

Multipath Error Analysis and Scenario Generation for Verifying KRS Environment

Sunglyong Cho^{1†}, Heonho Choi², Byungseok Lee¹, Giwook Nam¹

¹SBAS Program Office, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

²Navigation R&D Section, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

ABSTRACT

KRS which is subsystem of Korea Augmentation Satellite System (KASS) performs a role of collecting and monitoring GPS signals. In order to generate the accurate correction message, the site which meets the requirements should be selected and verification to meet each requirement should be accompanied. When the sites are selected, the environmental considerations are EMI, clear horizon (CH) and multipath. Of these, EMI and CH can be checked for satisfaction by instrumentation, but multipath error is difficult to predict. Therefore, multipath error analysis for the installation position of actual antenna at each KRS site should be preceded, and multipath scenario should be generated for each location to analyze the effects of the resulting system performance. In this paper, based on satellite signals collected from each KRS sites, the method for analyzing multipath error in each KRS sites is described, and the multipath error is analyzed. Also to perform an analysis of the effects on system performance due to multipath error, multipath error modeling is performed for the generation of simulation scenarios.

Keywords: SBAS, KASS, KRS, multipath

1. INTRODUCTION

한국형 위성항법보강시스템 (KASS: Korea Augmentation Satellite System)은 한국항공우주연구원 주관 하에 탈레스사와 공동 개발·구축 중에 있다. KASS는 정지궤도 위성을 통하여 인천 Flight Information Region 서비스 지역의 사용자들에게 GPS 신호에 대한 보정 정보 및 무결성 정보를 제공하는 시스템으로, 기준국, 독립 네트워크, 중앙처리국, 통합운영국, 위성통신국, 정지궤도 위성으로 구성되어 있다.

기준국 (KRS: KASS Reference Station) 하위 시스템은 GNSS 신호를 수집하고 감시하는 역할을 수행한다. 수집한 측정치와 감시 정보는 독립 네트워크를 통해 중앙처리국으로 송신한다. 중앙처리국 (KPS: KASS Processing Station)은 정확한 보정 정보 및

무결성 정보 생성을 위해서 전파 수신 환경의 영향이 최소화된 고품질의 위성 신호를 KRS로부터 제공받아야 한다. KRS 선정 결과는 KASS 시스템 성능을 결정하는 중요한 요소가 된다. KRS 사이트 및 안테나 위치는 사이트 선정 절차에 따라 모든 사이트 요구조건을 확인하고 각 요구조건에 맞는 검증을 통하여 최종 선정한다. 기준국 선정을 위한 요구사항에는 기준국 시설 및 접근성 등의 다양한 요구사항이 있지만, 시스템 성능에 직접적인 영향을 미치는 요소인 전파간섭 (EMI: Electro Magnetic Interference), 수평가시각 (CH: Clear Horizon), 다중경로 오차 등 GNSS 전파 수신 환경 요소가 가장 중요하다. 이 중 EMI와 CH의 경우 측정 기기를 통한 측정에 의해 만족여부를 직관적으로 확인할 수 있으나, 다중경로 오차는 쉽게 예측이 어렵고 다양한 분석이 필요하다 (Son et al. 2018). 따라서 각 기준국 예비 후보지의 안테나 설치 위치에 대한 다중경로 오차 분석이 선행되어야 하며, 이에 따른 시스템 성능에 미치는 영향을 분석해야 최종 시스템 성능을 정확하게 예측할 수 있다.

현재 정밀 조사를 통해 전국 7개소의 KRS 사이트를 잠정 선정하였다. 정밀조사 당시 EMI와 CH에 대해 만족하는 사이트를 우선 대상으로 선정하였으며, 다중경로 오차의 경우 대상 사이트에서 수집한 측정치를 기반으로 다중경로 오차 정도를 측정하고 분석하였다 (Cho et al. 2018). 현재 다각적인 분석을 통해 KASS 시

Received May 27, 2020 Revised Jun 04, 2020 Accepted Jun 05, 2020

[†]Corresponding Author

E-mail: jackycho@kari.re.kr

Tel: +82-42-870-3999 Fax: +82-42-860-2789

Sunglyong Cho <https://orcid.org/0000-0003-2526-6406>

Heonho Choi <https://orcid.org/0000-0003-0584-9698>

Byungseok Lee <https://orcid.org/0000-0003-3964-0139>

Giwook Nam <https://orcid.org/0000-0002-7016-3732>

시스템의 성능을 고려하여 KRS 사이트와 안테나 위치 선정은 완료한 상태이지만, 대부분이 안테나 설치를 위한 기초공사가 이루어진 곳이 아니기 때문에 실제 운영상에 필요한 다중경로 오차에 대한 요구사항을 만족하지 못하였다. 추후 안테나 설치를 위한 기초공사 및 다중경로 경감 작업 수행을 통해 요구사항을 만족할 것으로 예상된다. 다만 다중경로의 경감 작업은 사이트 별로 다중경로 오차 요인에 따라 다르게 적용해야 하며, 다중경로 오차 정도에 따른 시스템 성능 영향을 예측하기 위해서는 현재 각 사이트에 대한 다중경로 오차의 정밀 분석 및 모델링 수행을 통한 성능 분석이 반드시 필요하다.

본 논문에서는 각 KRS 사이트에서 수집한 GPS 신호를 바탕으로 각 KRS 사이트의 다중경로 오차를 분석하기 위한 방법을 기술하고, 동일 데이터를 이용하여 다중경로 오차를 분석한다. 또한 다중경로 오차로 인한 시스템 영향 분석을 수행하기 위하여, 시뮬레이션 시나리오 생성을 위한 다중경로 오차 모델링을 수행한다.

2. 다중경로 오차 분석 및 모델링

다중경로 오차는 의사거리에 포함된 다른 오차 (전리층, 대류층, 시계오차 등) 성분과 다르게 차분기법으로 경감하기 어려우며 동일한 안테나 및 장비를 사용하더라도 주변 전파 수신 환경

에 따라 발생하는 오차의 정도가 매우 다르다. 또한 연산량이 많은 기법이 아니면 오차의 정도나 영향을 쉽게 예측하기 어렵다. 본 논문에서는 측정치 특성 차이에 따른 다중경로의 상대적인 차이를 이용하여 다중경로 오차를 추정하여 분석한다. 이를 통해 각 사이트의 각 가시위성 별 다중경로 오차 모델링을 위한 파라미터를 결정한다.

2.1 KASS 성능 분석 환경

KASS 개발 과정에서 시스템 성능 분석은 Support Platform for EGNOS Evolutions and Demonstration (SPEED) 플랫폼을 이용한다. 이 플랫폼은 EGNOS 개발부터 현재 운영 시에도 검증을 위해 사용하는 실제 측정치 기반 SBAS 시뮬레이션 플랫폼으로, 전리층, 기준국 위치, 위성 상태, 신호 수신 환경 등의 복합적인 요소로 구성된 시나리오를 입력으로 SBAS 성능 분석을 한다.

성능 분석을 위한 시나리오는 사이트 조사 정보를 이용한 구성 파일(Configuration File)을 생성한다. Raw Data Generator (RDG)은 구성 파일을 이용하여 Receiver Independent Exchange Format 형식의 시나리오를 생성한다. SPEED를 이용한 성능 분석 환경은 Fig. 1과 같다.

2.2 다중경로 오차 추정

GPS 측정치는 코드와 반송파로 이루어져 있으며, 반송파는 코드에 비해 상대적으로 다중경로 오차가 매우 미비하므로, 코드와 반송파 간의 일치성 (CCC; code-carrier coherency) 차이를 다중경로 오차로 볼 수 있다. CCC 추출을 위해서 각 사이트의 안테나 설치 위치에서 GPS 신호를 수집하고, 각 위성에 대하여 CCC 추출 및 필터링을 통해 열잡음을 제거한다. 측정치 처리 시 사이클 슬립 검출을 수행하고, 사이클 슬립 검출 시 미지정수 (integer ambiguity) 재계산 후 추출한 CCC에 반영한다 (Weiss 2007). 이때, GPS 수신 신호로부터 CCC를 추출하기 위해 KASS Multipath Assessment Tool를 이용하였다 (Cho et al, 2018). Fig. 2는 영도 NDGPS 사이트에서의 PRN#7 위성에 대한 CCC 추출 값과 미지정수 후처리 및 열잡음 필터링 결과를 보여준다.

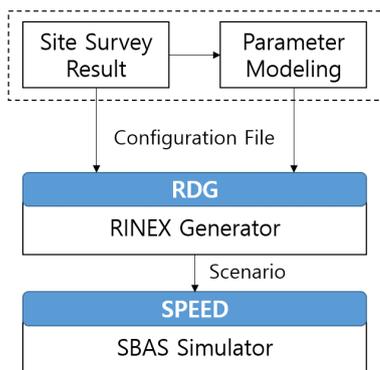


Fig. 1. Flow diagram of the simulation methodology.

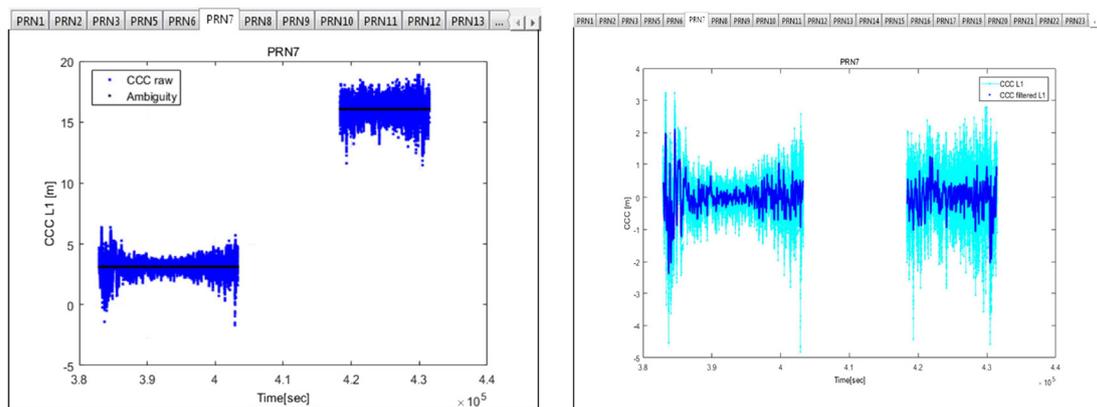


Fig. 2. Multipath error of PRN#7 satellite signal in Young-do NDGPS site. The change of integer ambiguity by cycle-slip in CCC (left), The result of reflecting ambiguity change and thermal noise filtering (right).

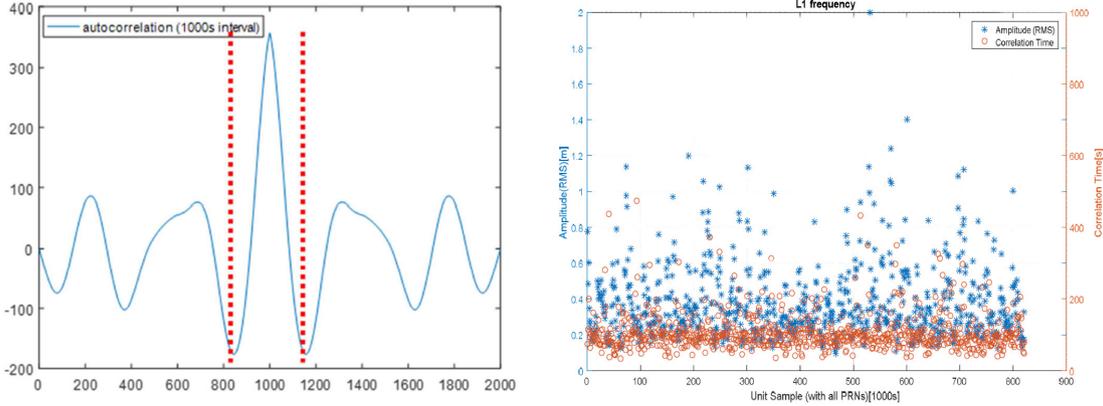


Fig. 3. The example of auto-correlation and correlation time in reference window (Young-do site ANT#1). Average of L1 auto-correlation (RMS): 0.3633 m, average of L1 correlation time: 105.9318 s.

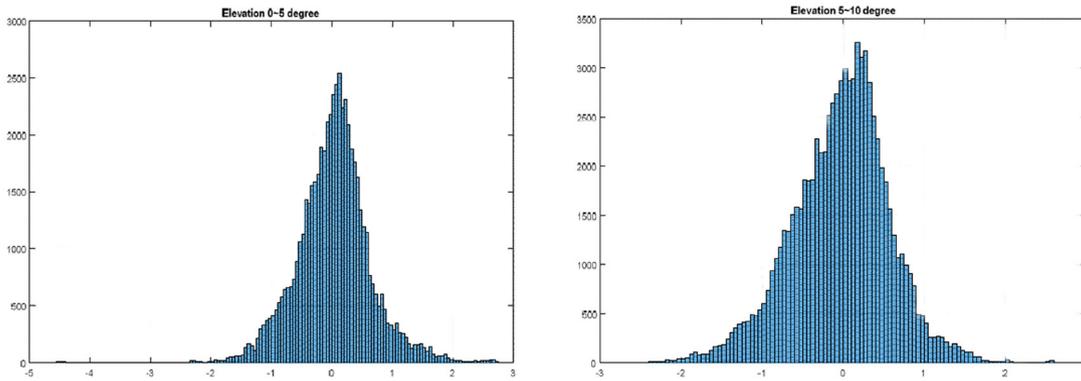


Fig. 4. The code-carrier coherency distribution as elevation angle (left: 0~5°, right: 5~10°).

2.3 다중경로 오차 분석 및 모델 파라미터 결정

SBAS 성능 분석을 위한 시나리오 구성에 있어 다중경로 오차는 Gauss-Markov 모델을 사용하고 있으며, 이는 일반적으로 다중경로 오차 모델로 사용하는 모델이다 (Yang et al. 2004). Gauss-Markov 모델은 식 (1)과 같다.

$$Y_k = aY_{k-1} + \sigma_y \sqrt{1 - a^2} X_k$$

$$a = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \tag{1}$$

여기서 X 는 백색잡음, σ_y 는 해당 분포의 표준편차, τ 는 시상수이다. 위 식에서 볼 수 있듯이 Gauss-Markov 모델 적용을 위해서는 분포의 표준편차 및 시상수 결정이 필요하다. 앞서 언급한 바와 같이 KRS의 안테나 위치에서의 다중경로 오차는 수집한 데이터로부터 추출한 CCC로 볼 수 있으며, 이를 다중경로 오차 모델에 적용하기 위해서는 추출한 CCC 분포로부터 표준편차와 시상수 결정이 필요하다.

CCC의 시상수 결정을 위해서 하루치의 수집 데이터 기반으로 1,000초 단위의 기준 구간에 대해 자기상관 (auto-correlation)을 수행하였다. 자기상관 결과 메인로브 (main lobe)의 폭을 상관 시간으로 하여 각 기준 구간의 상관시간에 대한 평균을 통해 다중경로 오차 모델의 시상수를 결정하였다. Fig. 3은 기준 구간에

대한 자기상관 및 상관시간 예시와 영도 NDGPS 사이트에서의 기준 구간별 상관 크기의 Root Mean Square (RMS)와 상관 시간 (L1 주파수)을 나타내었다. 이때 상관 크기의 RMS는 1,000초 단위 기준 주기 중 이상 데이터 포함 여부를 확인하기 위해 계산하였다.

CCC 분포의 표준편차는 다중경로 오차에 영향을 미치는 주요 요소인 양각을 기준으로 결정한다. 24시간의 수집 데이터를 기준으로 각 가시위성에 대하여 5도 간격으로 구간을 설정하였다. 각 구간의 분포는 정규분포로 가정하였으며, 이는 실제 측정치를 통해 확인하였다. Fig. 4는 0~5도, 5~10도 구간의 CCC 분포를 보여주며, 다른 구간 역시 비슷한 양상의 분포를 나타내었다. 각 양각 구간에서의 표준편차는 다중경로 오차 모델의 파라미터로 결정하였다. 각 양각 구간에 따른 표준편차는 정상적으로 신호가 수집된 경우 전체 양각 구간을 기준으로 지수 혹은 로그 함수 형태로 나타난다.

현재 KRS 사이트의 경우 기반 시설 및 환경 정리를 수행하지 않은 상태이기 때문에 공항을 제외한 안테나 주변의 수풀이나 나무 등으로 인해 충분한 가시각이 확보되지 않아 측정치가 충분히 확보되지 않은 경우 (예: 울릉도 NDGPS 사이트)가 있다. 이와 같이 충분한 측정치가 수집되지 않은 경우에는 신뢰성이 보장되지 않으므로 결과를 그대로 모델에 적용하기 어렵다. 따라서 지수함수 형태를 기본으로 데이터 외삽 (extrapolation)을 통해 다중경로

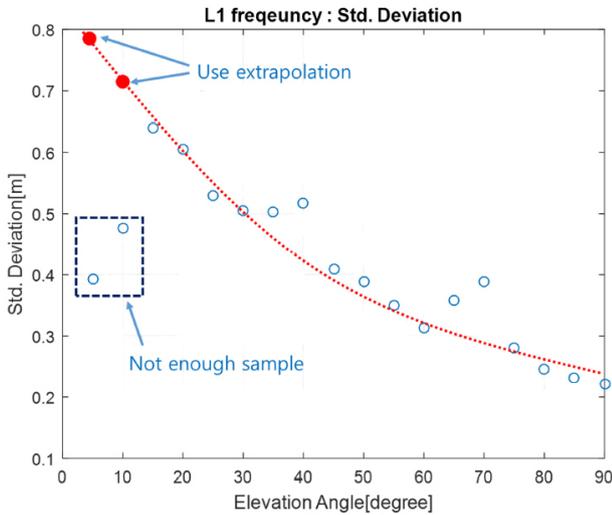


Fig. 5. Determination of the model parameter by sufficient number of measurements.

오차 모델링을 수행하였다. 또한 보수적인 접근을 위하여 정확한 지수함수 형태를 보이지 않더라도, 충분히 데이터가 확보된 구간은 측정치를 그대로 사용하였다. 이는 Fig. 5를 통해 나타내었다.

마지막으로 각 결정한 모델 파라미터 값이 실제 측정치 분포를 오버바운딩 (overbounding)하는지 확인하고, 그렇지 않은 경우 표준편차 파라미터 값을 증가시켰다. 이는 모델링 적용에 의해 실제 발생할 수 있는 오차의 크기가 작아지는 것을 방지하기 위함이다.

3. 다중경로 오차 분석 결과

다중경로 오차 모델링은 2장에서 언급한 방법으로 수행하였으며, 이를 위해 각 안테나 위치 별 각 가시위성에 대하여 분석을 수행하였다.

3.1 기준 (Baseline) 다중경로

앞서 설명한 바와 같이 KASS 설계·개발에 있어 무고장 (fault-free) 환경에서의 성능분석은 SPEED를 사용하며, 플랫폼 입력으로 사용하기 위한 시나리오에 입력되는 기준 다중경로 오차는 Table 1, 2와 같다. Table 1에서의 기준 다중경로 오차는 다중경로 관련 요구사항을 만족하는 환경에서의 다중경로 오차 수준을 의미한다.

3.2 다중경로 오차 분석

다중경로 오차 분석을 위한 GPS 데이터 수집은 7개의 사이트마다 2개의 안테나 위치에서 24시간 동안 수행하였으며, 각 가시위성별 추출한 CCC 특성을 분석하여 다중경로 오차 모델링에 필요한 파라미터를 결정하였다. Fig. 6과 Table 3, 4는 한 사이트 (영도 NDGPS ANT#1)에 대한 분석 결과를 나타내고, 전체 사이

Table 1. The default multipath error as the elevation angle.

Elevation angle (degree)	Sigma CCC L1 (m)	Sigma CCC L2 (m)
5	0.49	0.31
10	0.49	0.31
20	0.48	0.31
30	0.46	0.29
40	0.42	0.27
50	0.37	0.23
60	0.31	0.20
70	0.26	0.16
80	0.21	0.13
90	0.17	0.10

Table 2. The default correlation time as the frequency.

Corr. time L1 (s)	Corr. time L2 (s)
250	250

Table 3. The numerical value of analysis result for scenario generation.

Elevation angle (degree)	Sigma CCC L1 (m)	Sigma CCC L2 (m)
5	0.873	0.452
10	0.635	0.398
20	0.456	0.299
30	0.336	0.242
40	0.270	0.201
50	0.241	0.190
60	0.215	0.166
70	0.201	0.163
80	0.195	0.142
90	0.196	0.131

Table 4. Nominal correlation time as the frequency.

Corr. time L1 (s)	Corr. time L2 (s)
105.9	193.5

트에 대한 모든 결과는 별도로 표기하지는 않았다.

각 사이트 별 CCC 분석 결과를 기반으로 성능영향 분석에 이용되는 시나리오 생성을 위한 수치화를 수행하였으며, 이를 SPEED 플랫폼의 입력 시나리오 적용을 위한 축적계수 (scale factor)로 변환하였다. 다중경로 오차 분석 결과 모든 사이트에서, CCC 표준편차가 낮은 양각에서 기준 다중경로 오차에 비해 크게 나타났는데, 이는 현재 사이트에서 안테나 설치를 위한 기반 공사가 이루어지지 않아 주변 수풀이나 장애물로 인한 오차 증가로 판단된다.

안양 VOR, 영도 NDGPS, 제주추적소, 울릉도 NDGPS 사이트의 경우 오차의 크기 차이는 있지만, 다중경로 오차 모델을 결정하는 시상수의 경우 정상상태 (시나리오 생성 시, 요구사항에 만족하는 기준 다중경로 오차의 상관시간 값)와 유사하게 도출되었으며, 그 값은 아래와 같다.

- L1 주파수 평균 상관시간: 200~250 s
- L2 주파수 평균 상관시간: 250~300 s

광주 LORAN-C, 제주공항, 양양공항의 L2 주파수의 경우 정상상태와 비교하여 높은 값으로 도출되었으며, 그 값은 아래와 같다. 높은 상관시간은 다중경로 신호의 전송 경로가 길어진 경우로 다중경로 오차가 평균보다 커짐을 나타낸다.

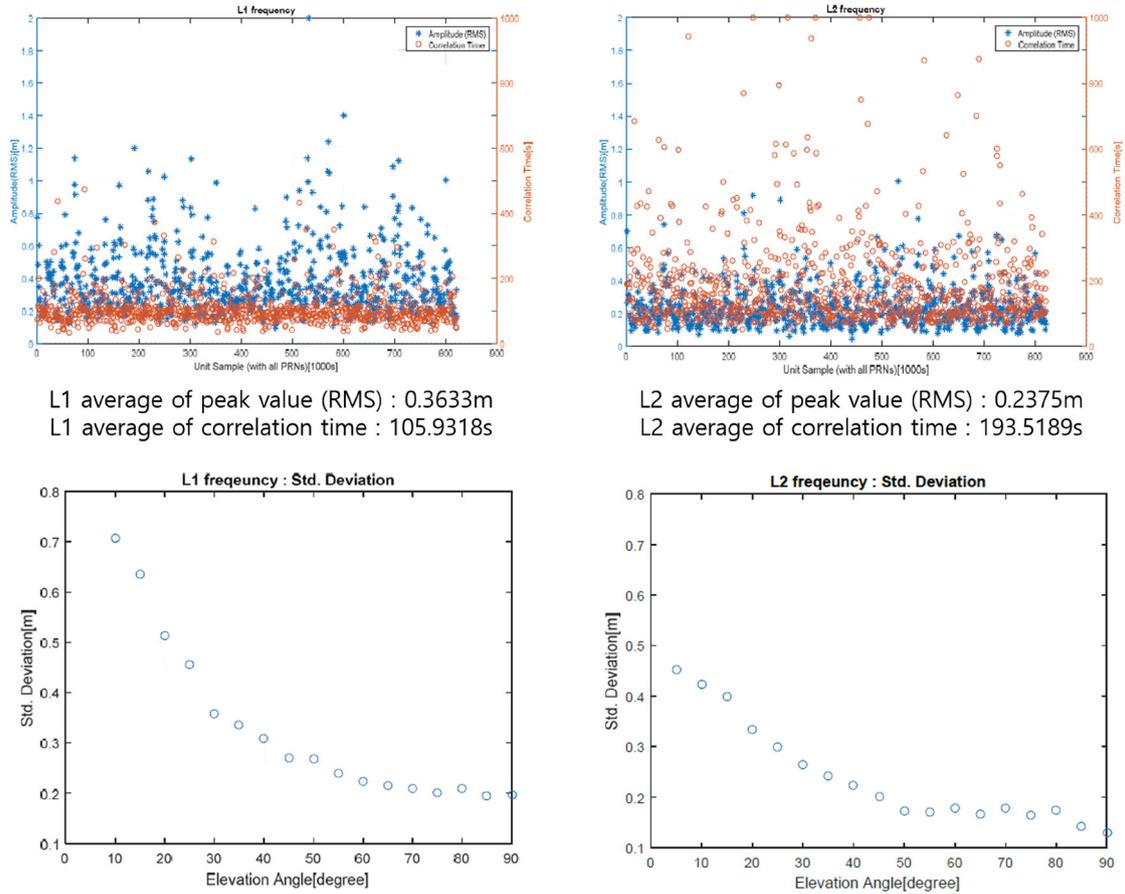


Fig. 6. The example of analysis of multipath error (Young-do NDGPS/first antenna/24-hour collection).

- 광주 LORAN-C L2 주파수 평균 상관시간: 370~405 s
- 제주공항 L2 주파수 평균 상관시간: 430~450 s
- 양양공항 L2 주파수 평균 상관시간: 450~505 s

4. 다중경로 오차 모델링 확인

다중경로 오차는 사이트의 각 안테나 설치 위치의 전파 수신 환경에 따라 다르게 발생한다. SPEED 플랫폼의 입력 시나리오 생성을 위해 각 사이트의 각 안테나 설치 위치에서 모든 가시위성에 대해 신호를 수집하고 다중경로 오차를 분석한 후, 다중경로 오차 모델링에 필요한 표준편차 및 시상수 파라미터를 결정하였다.

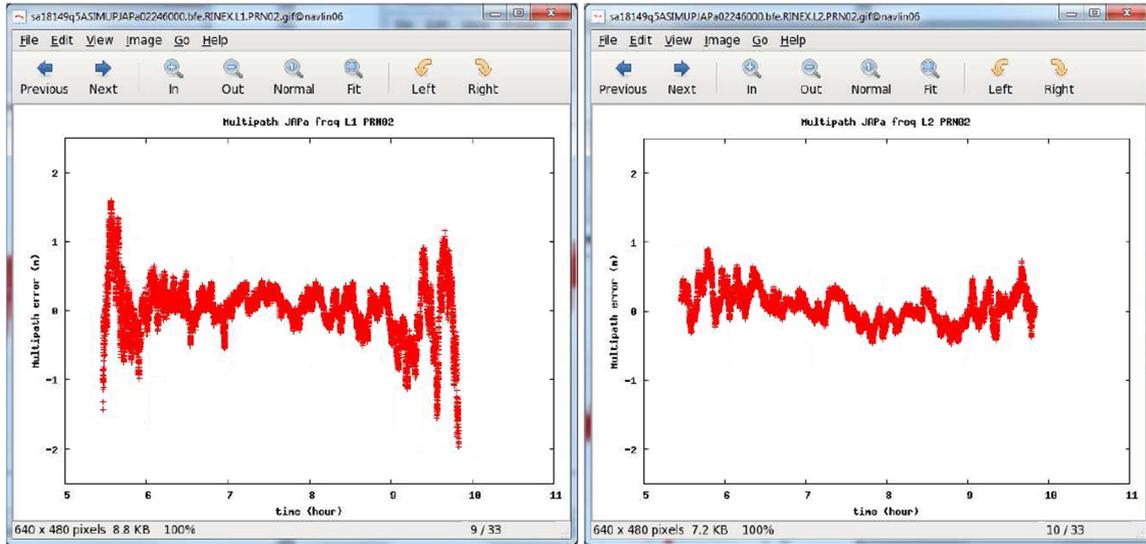
전파 수신 환경의 특성에 따라 모든 위치에서의 다중경로 오차가 제대로 반영되었는지 수치적으로 확인하기는 어렵다. 따라서 다중경로 오차 모델링 확인을 위해 각 사이트의 분석결과 기반으로 수치를 입력하여 구성파일을 생성하고 RDG 시뮬레이터를 이용하여 시나리오를 생성하였다. RDG 시뮬레이터는 KASS 사업의 국외공동개발업체인 TASF사에서 사용 중인 시뮬레이터로 자체적인 자격 검증을 수행한 시뮬레이터이다. 생성된 시나리오오는 다중경로 오차뿐만 아니라 위성신호, 전리층 오차, 시스템 구성 등의 SBAS 시뮬레이션을 위한 모든 데이터를 포함하고 있

다. 이 시나리오로 데이터로부터 CCC를 추정하고 이를 사이트에서 직접 수집하여 추정된 CCC와 비교를 통해 다중경로 오차 모델링을 확인하였으며, 결과는 Fig. 7과 같이 유사한 경향 및 수치를 확인하였다.

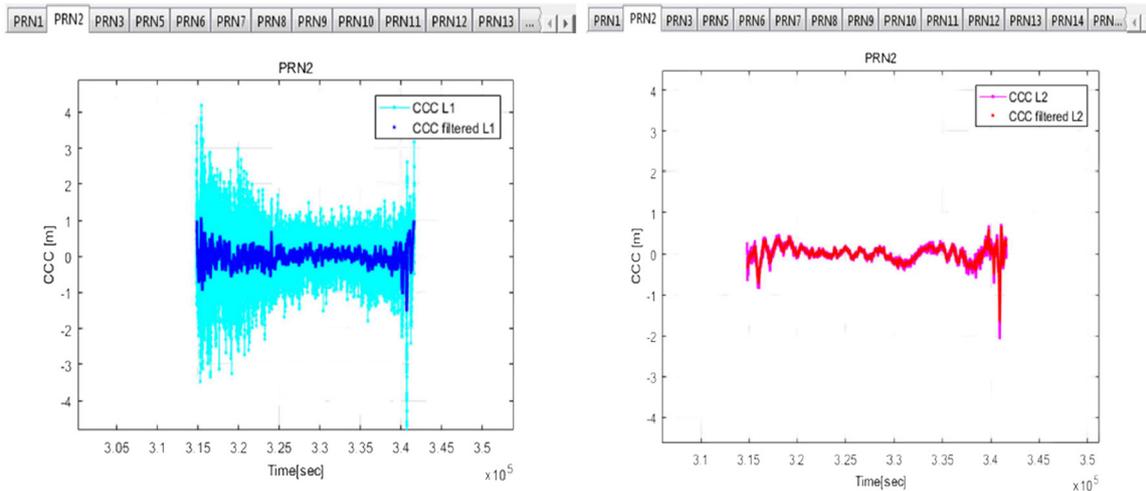
5. 결론

본 논문에서는 현재 한국항공우주연구원에서 개발·구축 중인 KASS의 기준국 7개소에서 수집한 데이터를 바탕으로 각 기준국 안테나 설치위치에서의 다중경로 오차 분석 방법 및 분석 결과를 제시하였다. 또한 분석 결과를 바탕으로 각 사이트에서의 다중경로 오차 모델링을 수행하고, 생성한 시나리오를 바탕으로 모델링의 적절성을 확인하였다.

다중경로 오차 분석 결과 낮은 양각에서 기준 다중경로 오차(사이트 다중경로 요구사항)에 비해 다소 높은 오차를 보였다. 이는 현재 사이트에 대한 기초공사 및 다중경로 경감 작업이 수행되지 않아 주변 장애물 및 지표면 반사로 인한 영향으로 다중경로 오차가 증가된 것으로 판단된다. 기준국 사이트 설치 및 구축 시 전파 수신 환경 개선을 통해 다중경로 오차를 경감하고, 요구사항에 만족하도록 할 예정이지만, 지리적 한계에 의해 불가피하게 요구사항이 만족되지 않을 경우를 대비하여, 추후 다중경로



(a) The CCC of generated scenario using RDG



(b) The analyzed CCC of collected signal in site

Fig. 7. The validation of multipath error model.

오차 크기에 따라 전체 시스템에 미치는 성능 영향 분석을 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 국토교통부 항공안전기술개발사업의 연구비 지원(19ATRP-A087579-06)에 의해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The Manuscript with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided.

The following statements should be used “conceptualization, S.L. Cho and H.H. Choi; methodology, H.H. Choi; software, S.L. Cho and H.H. Choi; validation, S.L. Cho and H.H. Choi; investigation, B.S. Lee and G.W. Nam; data curation, S.L. Cho; writing original draft preparation, H.H. Choi; writing-review and editing, S.L. Cho, H.H. Choi, B.S. Lee and G.W. Nam; supervision, B.S. Lee and G.W. Nam; funding acquisition, G.W. Nam”. Authorship must be limited to those who have contributed substantially to the work reported.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Cho, S. L., Lee, B. S., Choi, J. Y., & Nam, G. W. 2018, Development of the KASS Multipath Assessment Tool, JPNT, 7, 267-275. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2018.7.4.267>
- Son, M. H., Lee, J. E., Jang, H. J., Cho, S. L., Choi, J. Y., et al. 2018, A detailed survey on the GPS radio environment of the candidate site of KRS, in Navigation System Conference, 7-9 Nov 2018, Jeju, Korea.
- Yang, Y., Hatch, R. R., & Sharpe, R. T. 2004, GPS multipath mitigation in measurement domain and its applications for high accuracy navigation, in Proceeding of ION GNSS 2004, Long Beach, California, 21-24 Sep 2004, pp.1124-1130.
- Weiss, J. P. 2007, Modeling and characterization of multipath in global navigation satellite system ranging signals, PhD Dissertation, University of Colorado, CO.



Sunglyong Cho received the B.S. and Ph.D. degree in the Department of Electronics Engineering from Chungnam National University, Korea in 2007 and 2015, respectively. He is now working in Korea Aerospace Research Institute. His research interests include Precise positioning system, SBAS Safety & GNSS measurement analysis (Multipath Error) technologies.



Heonho Choi received the B.S. and Ph.D. degree in the Department of Electronics Engineering from Chungnam National University, Korea in 2007 and 2015, respectively. He is now working in Korea Aerospace Research Institute. His research interests include Precise positioning system, SBAS system engineering & performance analysis technologies.



Byungseok Lee received the B.S. and Ph.D. degree in the Department of Electrical and computer Engineering from University of Seoul, Korea 2002 and 2015, respectively. He is now working in Korea Aerospace Research Institute. His research interests include system control, SBAS system engineering technologies.



Giwook Nam received a B.S. in aeronautical science & flight operation and M.S. in aeronautical engineering from Korea Aerospace University, South Korea, in 1983 and 1988, respectively. And he received his Ph.D. degree in aerospace system design from the College of Aeronautics, Cranfield University, U.K., in 1997. He is currently a head of SBAS program office at the Korea Aerospace Research Institute, South Korea. He works on global navigation satellite systems and system safety.

