

저궤도-정지궤도 위성 인라인 간섭 대응을 위한 위성 전파 감시 기술 동향

이종범, 김용균, 박민용, 김영한, 이준서, 이병주
인천대학교 정보통신공학과

{sjgsjb3, yonggyunkim, pmy1143, hyoks1211, 201901706, bjlee}@inu.ac.kr

Recent Trends in Radio Frequency Monitoring Technologies for LEO-GEO In-line Interference

Jongbeom Lee, Youngkyun Kim, Minyong Park, Yeonghan Kim, Junseo Lee, Byungju Lee
Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National University

요 약

최근 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성 기반 통신 기술의 급속한 발전에 따라, LEO 위성은 차세대 통신 시스템의 핵심 기술로 부상하고 있다. LEO 위성은 낮은 궤도 특성으로 인해 기존 정지궤도(Geostationary Earth Orbit, GEO) 위성보다 저지연·고속 통신이 가능하며, 군집 운용을 통해 광역 커버리지를 제공할 수 있다. 그러나 GEO 및 LEO 위성이 동일한 주파수 대역을 사용할 경우, GEO 위성 사용자에게 심각한 LEO-GEO 인라인 간섭이 발생할 수 있다. 이에 따라, 안정적인 통신 품질 확보를 위해 LEO 위성에 대한 효과적인 전파 감시 기술의 도입이 필수적이다. 본 논문에서는 위성 전파 감시 기술을 살펴보고, 주요 국가의 LEO 위성 전파 감시 시스템 동향을 분석한다.

I. 서 론

최근 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성 기반 통신 기술의 급속한 발전으로 인해, LEO 위성은 차세대 글로벌 통신 인프라의 핵심 기술로 주목받고 있다. LEO 위성은 낮은 궤도 특성으로 인해 기존의 정지궤도(Geostationary Earth Orbit, GEO) 위성보다 지연 시간이 짧고 데이터 전송 속도가 빠르다. 또한, 다수의 위성을 군집 형태로 운용됨으로써 전 지구적 커버리지를 제공할 수 있다 [1]. Starlink, OneWeb 등 주요 민간 기업들은 LEO 위성 기반의 군집 통신 시스템 구축을 위해 활발한 위성 배치를 진행 중이다.

LEO 위성은 주로 Ka 대역 (26.5-40GHz)과 Ku 대역 (12-18GHz)을 활용하여 통신 서비스를 제공한다. 그러나 이러한 주파수 대역은 기존 GEO 위성 시스템과 중복되어, 대규모 LEO 위성 시스템 구축 시 주파수 간섭 문제를 야기할 수 있다. 안정적인 통신 서비스를 보장하기 위해서는 LEO-GEO 간 주파수 간섭에 대한 정밀한 관리 및 실시간 감시 체계가 필수적이다. 본 논문에서는 위성 전파 감시를 위한 주요 기법들을 살펴보고, 이를 기반으로 주요국 및 국내의 감시 기술 동향을 고찰한다.

II. 위성 전파 감시 기술

스펙트럼 모니터링은 특정 주파수 대역 내 전파 신호의 세기와 패턴을 감시하여 비정상 신호 및 간섭을 탐지하는 기술이다. 국제전기통신연합(ITU-R)은 위성 감시 체계 구축을 위한 기준을 제시하고 있으며, 고정형 지상국은 정지궤도 및 비정지궤도 위성 신호의 안정적인 감시를 위한 핵심 인프라로 활용된다. 이러한 시스템은 안테나와 스펙트럼 분석기를 통해 주파수 점유율, 변조 방식, 도플러 주파수, 전력 플럭스 밀도(Power Flux Density, PFD), 반송파 대 잡음비(C/N₀) 등 다양한 파라미터를 측정하고, 수집된 데이터는 이상 신호 탐지 및 간섭원 추적 등에 활용된다. 특히, 고속으로 이동하는 LEO 위성에 효과적으로 대응하기 위해서는 실시간 분석이 가능한 시스템이 요구되며, 이를 보완하기 위해 차량, UAV,

위성 등에 탑재된 이동형 감시 체계도 병행 운용된다 [2].

한편, 기존의 전력 스펙트럼 밀도(PSD) 기반 분석 방식은 낮은 SNR 환경이나 알려지지 않은 간섭 유형에 취약하다는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 기반 간섭 감지 기술이 도입되고 있으며, 원래의 I/Q 샘플을 입력으로 활용하여 별도의 특징 추출 없이 신경망이 간섭 특성을 자동으로 학습하고 분류할 수 있다 [3]. 주요 접근 방식으로는 CNN, RNN(LSTM), 오토인코더 기반 이상 탐지 모델 등이 있으며, 간섭 존재 여부 탐지, 간섭 유형 분류, 제밍(jamming) 신호 검출 등 다양한 환경에서의 적용 가능성이 활발히 연구되고 있다.

간섭의 존재를 탐지하는 것뿐만 아니라, 그 위치를 정확히 추정하는 기술 또한 감시 체계의 핵심 요소 중 하나이다. ITU-R 보고서에 따르면, TDOA(Time Difference of Arrival)와 FDOA(Frequency Difference of Arrival)는 간섭원의 위치를 추정하는 데 널리 사용되는 수신 기반 측정 기법이다. TDOA는 동일한 간섭 신호가 복수의 수신 지점에 도달하는 시간 차이를 이용하여 위치를 계산하며, FDOA는 도플러 주파수 차이를 활용하여 간섭원의 상대 속도와 위치 정보를 보완한다. 일반적으로 두 기법은 상호 보완적으로 결합되어 사용되며, 이를 통해 간섭원이 존재할 가능성이 높은 지리적 영역이 도출된다.

한편, TLE(Two-Line Element) 데이터는 위성의 평균 궤도 요소를 두 줄의 문자열로 표현한 형식이며, SGP4(Simplified General Perturbations-4)는 이를 기반으로 위성의 위치 및 속도를 예측하는 데 사용된다. 이 방식은 궤도 예측에 널리 활용되지만, TLE가 평균 궤도를 나타내므로 실제 위성 위치와의 오차가 존재하며, 시간 경과에 따라 누적 오차가 수 km 이상 발생할 수 있다. 따라서 실시간 피드백 없이 TLE/SGP4 모델 기반 개방 루프(open-loop) 지상 추적 방법론은 정확도 측면에서 한계가 있다 [4].

STAN(Simultaneous Tracking and Navigation)은 초기 위성 상태를 TLE 기반으로 파악한다는 점에서는

기존 SGP4 방식과 동일하지만, 수신기가 획득한 실제 측정값을 활용하여 이동체의 상태와 함께 LEO 위성의 위치 및 속도를 필터 내에서 동시에 추정하는 폐쇄루프(closed-loop) 기반 기법이다. 이 방식은 SGP4 의 불확실성 한계를 극복할 수 있으며, 위성 수가 증가할수록 성능이 향상되는 특성을 가진다. 특히, SGP4 기반 예측의 오차가 큰 환경에서도 수 미터 수준의 정확도를 달성할 수 있어, LEO 위성을 활용한 고정밀 PNT(Positioning, Navigation, and Timing) 기술 구현에 기여할 수 있다 [5].

III. 국내외 저궤도 위성 감시 시스템 동향

3.1 미국의 위성 감시 시스템

미국은 1977 년부터 미연방통신위원회(FCC) 집행국 산하 콜럼비아 위성전파감시센터를 통해 위성 전파 감시 업무를 수행해 오고 있다. 주요 업무는 연방 규정에 따른 위성 간섭 해소, ITU 및 민간 통신규제기관으로부터 보고된 위성망 간섭 조사, 규정 위반 사례에 대한 조사 및 해결, 위성 관련 정보의 수집 및 제공 등을 포함한다. 또한, 미국에는 혼신원 추적 시스템으로 널리 알려진 LLC 사가 있으며, 이는 위성 간섭 및 중계기 불법 사용 등과 관련된 송신 위치를 탐지하는 TLS(Transmitter Location System)를 개발하여 상용화한 업체로 1991 년에 설립되었다.

3.2 유럽 연합의 위성 감시 시스템

유럽우주국(ESA)은 회원국 간 우주 개발 협력을 촉진하고, 과학 탐사부터 실용 위성 개발에 이르기까지 종합적인 유럽 우주정책을 수행하기 위해 설립되었다. 목적으로 한다. ESA 산하 유럽우주천문센터(ESAC)는 RFI(Radio Frequency Interference) 모니터링을 위한 도구인 RMIT (ESA RFI Monitoring and Information Tool)를 개발하였다. 이 도구는 스펙트럼 모니터링 업무를 지원하며, RFI 오염에 효율적으로 대응하고 외부 사용자에게 위성이 관측한 L-band 대역의 RFI 정보를 직관적으로 제공한다.

3.3 대한민국의 위성 감시 시스템

대한민국은 과학기술정보통신부 산하 중앙전파감시소 소속 위성전파감시센터를 통해 위성 전파 감시 업무를 수행하고 있다. 본 센터는 2001 년에 설립되었으며, 한반도 상공의 국내 · 외 위성이 ITU 에 등록된 궤도 위치를 준수하는지 여부를 점검하고, ITU 규정을 초과한 외국 위성의 유해 전파 발사를 탐지·처리함으로써 국내 위성 통신망 보호 및 전파 주권 수호를 담당한다. 국내에서는 혼신원 탐색을 위한 HISS(Harmful Interference Searching System) 시스템이 운용 중이며, 이는 피해 인성과 인접 위성의 두 지상국에 혼신 신호가 동시 수신될 때 작동하도록 설계되어 있다. 혼신원의 위치 산출을 위해 피해 위성 및 인접 위성의 위치 벡터, 속도 벡터, 국부 발진 주파수 등의 정보를 관제국으로부터 전달받아 HISS 시스템에 직접 입력하는 구조를 갖는다.

IV. 결 론

본 논문에서는 LEO 위성의 확산으로 인한 전파 간섭 문제를 중심으로, 스펙트럼 모니터링, AI 기반 간섭 감지, TDOA/FDOA 기반 위치 추정, TLE/SGP4 궤도 예측 등 기존 감시 기술의 개념과 특징을 정리하였다.

또한, 정밀도와 실시간 대응이 요구되는 환경에서 기존 기법의 한계를 보완하기 위한 STAN 기법을 살펴보았으며, 주요국 및 대한민국의 위성 감시 시스템 운영 현황도 함께 소개하였다. 향후 위성 통신의 고도화와 함께 이러한 기술들의 지속적인 발전은 신뢰성 높은 간섭 감시 체계 구축에 기여할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터사업 (IITP-2025-RS-2023-00259061)의 연구결과로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] H. Lee, B. Lee, H. Yang, J. Kim, S. Kim, W. Shin, B. Shim, and H. V. Poor, "Towards 6g hyper-connectivity: Vision, challenges, and key enabling technologies, " *Journal of Communications and Networks*, vol. 25, no. 3, pp. 344-354, 2023.
- [2] ITU-R, Measurement techniques and new technologies for satellite monitoring, ITU, 2018.
- [3] A. Saifaldawla, F. G. Ortiz-Gomez, E. Lagunas, S. Daoud, and S. Chatzinotas, "NGSO-to-GSO satellite interference detection based on autoencoder," in Proc. IEEE 34th Annu. Int. Symp. Pers., Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC), Sep. 2023, pp. 1-7.
- [4] A. K. Tiwari, R. Mehto, S. Tiwari and P. Kumar, "3D Satellite Visualization using SGP4," 2023 IEEE Fifth International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEC), Bengaluru, India, 2023, pp. 1-5.
- [5] Z. M. Kassas and J. Saroufim, "LEO PNT Frameworks for Non-Cooperative Satellites With Poorly Known Ephemerides: Open-Loop SGP4, Tracking, and Differential," in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine.