

저궤도 항법의 FSL 영향 분석에 관한 연구

최철희*, 원대희, 이은성

한국항공우주연구원

*choich@kari.re.kr, dhw@kari.re.kr, koreagnss@kari.re.kr

A Study on Effects of Free Space Loss in LEO PNT

Chulhee Choi*, Daehee Won, Eunsung Lee

Korea Aerospace Research Institute

요약

기존 GNSS(Global Navigation Satellite System)를 보완하거나 대체하기 위한 LEO-PNT(Low Earth Orbit-Positioning, Navigation and Timing) 관련 연구 및 개발이 국내외에서 활발히 진행되고 있다. LEO 위성은 200~2,000km 사이의 낮은 궤도에서 운용되며, MEO(Medium Earth Orbit) 위성은 약 20,000km의 고도에 위치한다. LEO 위성은 MEO 위성 대비 궤도 고도가 낮아 수신 신호 강도가 높고 신호의 경로 지연이 짧다는 장점이 있으며, 광대역 통신 신호와 결합하여 PNT 서비스를 구현할 수 있다. 다만, 위성 가시시간이 짧기 때문에 전파 손실은 작지만 빠르게 이동하는 위성으로 인한 도플러 보정이 필수적이다. 본 논문에서는 LEO-PNT 환경에서의 전파 특성을 분석하고, 신호 설계시 고려해야 할 링크 버짓 계산을 위한 FSL(Free Space Loss)의 개념과 특성을 정의한다. 또한, LEO 위성을 이용한 항법 서비스 제공 시 주파수, 고도, 양각, 도플러 효과 등의 영향에 대한 분석 결과를 제시한다.

I. 서론

기존의 GPS, Galileo, BeiDou, GLONASS 등의 GNSS(Global Navigation Satellite System) 기반 PNT(Positioning, Navigation and Timing) 서비스는 국방, 금융, 산업 등 다양한 분야에서 핵심적인 역할을 수행하고 있다. 하지만 스푸핑, 제밍 등 위협이 증가함에 따라, LEO(Low Earth Orbit) 위성의 고출력, 저지연 특성을 활용하여 기존 GNSS를 보완하거나 대체하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. LEO PNT는 MEO(Medium Earth Orbit) 위성 대비 전파 손실이 적지만, 빠른 상대속도와 낮은 궤도 고도로 인해 신호 강도와 잡음 특성이 크게 변화하므로 정확한 전파 모델링이 필수적이다. FSL(Free Loss Space)은 위성과 사용자 수신기 간의 자유공간 전파 손실을 나타내며, 링크 버짓을 계산할 때 고려해야 하는 중요한 요소 중 하나이다[2]. 따라서, 본 논문에서는 LEO 환경에서 FSL 분석을 위한 주요 고려사항을 도출하고, 영향에 대한 분석을 수행하고자 한다. 이를 위해 자유공간에서 전파가 송신되는 과정에서 발생하는 FSL 개념과 특성을 기술하고, 궤도 고도, 운용 주파수, 위성 가시성, 도플러 효과 등이 FSL에 미치는 영향을 분석하여 제시한다.

II. 본론

II-1. FSL 개념 및 특성

FSL은 전파가 송신되는 자유공간에서 거리와 주파수에 따라 신호가 감쇠하는 현상으로 공기, 대기, 이온층 등 매질의 흡수 뿐 아니라, 전파가 구면파로 퍼지면서 에너지가 분산되기 때문에 발생한다. 이러한 전파 특성은 신호 감쇠, 도플러 효과, 다중경로, 이온층 및 대류층 영향과 함께 시스템 성능을 결정하는 중요한 요소로 작용한다. 가시성(Line-of-Sight)이 확보된 자유공간 경로에 대한 모델은 다음 수식 (1)과 같다[2].

$$FSL(dB) = 10\log \left[\frac{4\pi df}{c} \right]^2 \quad (1)$$

수식 (1)에서 d 는 신호 송수신 거리(m), f 는 송신 주파수(Hz), c 는 빛의 속도(m/s)를 의미한다. FSL은 이론적 손실 값으로, 실제 LEO 환경에서는 대기 감쇠 및 산란, 위성 안테나 빔 패턴, 수신기 안테나 이득 등 다양한 요소를 추가적으로 고려해야 한다. 또한 3GPP TR 38.811에서는 표 1과 같이 위성파와 지상 채널의 경로 손실이 Free Space Loss, Shadow Fading Loss, Clutter Loss, 대기 흡수, 전리층/대류권 신틸레이션, 건물 침투 손실과 같은 여러 구성 요소로 이루어진다고 정의하고 있다[3]. 이러한 구성 요소들을 살펴보면 FSL이 거리와 신호 주파수에 따라 영향을 받는 것을 확인할 수 있다[3].

표 1. Large-Scale Path Loss of Satellite-Terrestrial [3]

Item	Feature
Free Space Loss	• Separation distance and signal frequency
Shadow Fading Loss	• Geometric elevation angle, building intensity, and signal frequency
Clutter Loss	• Geometric elevation angle and signal frequency
Atmospheric Attenuation	• Elevation angle, altitude above sea level, water vapor density (absolute humidity), and signal frequency.
Iono/Trop Attenuation	• Rapid fluctuations of the received signal amplitude and phase • Scintillations depend on location, time-of-day, season, solar and geomagnetic activity.
Building Penetration	• Varies significantly depending on the location within the building and the construction details of the building

II-2. 저궤도 항법의 FSL 영향 분석

LEO 위성은 낮은 궤도 고도로 인해 Footprint 영역이 좁은 특성을 가지

며, PNT 서비스를 제공하기 위해서는 높은 고도각을 가진 소수 위성을 사용해야 한다는 제약이 있다. LEO 위성은 MEO 위성 대비 거리가 짧아 FSL이 감소하며, 동일한 출력으로 전파를 송신할 경우 더 높은 SNR(Signal - Noise-Ratio)을 확보할 수 있다. 그림 1은 LEO 환경에서 양각과 거리에 따른 FSL의 영향을 보여주는 결과로, 위성과 사용자 수신기 간 거리가 증가하면 지상의 커버리지 면적이 넓어지지만 전파 손실 또한 커지는 것을 확인할 수 있다[4].

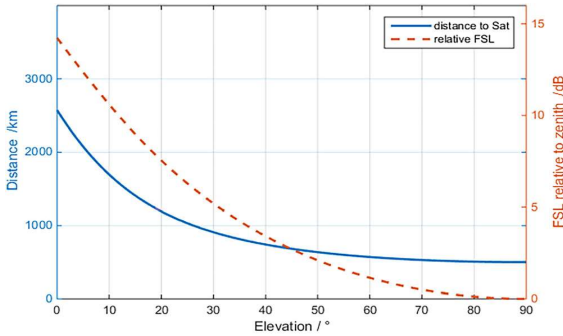


그림 1. Distance and Relative FSL for LEO Height [4]

주파수 대역이 높아질수록 파장은 짧아져 전파 에너지 손실은 줄어들지만, 대기 감쇠, 강우 감쇠, 반사 및 굴절에 더 민감하게 반응하여 신호 감쇠가 발생할 수 있다. 따라서 그림 2와 같이 주파수 대역이 높아질수록 전파 경로 손실이 커지므로, 안테나 이득과 출력 보강을 고려해야 한다[5].

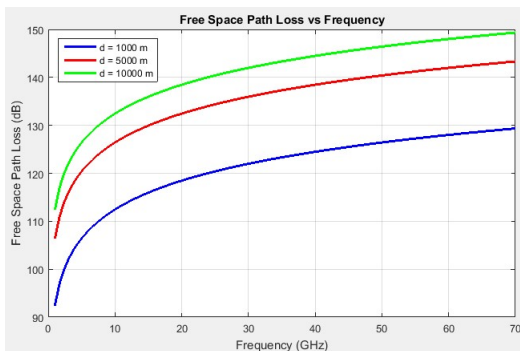


그림 2. FSL against Frequency for Distance [5]

위성의 고도가 낮을수록 속도가 증가하며, 고도가 낮아질수록 도플러 속도 또한 증가한다. 또한 주파수가 높을수록 도플러 효과가 커지는 특성이 있다. 즉, 도플러 효과는 위성 속도와 반송파 주파수가 모두 높을수록 증가하는데, LEO의 C-대역은 MEO의 L-대역 대비 약 20배 높은 도플러 주파수가 발생한다. LEO 위성의 도플러 효과는 위성 및 사용자 간의 상대 속도 정보를 제공하여 위치 결정에 있어 유용하다. 하지만 약 700 kHz의 도플러 주파수는 통신 심볼 레이트와 비교했을 때 심각한 서브캐리어 간 간섭을 초래하고 복조 성능을 저하시킬 수 있다. 따라서 항법과 통신을 함께 고려한다면, 통신에서의 부정적인 영향을 완화하기 위한 방안을 고려할 필요가 있다[3][6].

LEO 위성의 가시성과 관측 가능 시간, 재진입 시간은 궤도 특성에 따라 다르다. 중위도 궤도를 공전하는 Starlink(약 43~74°)와 극궤도를 공전하는 OneWeb(약 87.9°) 위성을 분류하여 분석한다. Starlink 위성의 공전 시간은 약 98분, 관측 가능 시간은 약 9분이며, 이탈 후 재진입까지 약 89분이 소요된다. OneWeb 위성의 공전 시간은 약 112분, 관측 가능 시간은 약 15분이며, 이탈 후 재진입까지 약 97분이 소요된다. 두 위성 모두 항법

서비스 관점에서 LEO 위성을 포함하면 초기 수립은 빠르지만, 위성의 가시성 변화가 지나치게 많아 Fixed Solution 적용에는 어려움이 있다. 따라서, 서비스 목적에 따라 가시성 변화가 빈번하지만 짧은 접속과 가시성 변화가 덜 빈번하지만 긴 접속 특성을 고려할 필요가 있다[6].

III. 결론

본 연구에서는 국내외 연구동향 분석을 기반으로 LEO-PNT 환경에서 링크 버짓을 계산할 때 고려해야 하는 기술적 요소를 제시하였다. LEO 위성은 낮은 궤도 고도와 다양한 운용 주파수를 채택할 가능성이 높으며, 이에 따라 FSL 영향이 기존 GNSS와 차이가 있을 수 있다. 따라서 LEO PNT 신호 설계를 위한 고려사항을 분석하여 제시하였다. 특히, 국내 환경에서는 빔 커버리지와 Footprint 영역이 좁아 소수 위성을 이용할 때 PNT 서비스 제공에 제약이 있을 수 있으므로, 높은 고도각 확보를 위한 위성 배치를 고려할 필요가 있다. 본 연구를 통하여 분석한 결과는 향후 “IOD 위성” 개발과 같은 한국형 저궤도 항법 시스템 개발에 있어 핵심 요소 정보로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국항공우주연구원의 자체연구사업인 “한국형 다중계층 항법을 위한 저궤도 위성항법 기반 기술 연구”의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Michel, M., Hanaa, A. B., “LEO PNT: A Fundamental Evolution to Answer New Application Needs”, Inside GNSS, June 4, 2025.
- [2] Syazana Basyirah Mohammad Zaki et al., “Effective Link Budget for Nanosatellite (UiTMSAT-1) Communication Subsystem Store-and-Forward Mission”, Proceeding of the 2020 IEEE 5th International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT).
- [3] Jie Ma et al., “Integrated Positioning and Communication via LEO Satellites: Opportunities and Challenges”, Electrical Engineering and Systems Science, 30 Nov 2024.
- [4] Dirk Giggenbach et al., “Link budget calculation in optical LEO satellite downlinks with on/off-keying and large signal divergence: A simplified methodology”, Int J Satell Commun Network. 2023;41:460 - 476.
- [5] Iyoloma C.I., Ibanibo T. S., Okudu M. N., “Characterisation Free Space Path Loss: Sub-6ghz and Millimetre Wave Frequency”, International Journal of Current Science Research and Review, Vol 07, Issue 07, July 2024.
- [6] J. H. Won, “Future Satellite Navigation Technologies and Service-LEO PNT”, 2025 IPNT Technical Workshop , 2 July 2025.