

저궤도 위성 간섭 감시를 위한 K-Means 군집화 및 LSTM 기반 감시국 배치 방안

김영한, 이병주
인천대학교 정보통신공학과
{hyoks1211, bjlee}@inu.ac.kr

K-Means Clustering and LSTM based Monitoring Station Placement for LEO Satellite Interference Monitoring

Yeonghan Kim, Byungju Lee
Department of Information and Telecommunication Engineering
Incheon National University

요약

본 논문은 최근 급증하는 저궤도 군집 위성이 기존 정지궤도 위성망에 미치는 간섭 영향을 분석하고, 효율적인 감시를 위한 감시국 배치 방안을 제안한다. 대한민국 전역을 격자 단위로 세분화한 후, 각 격자점에서 Starlink 위성이 무궁화 5 호 수신국에 유발하는 누적 간섭 핫수를 산출하여 데이터셋을 구축하였다. K-Means 군집화 알고리즘을 적용하였으며, Elbow method 를 통해 총 5 개의 감시국 수 및 위치를 도출하였다. 또한, LSTM 기반 딥러닝 모델을 설계하여 간섭 패턴을 학습하고 미래 간섭 위험을 예측하는 능동적 감시체계를 구현하였다. 본 연구는 정지궤도-저궤도 공존 환경에서 선제적 전파 감시 체계 설계의 가능성을 제시한다.

I. 서론

최근 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성 기반 통신 기술의 발전으로 대규모 위성 군집 구축이 가속되고 있으며, Starlink, OneWeb 등 주요 위성 사업자들은 수천 기 규모의 LEO 위성을 운용하고 있다. 그러나 다수의 LEO 및 기존 정지궤도(Geostationary Orbit, GEO) 위성 시스템이 Ku 및 Ka 대역을 공유함에 따라, LEO 위성이 GEO 위성과 지상국 간 통신 링크를 침범하는 인라인 간섭(In-line Interference)이 발생할 수 있으며, 이는 통신 품질 저하로 이어질 수 있다. 국제전기통신연합(ITU)은 등가 전력속 밀도(Equivalent Power Flux Density, EPFD) 규제 등을 통해 이러한 간섭을 관리하고 있으나, 고속 이동하는 대규모 위성 군집 환경에서는 간섭의 시공간적 변동성이 커 실시간 감시 및 대응에 한계가 있다. 따라서 GEO-LEO 공존 환경에서 안정적인 위성 통신 서비스를 보장하기 위해서는 LEO 위성으로부터 발생하는 간섭을 효율적으로 감시할 수 있는 전파 감시국의 최적 배치가 필수적이며, 본 논문에서는 이를 위한 감시국 수 및 배치 방안을 제안한다.

본 연구에서는 MATLAB 기반 시뮬레이션을 통해 Starlink 위성군이 무궁화 5 호 수신국에 미치는 간섭 영향을 모델링하고 간섭 위험 데이터셋을 구축한다. 이를 바탕으로 K-Means 군집화 알고리즘을 적용하여 전 국토 범위에서 간섭 포착 확률을 최대화하는 감시국 배치 방안을 도출한다 [1]. 또한, LSTM(Long Short-Term Memory) 기반 딥러닝 모델을 통해 과거 간섭 패턴을 학습하고, 미래 간섭 핫스팟을 예측함으로써 능동적 전파 감시 체계의 가능성을 제시한다.

II. 인라인 및 누적 간섭 전력 기반 간섭 판정

본 논문에서는 GEO 와 LEO 위성 시스템이 동일 주파수를 공유하는 간섭 환경을 가정하였다. GEO 위성과 지상국 간 통신에 미치는 간섭 영향을 정량적으로 평가하기 위해 인라인 조건과 ITU-R S.1432-1 권고안 기반의 누적 간섭 전력 조건의 두 가지 기준을 수립하였다 [3]. 인라인 조건은 LEO 위성이 GEO 위성과 지상국을 연결하는 통신 경로를 기준으로 임계각 5 도 이내에 위치하는지를 판단하는 기준이다 [4]. 누적 간섭 전력 조건은 인라인 조건을 만족하는 모든 LEO 위성으로부터 지상국에 수신되는 총 누적 간섭 전력이 -130 dBW 를 초과하는지를 기준으로 한다. 두 조건을 모두 만족하는 경우, 해당 시점에서 간섭 이벤트가 1 회 발생한 것으로 정의한다. 이러한 기준을 바탕으로 대한민국 전역을 격자 단위로 세분화하고, 각 격자점에서 발생하는 누적 간섭 핫수를 산출하여 간섭 분포 데이터로 활용하였다.

본 논문의 시뮬레이션 분석은 2025 년 8 월 22 일 00 시부터 10 월 20 일 09 시까지 수행되었으며, 데이터의 정밀도를 확보하기 위해 2 분 단위의 시간 간격을 적용하였다. 간섭원 모델링에는 TLE(Two-Line Element) 데이터셋을 기반으로 한 Starlink 저궤도 위성 208 기를 사용하였다 [2]. 송신 전력은 10~20 dBW 범위 내에서 무작위로 설정하였으며, 안테나 이득은 FCC 기술 기준을 반영하여 33~35 dBi 로 가정하였다. 주파수 대역은 12.5 GHz 를 사용하고, 피간섭 대상 위성인 무궁화 5 호(Koreasat-5A)는 54 dBW 의 EIRP(Effective Isotropic Radiated Power)를 갖는 것으로 가정하였다.

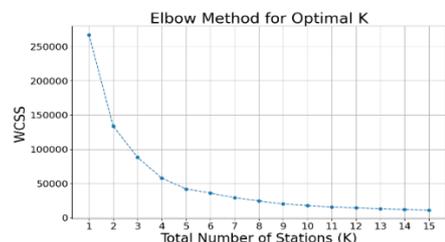
III. K-Means 군집화 기반 감시국 배치

최적의 감시국 수를 결정하기 위해, 감시국 개수를 1 부터 점진적으로 증가시키며 군집화 성능을 평가하는 Elbow method 를 적용하였다. Elbow method 의 핵심 지표인 WCSS(Within-Cluster Sum of Squares)는 각 클러스터의 중심과 해당 클러스터에 속한 데이터 포인트 간 거리 오차의 제곱합으로 정의되며, 이는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$WCSS = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (1)$$

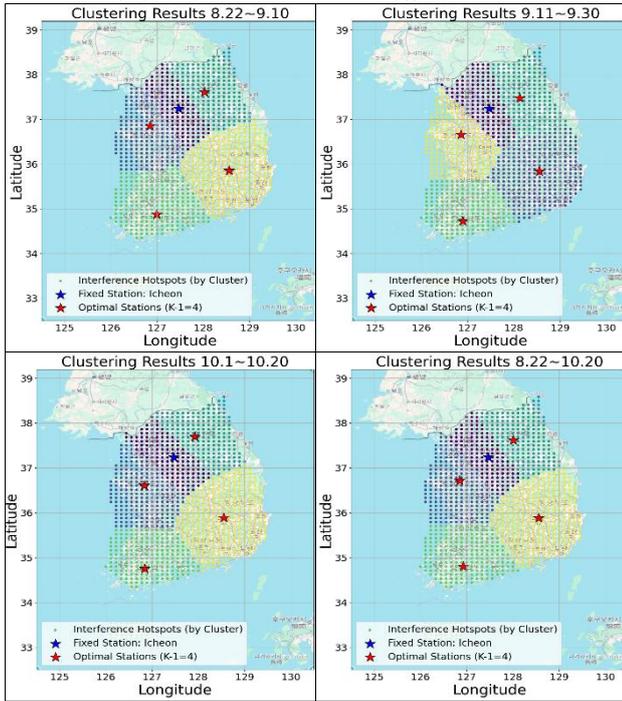
여기서 K 는 전체 클러스터의 수를 의미하며, C_k 는 k 번째 클러스터에 속한 데이터 포인트의 집합이다. 또한, x_i 는 k 번째 클러스터 C_k 에 포함된 i 번째 데이터 포인트 (예: 간섭 핫스팟의 위.경도 좌표)를 나타내고 μ_k 는 C_k 의 중심점 (예: 감시국의 위.경도 좌표)을 의미한다. $\|x_i - \mu_k\|^2$ 는 데이터 포인트 x_i 와 중심점 간의 유클리드 거리의 제곱이다. 따라서 식 (1)은 모든 데이터 포인트와 각 클러스터 중심점 간 유클리드 거리 제곱의 총합을 나타낸다.

일반적으로 감시국 수(K)가 증가할수록 각 감시국이 담당하는 영역이 축소되어 WCSS 는 감소하며, 낮은 WCSS 값은 감시국이 간섭 핫스팟의 기하학적 중심에 근접하게 배치되어 감시 효율이 높음을 의미한다. 반면, 과도한 K 증가는 과적합을 유발하고 구축 비용 대비 효율을 저하시킬 수 있으므로, WCSS 감소폭이 둔화되는 포화지점을 최적 K 로 설정하였다.



[그림 1] Elbow method 를 이용한 최적 K 탐색

[그림 1]은 Elbow method 를 이용한 최적 K 값 탐색 결과를 나타낸다. 감시국 수가 1 에서 4 로 증가하는 구간에서는 WCSS 가 크게 감소하였으며, K=5 에서 추가적인 감소가 관찰되었다. 그러나 K=6 이후부터는 WCSS 감소폭이 현저히 줄어들며 포화 양상을 보였다. 이에 따라 본 연구에서는 Elbow point 에 해당하는 K=5 를 최적의 감시국 수로 선정하였다.



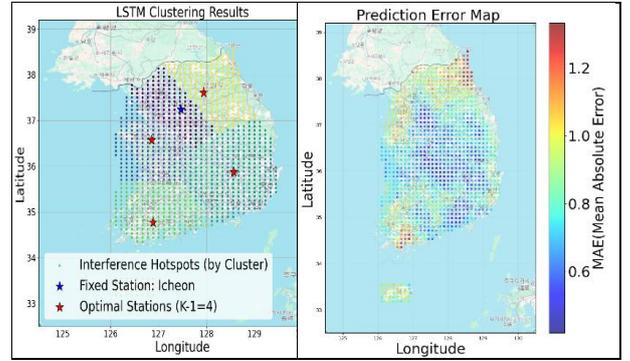
[그림 2] 기간별 K-Means 클러스터링 기반 감시국 배치 결과

[그림 2]는 시물레이션 기간에 따른 K-Means 클러스터링 결과를 한반도에 시각화한 것이다. 각 지도에는 기간별 간섭 핫스팟 분포와 함께, 감시국 수 K=5 에 대응하는 감시국 위치를 표시하였다. 도출된 감시국 위치는 대한민국 전역에서 발생하는 간섭 핫스팟의 기하학적 중심에 해당한다. 시물레이션 기간 동안 LEO 위성 궤도 변화가 존재함에도 불구하고, 간섭 핫스팟은 유사한 공간적 분포를 유지하였다. 전체 기간 시물레이션의 강건성을 검증하기 위해 [그림 2]의 우측 하단(8.22~10.20)의 결과를 기준점으로 삼아 기간별 변동성을 비교 분석하였다. [그림 2]의 좌측 하단 (10.1~10.20)구간에서 충청권 감시국이 약 20.6km 의 최대 변동 거리를 나타냈으나, 이를 포함한 전반적인 감시국 위치는 평균 10km 내외의 변동을 보이며, 감시국 위치가 안정적으로 유지됨을 확인하였다.

IV. LSTM 기반 간섭 예측 및 감시국 배치

LEO 군집 위성의 지구 주위를 고속으로 공전하는 특성으로 인해, 지상국에 유입되는 간섭 신호는 무작위적 잡음이 아니라 시공간적 패턴을 갖는 시계열 데이터로 모델링될 수 있다. 전국 격자별 일일 누적 간섭 횟수를 데이터로 사용하였다.

데이터셋은 과거 40 일(9.11~10.20) 간의 간섭 패턴을 입력으로 하고, 향후 20 일(10.21~11.9)간의 간섭 분포를 예측하도록 슬라이딩 윈도우 방식으로 구성하였다. LSTM 모델의 출력은 완전 연결 계층을 통해 각 격자별 예측 간섭 횟수로 산출된다. 과적합 방지를 위해 조기 종료 기법, L2 정규화, 드롭아웃을 적용하였으며, 손실 함수로는 MAE (Mean Absolute Error)를 사용하였다. 최적화 알고리즘으로는 비정상성을 가진 시계열 데이터 학습에 적합한 Adam optimizer 를 적용하였다. 도출된 예측값은 향후 감시국 최적 배치를 위한 가중치로 활용된다. 모델은 각 격자별 일일 간섭 횟수를 산출하였으며, 이를 누적하여 미래 간섭 히트맵을 생성하였다.



[그림 3] (a) LSTM 기반 K-Means 군집화 결과 (b) 실제값과 예측값 간의 격자별 오차(MAE) 시각화

[그림 3] (a)는 LSTM 예측값을 가중치로 적용하여 도출한 감시국의 효율적인 배치 결과를 나타낸다. [그림 3] (b)는 모델의 예측 성능을 검증하기 위해, 테스트 구간(10.21~11.09)에 대한 실제 간섭 횟수와 LSTM 예측값 간의 MAE 분포를 시각화한 것이다. 전체 영역에 대한 정량적 평가 결과, RMSE 는 1.02, MAE 는 0.80 으로 나타났으며, 이는 간섭 이벤트가 이산적인 정수 데이터임을 고려할 때 예측값이 실제 간섭 추세를 높은 정확도로 근사함을 의미한다. 공간적 오차 분포를 분석한 결과, 내륙 지역에서는 상대적으로 낮은 오차를 보인 반면, 접경 지역 및 해안 인접 지역에서는 간섭 패턴의 변동성으로 인해 다소 높은 오차가 관측되었다. 그럼에도 불구하고 전반적인 예측 오차 수준은 감시국 배치를 위한 가중치 산출에 활용하기에 충분한 정확도를 제공함을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 인라인 임계각 조건과 국제 표준인 ITU-R S.1432-1 권고안을 기반으로 간섭 판정 기준을 수립하고, 이를 통해 LEO 위성으로 인한 간섭을 정량적으로 분석하였다. Elbow method 를 활용하여 최적의 감시국 수를 도출하고, K-Means 군집화 알고리즘을 적용하여 감시국의 효율적인 배치 방안을 제안하였다. 또한, LSTM 기반 딥러닝 모델을 통해 미래 간섭 발생 분포를 예측하고 이를 실제 간섭 데이터와 비교 분석함으로써, 예측 기반 감시 전략의 유효성을 확인하였다. 이는 잠재적 간섭 위험 지역을 선제적으로 식별하고 대응할 수 있는 능동형 위성 전파 감시 체계로의 확장 가능성을 제시한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터사업 (IITP-2026-RS-2023-00259061)의 연구결과로 수행되었음

참고 문헌

- [1] Bukhari, S. M. A. H., & Song, W.-C. (2025). K-Means++ clustering-based approach for SDN controller placement in LEO satellite networks. *IEEE Access*, 13, 79771-79783.
- [2] T. S. Kelso, "Celestrak," [Online]. Available: <https://celestrak.org/>. [Accessed: August. 22, 2025].
- [3] ITU-R. (2006). Recommendation ITU-R S.1432-1: Apportionment of the allowable error performance degradations to fixed-satellite service (FSS) hypothetical reference digital paths arising from time invariant interference for systems operating below 30 GHz. International Telecommunication Union.
- [4] Sharma, S. K., Chatzinotas, S., & Ottersten, B. (2016). In-line interference mitigation techniques for spectral coexistence of GEO and N GEO satellites. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 34(1), 11-39.