

# 저궤도 위성 대용량 데이터 다운링크 항재밍 도약 성능 분석

김정훈<sup>1</sup>, 박영주<sup>1</sup>, 이동근<sup>1</sup>, 주증민<sup>1</sup>, 김상원<sup>1</sup>, 김종규<sup>1</sup>, 방종현<sup>1</sup>

<sup>1</sup>국방과학연구소

loveguitar@hanmail.net, longpole@naver.com, tbomg00@hanmail.net, gangsang@gmail.com,  
youthmic@hanmail.net, gmp1905@naver.com, bjh4138@naver.com

## Frequency hopping performance analysis for Anti-jamming at High-capacity downlink in LEO Satellite

Kim Jung Hoon, Park Young Ju, Lee Dong Keun, Joo Jeung Min,  
Kim Sang Won, Kim Jong Kyu, Bang Jong Hyeon

Agency for Defense Development<sup>1</sup>

### 요약

본 논문에서는 저궤도 위성과 지상국 사이 대용량 데이터를 다운링크하는 환경에서 의도적 교란 신호가 유입될 경우 항재밍을 위한 주파수 도약 가능성 및 교란 가능성을 분석한다.

### I. 서론

정보 수집 및 통신을 위한 위성의 활용은 과거부터 꾸준히 늘고 있는 실정이며, 특히 저궤도 위성 활용이 개발 기간, 발사체 비용, 탑재체(임무장비) 최신화 등을 이유로 최근들어 급속히 증가하고 있다. SAR, EO, IR과 같은 위성은 수집된 대용량의 데이터를 지구국으로 전송할 때 짧은 링크 시간을 극복하고자 광대역의 주파수에서 고속으로 데이터를 전송하며, 이를 위해 X band(8.025~8.4GHz)와 Ka band(25.5~27GHz)를 활용하고 있다.[1]. 최근 연구에서는 늘어나는 저궤도 위성들로 인한 비의도적 지구국 간섭 가능성[2] 및 교란 장비에 의한 의도적 교란에 관한 연구가[3]~[7] 진행중에 있다. 본 논문에서는 저궤도 위성과 지상국 사이에서 교란 장비에 의한 의도적 교란이 있을 시 주파수 도약을 이용한 항재밍 가능성과에 대해 분석한다.

### II. 저궤도 위성 대용량 데이터 링크 특징

저궤도 위성 대용량 데이터 링크는 데이터 전송율을 높이기 위해 넓은 주파수 대역폭(X band: 375 MHz, Ka band: 1.5 GHz)을 사용하며, Power flux density 규정[1]으로 인해 EIRP를 높이는 데 한계가 있다. 일반적으로 지구국 안테나의 주빔폭 요구 성능은  $1^\circ$  이하이나 통상  $0.4^\circ$  를 만족한다.

재밍으로부터 링크를 보호하기 위해 항재밍 기법으로는 확산 스펙트럼 변조, 주파수 도약, 빔 지향, 오류 정정 코드 등이 활용된다. 저궤도 위성 대용량 데이터 링크에서 항재밍을 위해 확산 스펙트럼 변조를 사용할 경우 점유 주파수 대역폭 증가, 지상-지구국 간 일대일 통신으로 확산 스펙트럼 사용 불필요하다. 빔 지향은 앞서 기술한 바와 같이 충분히 작은 빔폭으로 이미 사용되고 있으나 사이드 로브 재밍을 반영한 연구가 이미 진행중이다[7]. 대용량 데이터를 고속으로 전송하기 위해 ACK 신호를 사용하지 않아 링크시간중 재전송은 없으며, 오류 정정 코드의 사용은 실 데이

터 전송 속도를 줄이는 원인이 되기 때문에 최소한으로 사용 중이며 본 논문에서는 고려하지 않는다.

또한, 위성-지구국 간 고각에 따른 가변 변조[8]~[9]도 가능한 것으로 확인되었으며(그림 1), 이를 반대로 생각하면 재밍신호 감지시 전송률을 낮추는 변조 방식으로 항재밍을 수행할 수 있을 것으로 고려된다.

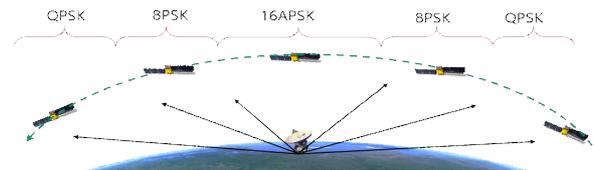


그림 1. 위성-지구국 고각에 따른 가변 변조

### III. 저궤도 위성 주파수 도약

주파수 도약 방식의 통신 방법은 하나의 주파수에 여러 심볼을 전송하는 SFH(Slow Frequency Hopping)과 하나의 심볼을 여러 주파수에 나누어 전송하는 FFH(Fast Frequency Hopping) 방식이 있다. 항재밍을 위해서는 FFH가 효과적이나 동기 확보의 어려움으로 인해 적용 가능한 변조 방식이 Non-coherent M-ary FSK로 한정되어 전송 효율이 도약 속도에 반비례하여 떨어지는 단점이 있으며, 최소의 전송 속도 확보를 위해서는 허용 주파수 대역을 초과하여 사용이 불가하다. SSH 방식을 적용할 경우에도 저궤도 위성의 빠른 속도로 인해 Doppler shift가 발생하며 지구국에서 주파수 도약 시 마다 동기확보를 위한 신호처리 시간이 발생하며[10], 도약 속도가 빨라질수록 전체 프레임 내에서 주파수 도약 동기에 할당된 시간 비율 증가로 오버 헤드에 따른 전송 효율이 하락한다. 예를 들어 Preamble이 10%인 상황에서 도약 속도를 2배, 5배로 높이면 전송 효율은 각각 0.89, 0.11로 감소하게 된다.

주파수 도약 관련 재밍/항재밍을 분석하기 위해서는 교란장비의 위치가

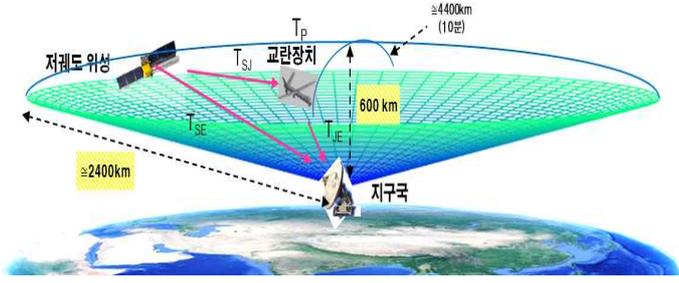


그림 2. 위성(고도 포함), 지구국, 교란장치의 시간 거리 중요하다. 그림 2는 위성의 고도가 600km 일 때, 최대 링크시간 및 위성, 지구국, 교란 장치의 시간 거리(전파지연시간)를 나타낸다. 수식 (1)은 주파수 도약 첫 2홉 도달 시간 동안 교란이 가능한 조건과 교란 가능 시간을 나타낸다(그림 3 참조).

$$T_{SJ} + T_{JE} + T_P < T_{SE} + T_H \quad (1)$$

$$T_{LH} = T_H - (T_P + T_{JE}) \quad (2)$$

여기서  $T_{SE}$  위성-지구국,  $T_{SJ}$  위성-교란장치,  $T_{JE}$  교란장치-지구국의 전파 지연 시간,  $T_P$  교란장치의 시스템 연산 시간(위성 신호탐지 시간+ 교란 신호 생성 시간),  $T_{LH}$  재밍가능시간,  $T_H$  주파수 1hop 시간(예 : 100 hop 시 0.01s)이다.

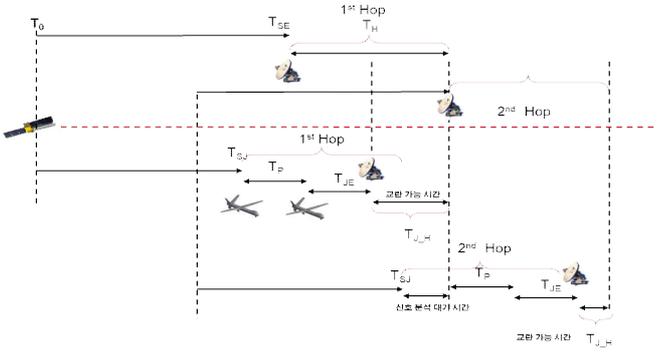


그림 3. 전파 지연 시간 및  $T_P$ 에 따른 교란 가능 시간

그림 4는 위성-지구국 거리가 1800km에 위치 했을 때, 교란 장치에 의해 follow 재밍이 가능한 영역을 나타낸다. 교란 위험 지역은 교란장치의 생존성 확보를 위해 회피하여야 하는 영역이다. 그림 5는  $T_P$ 를 160us로 고정하고 재밍 효율 80% ( $T_{LH}/T_H$ )를 갖는 교란 장치의 위치의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 여기서  $T_P$ 는 위성 신호를 수신하여 ADC 후 신호탐지에 걸리는 시간(약 100us : 주파수 대역폭, 샘플링 속도, FFT 고려)과 교란 송신 신호 생성 및 출력(약 60us)로 계산된 것이다. 교란장치가 적성국 지구국 근방에 있으면 생존 가능성이 낮아지므로, 교란 위험 지역을 지구국 근방 300km로 설정하였고, 이 경우 200 홉 이상의 도약 신호 교란은 교란 장치가 교란위험 지역에 위치하여야 하므로 불가하다.

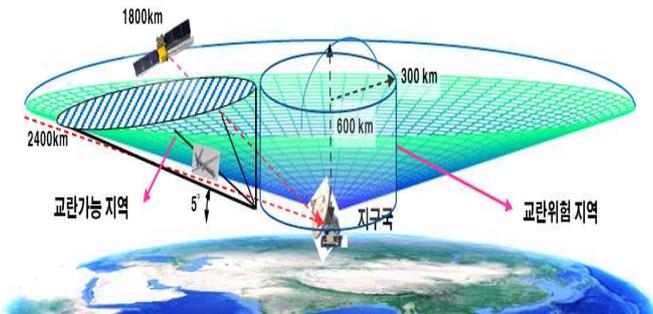


그림 4. 위성-지구국 1800km 이격거리에서 교란가능 지역

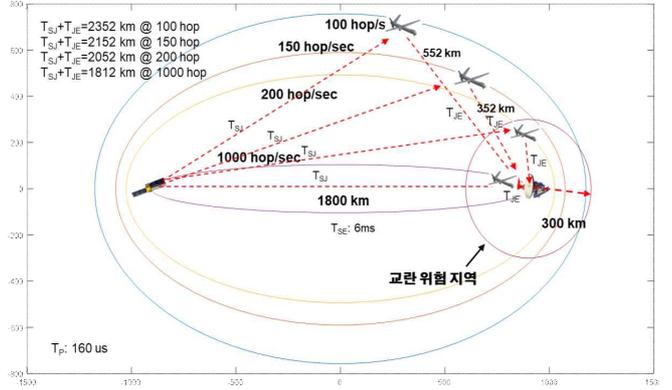


그림 5. 위성-지구국 1800km 거리에서 재밍가능 주파수 도약 홉수

#### IV. 결론

본 논문에서는 항재밍을 위해서 저궤도 위성에서 주파수 도약 기법 사용 가능성을 살펴보고, 그 결과 SFH 방식이 사용 가능성이 높으며  $T_P$  160us, 교란위험지역을 300km로 가정했을 때 follow 재밍 가능 도약수는 약 150홉 이하임을 확인하였다.

#### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2024년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임(912916201).

#### 참고 문헌

- [1] Recommendation ITU-R SF.358-5, "Maximum permissible values of power flux-density at the surface of the earth produced by satellites in the fixed-satellite service using the same frequency bands above 1 GHz as line-of-sight radio-relay systems" 5th Ed.
- [2] Choo, M., Hwang, I., Bae, M., Seo, I., and Ryu, Y., "Interference analysis between LEO Satellites for X-Band Downlink" JKAS Journal, Vol. 49, No. 6, 2021, pp. 489~496.
- [3] Kim, J., Park S., Lee, D., Joo, J., and Shin, W., "Analysis of downlink jamming of LEO satellite with high-capacity data," Proceeding of the 2022 KIEES Summer Conference, 2022, p. 490.
- [4] Kim, J., Rim, J., Park, Y., Lee, D., Joo, J., and Kim, S., "Design of Jamming Simulator for LEO Satellite Datalink," KSAS 2022 Fall Conference, 2022, pp. 1763-1764.
- [5] Kim, J., Park, Y., Lee, D., Joo, J., and Kim, S., "Design of High Capacity Datalink Simulator for LEO Satellite Datalink," KICS 2023 Winter Conference, 2023, pp. 1241-1242.
- [6] Kim, J., Park, Y., Lee, D., Joo, J., Kim, S. and Kim, J, "Implement of High Capacity Datalink Simulator for LEO Satellite Datalink," KIEES 2023 Winter Conference, 2023, p. 300.
- [7] Kim, J., Park, Y., Lee, D., et al., "Implement of jamming simulator for down datalink in LEO Satellite," KICS 2023 Autumn Conference, 2023, pp. 710~711.
- [8] [https://www.tesat.de/images/tesat/products/IDT\\_Data-Sheet.pdf](https://www.tesat.de/images/tesat/products/IDT_Data-Sheet.pdf)
- [9] <https://www.safrandatasystems.com/applications/science-space-agencies/cortex-hdr-high-rate-modems>
- [10] Don J. Torrieti, *Principles of Secure Communication System*, Artech House, September 1985.