성 고도각과 C/N_0

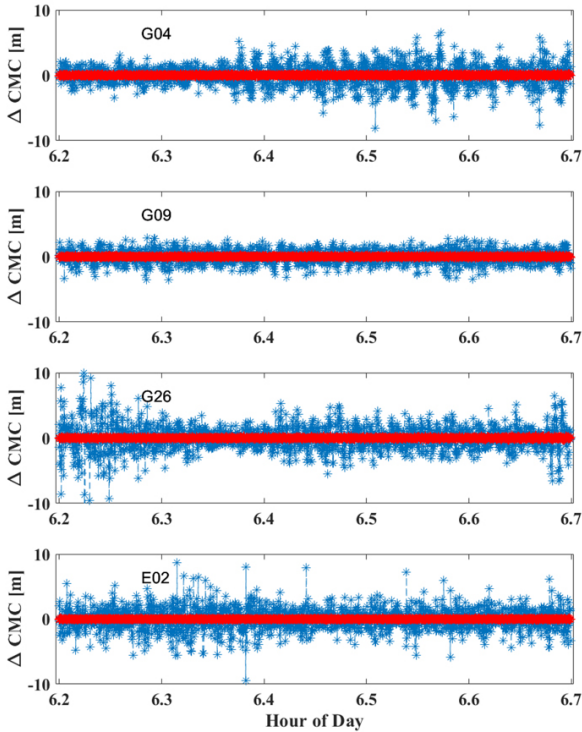


Fig. 3. ΔCMC measurements for 4 satellites during the data collection, with RTAP2U in red and smartphone in blue.

N_0 의 상관관계를 보여준다. 일반 수신기는 고도각이 증가함에 따라 C/N_0 도 증가하며, 상관계수는 0.86으로 높은 상관성을 나타냈다. 반면 스마트폰은 고도각과 C/N_0 간 상관성이 불규칙하며, 상관계수는 0.37로 일반 수신기에 비해 상당히 낮았다.

2.3 관측 잡음 평가

코드의사거리 관측값은 일반적으로 반송파 위상에 비해 약 100배 높은 수준의 관측 잡음을 포함한다. 특히 스마트폰 관측의 경우, 저가의 GNSS 안테나로 인해 신호 강도가 낮아 관측 잡음이 수시로 증폭된다.

이 연구에서는 일반 수신기와 스마트폰의 관측 잡음 수준을 비교하기 위해 시간 차분된 Code Minus Carrier (CMC)를 이용하였다. CMC는 코드의사거리와 반송파 위상 관측값의 차이를 계산한 값으로 관측값의 잡음 특성을 분석하는데 활용된다. 시간 차분된 CMC는 Eq. (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta CMC_i = \frac{CMC_i - CMC_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (1)$$

여기서 t 는 GPS seconds를 의미하며, i 와 $i-1$ 은 현재 관측 시점과 이전 관측 시점을 의미한다. ΔCMC는 CMC의 변화율을 의미하며 시간에 따른 잡음의 차이를 분석하는데 용이하다. 본 연구에서 사용한 데이터는 1초 간격이므로 직관적인 분석을 위해 ΔCMC를 m/s가 아닌 m 단위로 표기한다.

Fig. 3은 일반 수신기와 스마트폰의 ΔCMC 결과를 비교한 그

Table 1. Comparison of RMS and variance of code minus carrier (ΔCMC) measurements between RTAP2U and smartphone.

Satellite ID	RTAP2U		Galaxy S21+	
	Variance [m]	RMS [m]	Variance [m]	RMS [m]
G04	0.015	0.122	2.526	1.589
G07	0.009	0.095	2.089	1.445
G08	0.001	0.035	0.777	0.881
G09	0.011	0.103	0.962	0.981
G16	0.003	0.054	0.740	0.860
G26	0.014	0.120	0.397	1.986
E02	0.005	0.070	2.799	1.673
E07	0.003	0.059	2.404	1.550
E27	0.002	0.041	1.872	1.368

래프이다. 일반 수신기의 경우, ΔCMC 값이 관측 시간 동안 일정하여 유지되어 신호 품질이 안정적인 것을 알 수 있다. 반면, 스마트폰은 관측 시간 동안 관측값에 일정 수준의 잡음이 포함되어 있으며 특정 시간대에 ΔCMC 값이 크게 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 위성 별 ΔCMC의 분산과 RMS를 나타낸 Table 1에서도 확인할 수 있다.

일반 수신기의 ΔCMC 분산은 0.001~0.015 m이며, RMS는 0.035~0.122 m이다. 반면 스마트폰의 ΔCMC 분산은 0.397~2.779 m이며, RMS는 0.860~1.986 m로 일반 수신기에 비해 현저히 높은 잡음을 보여준다. 2장의 결과는 스마트폰 GNSS의 잡음 수준과 신호 품질 문제를 보완하기 위한 새로운 확률적 모델 개발의 필요성을 시사한다.

3. 기존 가중값 모델

이번 장에서는 기존에 제안된 가중값 모델에 대해 설명한다. 3.1절에서는 고도각 기반 가중값 모델을, 3.2절에서는 C/N_0 기반 가중값 모델을 설명하며, 각 모델이 가지는 장점과 한계를 기술한다.

3.1 고도각 기반 가중값 모델

위성의 고도각에 기반한 가중값 모델은 코드의사거리 관측값의 잡음 수준을 설명하는데 주로 활용된다. 고도각이 높은 위성일수록 다중경로 오차 및 대기 오차의 영향이 적으며 신호 품질이 상대적으로 우수하다는 특징이 있다. 고도각 기반 가중값 모델은 Eq. (2)와 같다.

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{\sin^2(\text{Elevation})} \quad (2)$$

고도각 모델은 고도각이 증가할수록 잡음의 분산을 나타내는 σ_i^2 이 작아지는 방식으로 가중값이 부여된다 (Kim 2015). Fig. 4는 고도각 기반 모델에 따른 잡음의 분산 변화를 나타낸 것으로 고도각이 증가함에 따라 분산이 급격히 감소하는 특징을 확인할 수 있다.

고도각 기반 가중값 모델은 계산 과정이 단순하고 구현이 용이하다는 장점이 있다. 그러나 2.1절에서 설명한 바와 같이, 스마트폰 GNSS에서는 고도각과 C/N_0 의 상관성이 일반 수신기보다

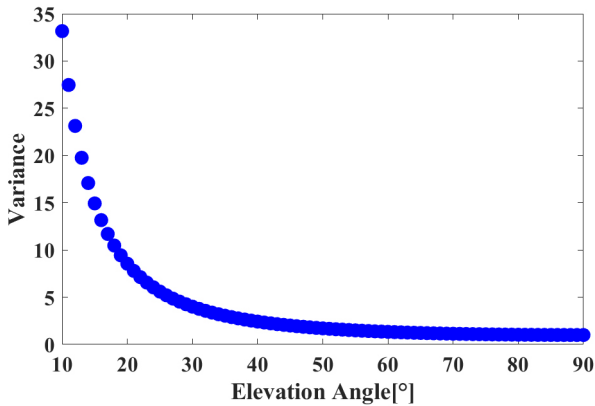


Fig. 4. Variance of noise based on elevation angle in elevation based models.

낮게 나타나며 높은 고도각에서도 신호 품질이 불안정하게 유지된다. 이로 인해 고도각 모델은 스마트폰의 신호 품질을 정확히 반영하지 못하는 한계가 있다.

3.2 C/N₀ 기반 가중값 모델

C/N₀ 기반 가중값 모델은 Brunner et al. (1999)와 Li & Wu (2009) 등에 의해 도입된 확률적 모델로, 신호 품질을 직접 반영하여 코드의사거리 관측값의 잡음 수준을 설명한다. 본 연구에서는 Bahadur & Schön (2024)에 의해 스마트폰 GNSS에 맞도록 수정된 시그마 모델을 적용하였으며, Eq. (3)과 같다.

$$\sigma_i^2 = C^2 \cdot 10^{-(C/N_0 - 40)/20} \tag{3}$$

여기서 C는 주파수 및 위성 신호 별로 달라지는 분산 계수이다. 이 모델은 스마트폰의 신호 품질 특성을 고려하여 기준 C/N₀ 값을 40 dB-Hz로 설정하였다. Fig. 5는 시그마 모델에 따른 분산의 변화를 나타낸다. C/N₀가 증가할수록 잡음의 분산을 나타내는 σ_i^2 가 감소하며 기준 C/N₀에서 분산은 1로 수렴하게 된다.

C/N₀ 기반 가중값 모델은 신호 품질을 반영하는 효과적인 방법으로 평가된다. 그러나 C/N₀ 값이 낮더라도 관측 잡음이 작은 경우가 발생할 수 있어 신호 품질을 정확하게 반영하지 못하는 한계를 가진다 (Hu et al. 2023). 따라서 C/N₀만을 단독 기준으로 신호 품질을 평가하는 것에는 한계가 있으며 관측값 자체의 특성을 반영할 수 있는 추가적인 고려가 필요하다.

4. C/N₀와 코드의사거리 잔차 기반 가중값 모델

이번 장에서는 스마트폰 GNSS 관측값의 특성과 신호 품질을 반영하는 새로운 가중값 모델을 제안한다. 4.1절에서는 코드의사거리 관측값 기반의 2차 다항식 곡선 접합 기법을 통해 관측 잡음 수준을 정량화 하는 방법을 다룬다. 이어서, 4.2절에서는 정량화된 관측 잡음 수준을 C/N₀와 결합하여 최적의 가중값을 생성하는 방법을 제시한다.

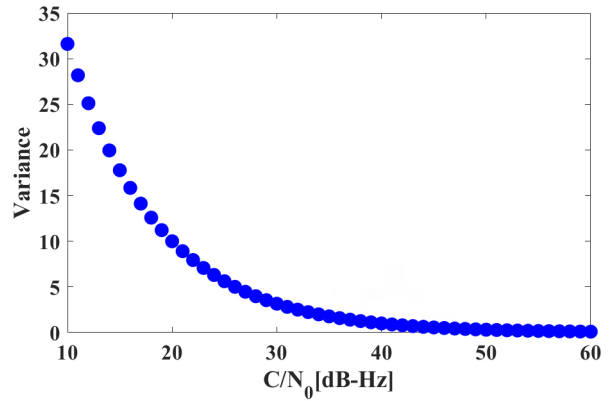


Fig. 5. Variance of noise based on C/N₀ in sigma model.

4.1 코드의사거리 2차 다항식 곡선 접합

스마트폰 코드의사거리 관측값의 잡음 수준은 2.2절에 설명한 바와 같이, 일반 수신기에 비해 약 10배 이상 크게 나타난다. 기존에는 반송파 위상과 코드의사거리 관측값을 이용하여 관측 잡음 수준을 측정하였으나 본 연구에서는 반송파 위상의 불연속성을 고려하여 코드의사거리 관측값만을 이용하였다. 코드의사거리는 Eq. (4)와 같이 구성된다.

$$P = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \delta I + \delta T + MP + \varepsilon \tag{4}$$

여기서 ρ 는 위성과 수신기 간 기선 거리, δt_r 와 δt^s 는 각각 수신기 시계 오차와 위성 시계 오차를 의미하며, δI 와 δT 는 대기권 오차, MP와 ε 는 다중경로 오차와 관측 잡음을 나타낸다. 스마트폰은 다중경로 오차와 관측 잡음의 영향을 크게 받으며 두 요소를 명확히 구분하기 어렵다 (Mu et al. 2024). 본 연구에서는 다중경로 오차와 관측 잡음을 모두 잡음으로 간주하여 분석을 진행하였다.

코드의사거리 관측값에서 짧은 시간 동안 대기 오차는 일정하게 유지되며 시계 오차는 점진적으로 증가하는 경향이 있다. 따라서 수신기가 고정되어 있는 환경에서 코드의사거리 관측값의 변화는 위성 궤도와 잡음 수준에 영향을 받는다. 이러한 특성을 모델링하기 위해 슬라이딩 윈도우 기반 코드의사거리 2차 곡선 접합 기법을 적용하였다.

Fig. 6은 슬라이딩 윈도우 기반 코드의사거리 2차 다항식 곡선 접합 기법을 활용한 데이터 처리 과정을 보여준다. 각 슬라이딩 윈도우는 1초 간격으로 수집된 관측값을 포함하며 윈도우 크기는 5초로 설정하였다. 윈도우 내의 코드의사거리 관측값을 바탕으로 2차 다항식 곡선을 접합하여 관측값의 변화를 모델링하였다. 이후, 윈도우 내 마지막 관측값과 2차 곡선에 의해 추정된 값을 이용하여 잔차를 계산하였다.

Fig. 7은 8개 위성의 코드의사거리 관측값에서 계산된 잔차를 나타낸다. 본 연구는 미국의 GPS와 유럽의 Galileo를 대상으로, 각각 L1신호와 E1 신호를 이용하였다. G09와 G16 위성은 전체 관측 시간 동안 일정한 수준의 잔차를 유지하여 신호 품질이 안정

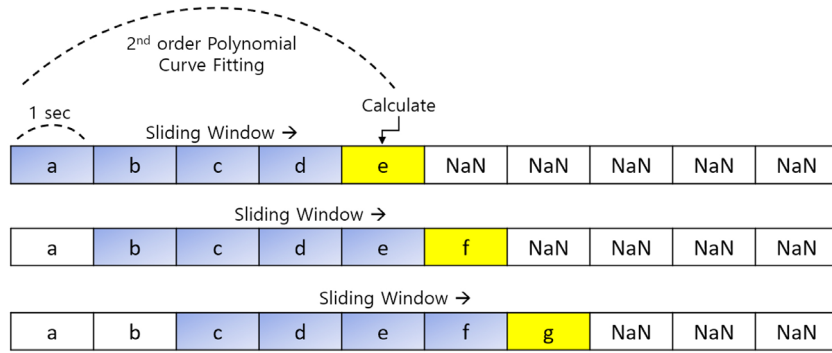


Fig. 6. Sliding window-based second-order polynomial curve fitting approach.

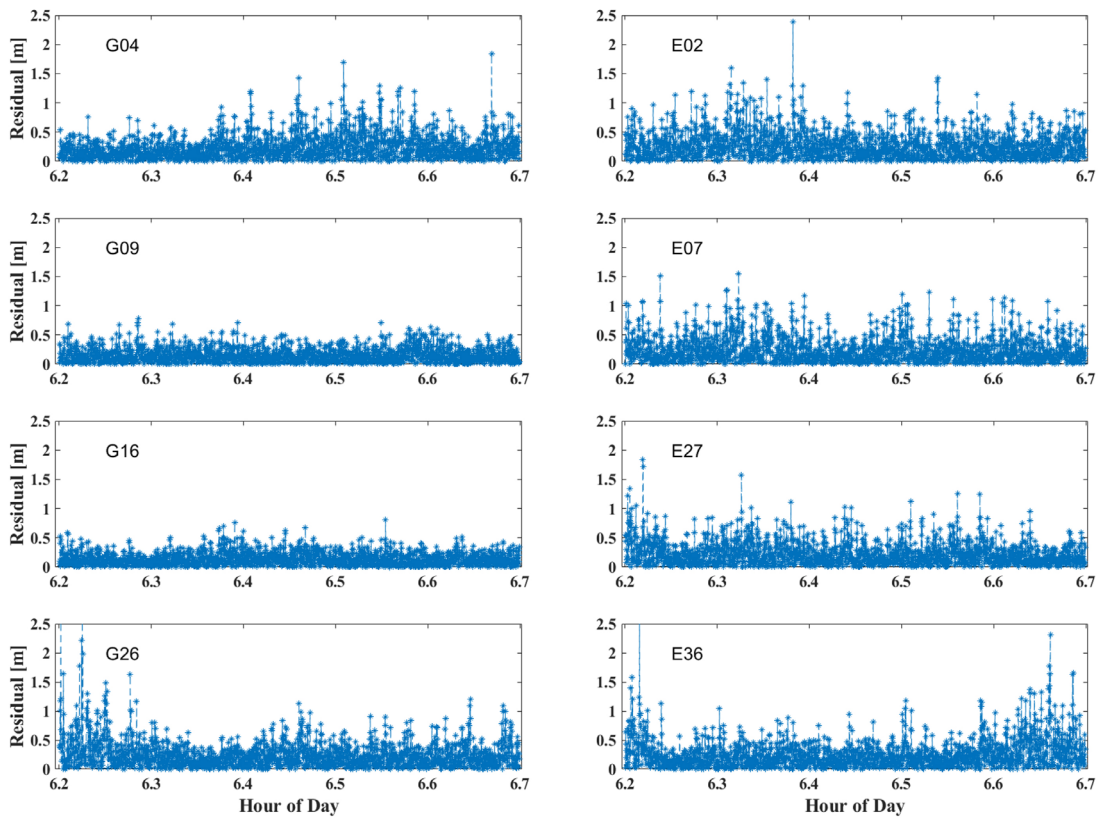


Fig. 7. Residuals of code pseudorange observations for 8 satellites.

적인 것으로 평가되었다. 반면 G04, G26, E02 등의 위성에서는 특정 시간대에 잔차가 증가하였으며 이는 해당 시간대에 관측 잡음이 크게 증가했음을 의미한다. 이러한 측정 방법은 코드의사거리 관측값만을 이용하여 관측값의 잡음 수준을 정량화할 수 있으며 관측값의 품질 평가에 효과적으로 활용될 수 있다.

4.2 C/N₀와 코드의사거리 잔차 결합

4.1절에서 도출한 관측 잡음 수준을 C/N₀와 결합하여 가중값 모델을 설계하였다. C/N₀은 신호품질을 나타내는 전통적인 지표로서 도심지와 개활지 같은 환경적 변화에 따라 변동하며 관측값

의 신뢰도를 평가하는 데 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 C/N₀와 관측 잡음을 각각 지수함수로 모델한 후, 이를 결합하는 새로운 가중값 모델을 제안한다. 해당 모델은 Eqs. (5, 6)과 같다.

$$\sigma_{C/N_0}^2 = \frac{1}{e^{(C/N_0)^a}}, \quad Weight_1 = \frac{1}{\sigma_{C/N_0}^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{Residual}^2 = \frac{1}{e^{-b|Residual|}}, \quad Weight_2 = \frac{1}{\sigma_{Residual}^2} \quad (6)$$

Eq. (5)는 신호의 품질을 반영하여, C/N₀ 값이 높을수록 관측값의 신뢰도가 증가함을 나타내며, Eq. (6)은 잔차가 클수록 관측

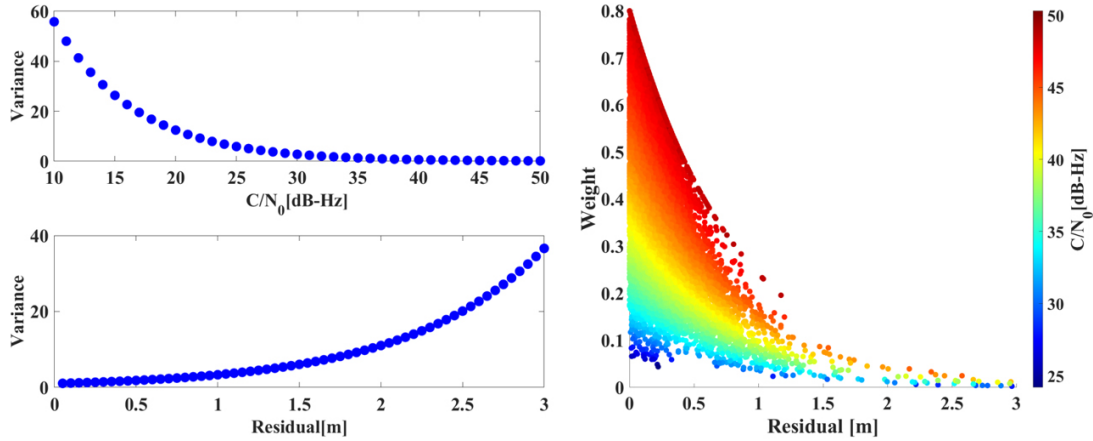


Fig. 8. Variance and weighting model based on C/N_0 and residual.



Fig. 9. Test environment and data collection site at Inha University.

잡음이 크다는 것을 의미한다. 경험적 계수인 a, b, c 는 스케일 팩터(scale factor)로 Eqs. (5, 6)에서 구한 가중치의 범위를 0과 1 사이의 값으로 설정하는 역할을 한다. 이는 스마트폰 기종 및 하드웨어 특성에 따라 조정되어야 하며 본 논문에서는 2.1절에 사용한 데이터를 기반으로 a, b, c 를 각각 0.1, 0.004, 0.11로 설정하였다. 두 지표는 상호 보완적인 역할을 수행하며 관측값의 특성과 신호 품질을 반영한다.

Fig. 8은 이 연구에서 제안하는 가중값 모델의 결과를 시각적으로 나타낸다. 좌측 그래프는 Eqs. (5, 6)에 따른 분산을 나타내며, 우측 그래프는 두 모델을 가중치간 곱 연산하여 계산된 최종 가중값을 나타낸다. Colorbar는 C/N_0 값을 나타내며 높은 C/N_0 값은 붉은색, 낮은 C/N_0 값은 파란색으로 표현하였다.

C/N_0 가 높고 관측 잡음이 작은 경우에는 해당 관측값에 높은 가중값을 부여하였고, 반대로 C/N_0 가 낮고 잡음 수준이 큰 경우에는 낮은 가중값을 부여하였다. C/N_0 가 높으면서 잡음 수준이 큰 경우나 그와 반대되는 상황에서는 두 지표가 상호 보완적인 역할을 수행함으로써 관측값의 품질을 정밀하게 반영할 수 있다.

5. 결과

본 연구에서는 Samsung Galaxy S21+를 사용하여 2024년 1월

22일, 2월 27일, 9월 9일 (DOY 022, 058, 253)에 인하대학교 농구장에서 30분간 검증 데이터를 수집하였다. 테스트 환경은 Fig. 9와 같으며, 기준 좌표는 (주)피피솔의 RTAP2U 수신기와 국토지리정보원에서 운영하는 Virtual Reference Station (VRS) 서비스를 통해 산출하였다.

각 테스트의 측위 성능 평가는 Figs. 10과 11 그리고 Table 2와 같다. Fig. 10은 각 DOY 별로 산출된 수평 방향 오차이며, Fig. 11은 3차원 N, E, V 방향의 시계열 오차를 나타낸다. Figs. 10과 11의 단위는 m이며, 가중값을 적용하지 않은 경우는 붉은색으로, C/N_0 와 관측 잡음 수준 결합 가중값 모델을 적용한 경우는 파란색으로 표현하였다.

Table 2는 각 DOY별 테스트 결과로, 고도각 기반 가중값 모델(elevation), C/N_0 기반 가중값 모델(C/N_0) 그리고 본 연구에서 제안하는 가중값 모델(combination)을 적용하였을 때의 측위 정확도를 비교한 것이다. 정확도 평가를 위해 수평, 수직, 3차원 방향에 대한 RMSE와 RMSE 향상률을 확인하였다. 테스트 결과, Combination 모델을 적용했을 때 DOY 022에서는 수평과 수직 RMSE가 각각 약 40%와 32% 개선되었으며, DOY 058에서는 각각 약 10%와 20%, DOY 253에서는 약 33%와 23%의 RMSE 향상률을 보였다. 이는 C/N_0 와 관측 잡음을 결합한 Combination 모델이 스마트폰 측위에서 고도각, C/N_0 를 사용한 기존 모델보다 더 효과적임을 나타낸다.

6. 결론

본 연구에서는 스마트폰 GNSS의 위치 정확도 향상을 위해 C/N_0 와 코드의사거리 잔차를 결합하는 새로운 가중값 모델을 제안하였다. 모델의 개발을 위해 스마트폰 GNSS 관측값의 품질과 잡음을 분석하였고 기존에 제안된 가중값 모델을 검토하였다. 이를 통해 고도각 및 C/N_0 기반 가중값 모델은 관측값 자체의 특성을 반영하지 않아 스마트폰 환경에서 신호 품질을 정확하게 반영하는 데 한계가 있음을 확인하였다.

본 연구는 관측값 자체의 특성을 반영하기 위해 슬라이딩 윈도우 기반의 코드의사거리 관측값을 2차 다항식 곡선으로 접합

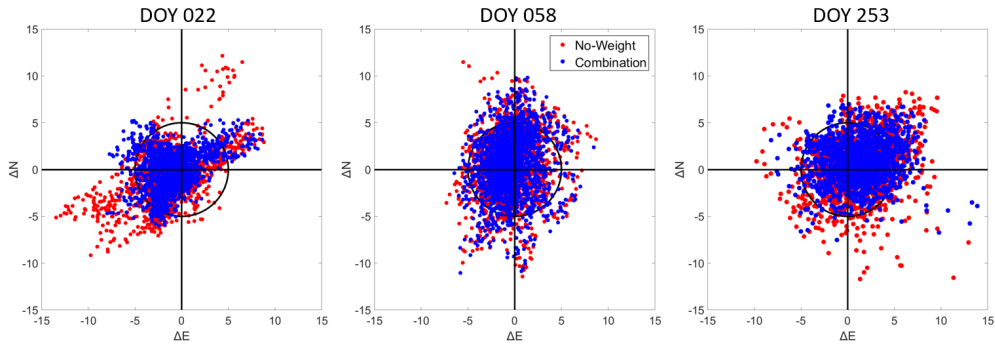


Fig. 10. Comparison of horizontal position errors with and without weighting models for each DOY.

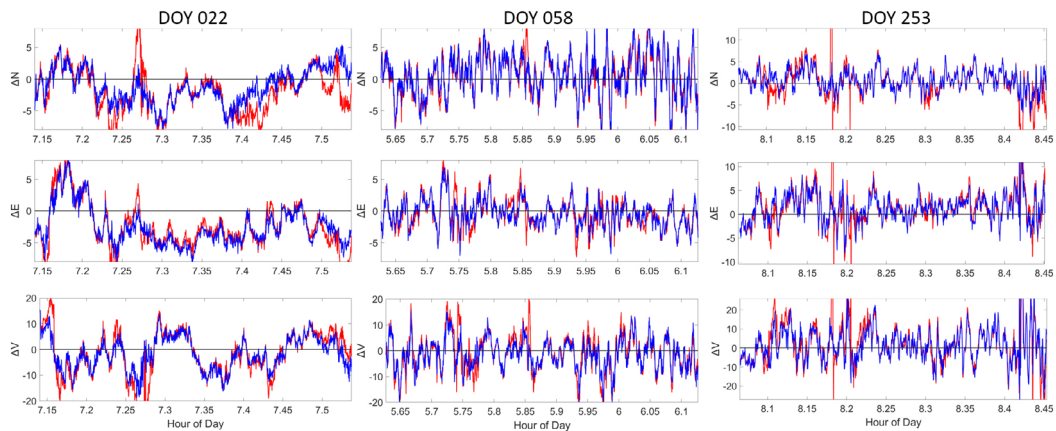


Fig. 11. Comparison of time-series errors in NEV directions with and without weighting models for each DOY.

Table 2. Comparison of RMSE and improvement rates for different weighting models.

DOY		Weighting model				
		No-weight	Elevation	C/N ₀	Combination	
022	RMSE [m]	H	5.84	4.62	3.83	3.50
		V	9.63	7.63	7.45	6.55
		3D	11.26	8.92	8.38	7.43
	Improvement [%]	H		20.9	34.4	40.1
		V		20.7	22.6	32.0
		3D		20.8	25.6	34.0
058	RMSE [m]	H	4.10	4.33	3.76	3.67
		V	7.48	6.92	6.52	5.97
		3D	8.48	8.17	7.53	7.01
	Improvement [%]	H		-5.6	8.3	10.5
		V		7.5	9.6	20.19
		3D		3.7	9.5	17.3
253	RMSE [m]	H	6.06	4.63	4.55	4.04
		V	12.52	10.14	10.53	9.57
		3D	13.91	11.15	11.47	10.39
	Improvement [%]	H		23.6	24.9	33.3
		V		19.0	15.9	23.6
		3D		19.8	17.5	25.3

하고, 윈도우 내 마지막 관측값과 추정값의 차이를 이용하여 관측 잡음 수준을 정상화하였다. 이후, 정상화된 관측 잡음 수준과 C/N₀을 결합함으로써 두 지표가 상호 보완적인 역할을 수행하는 가중값 모델을 개발하였다.

제안된 모델은 인하대학교 농구장에서 수행된 단독 측위 테스트를 통해 검증되었다. 테스트 결과, 제안된 가중값 모델은 수평과 수직 RMSE에서 각각 최대 40%, 32%의 개선 효과를 보였다. 이는 본 연구의 가중값 모델이 스마트폰 GNSS 관측값의 신뢰도

를 보다 정밀하게 평가하고 기존 모델 대비 우수한 성능을 제공할 수 있음을 입증한다. 향후 연구에서는 다양한 환경에서 추가 테스트를 수행하여 모델의 보편성을 검증하고 난수신 및 동적 환경에서의 활용 가능성을 평가하여 더욱 정밀한 확률적 모델을 개발할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (RS-2022-00141819, Development of Advanced Technology for Absolute, Relative, and Continuous Complex Positioning to Acquire Ultra-precise Digital Land Information).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J.L. and K.P.; methodology, J.L.; software, J.L.; validation, J.L., K.P. and M.K; formal analysis, J.L.; investigation, J.L.; resources, J.L. and B.P; data curation, J.L. and B.P; writing—original draft preparation, J.L.; writing—review and editing, J.L., K.P., B.P and M.K; visualization, J.L. and K.P; supervision, K.P and M.K.; project administration, K.P.; funding acquisition, K.P.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Bahadur, B. & Schön, S. 2024, Improving the stochastic model for code pseudorange observations from Android smartphones, *GPS Solutions*, 28, 148. <https://doi.org/10.1007/s10291-024-01690-y>
- Bisnath, S. & Aggrey, J. 2024, Current Limitations and Prospects for Smartphone GNSS Precise Positioning, *Proceedings of the 2024 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Long Beach, California, January 23-25 2024, pp.1-24. <https://doi.org/10.33012/2024.19560>
- Brunner, F., Hartinger, H., & Troyer, L. 1999, GPS signal diffraction modelling: the stochastic SIGMA-model, *Journal of Geodesy*, 73, 259-267. <https://doi.org/10.1007/s001900050242>
- Fortunato, M., Ravanelli, M., & Mazzoni, A. 2019, Real-Time Geophysical Applications with Android GNSS Raw Measurements, *Remote Sens.*, 11, 2113. <https://doi.org/10.3390/rs11182113>
- Hu, J., Yi, D., & Bisnath, S. 2023, A comprehensive analysis of smartphone GNSS range errors in realistic environments, *Sensors*, 23,1631. <https://doi.org/10.3390/s23031631>
- Håkansson, M. 2019, Characterization of GNSS observations from a Nexus 9 Android tablet, *GPS Solutions*, 23, 21. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0818-7>
- Kim, H.-I. 2015, Improvement of the real-time positioning accuracy in urban canyons through development of a new weight model based on GNSS signal strength, PhD Thesis, Inha University.
- Li, J. & Wu, M. 2009, The improvement of positioning accuracy with weighted least square based on SNR, *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Beijing, China, September 24-26 2009, pp.145-150. <https://doi.org/10.1109/WICOM.2009.5302600>
- Li, Y., Cai, C., & Xu, Z. 2022, A Combined Elevation Angle and C/N₀ Weighting Method for GNSS PPP on Xiaomi MI8 Smartphones, *Sensors*, 22, 2804. <https://doi.org/10.3390/s22072804>
- Mu, H., Yu, X., Aragon-Angel, A., Wang, J., & Wu, Y. 2024, Real-time detection and correction of abnormal errors in GNSS observations on smartphones, *Remote Sens.*, 16, 3117. <https://doi.org/10.3390/rs16173117>
- Yun, J., Lim, C., & Park, B. 2022, Inherent Limitations of Smartphone GNSS Positioning and Effective Methods to Increase the Accuracy Utilizing Dual-Frequency Measurements, *Sensors*, 22, 9879. <https://doi.org/10.3390/s22249879>
- Zangenehnejad, F. & Gao, Y. 2021, GNSS smartphones positioning: advances, challenges, opportunities, and future perspectives, *Satell Navig*, 2, 24. <https://doi.org/10.1186/s43020-021-00054-y>
- Zangenehnejad, F. & Gao, Y. 2023, Stochastic Modeling of Smartphones GNSS Observations Using LS-VCE and Application to Samsung S20, *Sensors*, 23, 3478. <https://doi.org/10.3390/s23073478>



Jong-Sung Lee received his B.S. degree in Geoinformatic Engineering from Inha University, Korea, and he is currently M.S. student at Department of Geoinformatics in Inha University. His research interests include Smartphone GNSS Observation analysis and Smartphone PPP.



Kwan-Dong Park received his Ph.D. degree from the Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics at the University of Texas at Austin, and he is currently at Inha University as a professor. His research interests include PPP-RTK algorithm development and GNSS geodesy.



Bong-Gyu Park received his B.S. degree in Geoinformatic Engineering and Electronics Engineering from Inha University, Korea, and he is currently M.S. student at Department of Geoinformatics in Inha University. His research interests include GNSS error analysis, smartphone RTK, Deep learning and Signal Processing.



Miso Kim is a Ph.D. candidate at Geoinformatic Engineering, Inha University, and she is currently working at Research Institute of PP-Solution Inc. Her research interests include GNSS PPP-RTK algorithm development and modeling of GNSS error sources.