

위성 간 무선 광통신 시스템의 포인팅 오차를 고려한 물리 계층 보안 성능 분석

김영탁, 고영채
고려대학교

<qkrqhdud15, koyc>@korea.ac.kr

Secrecy Performance of Inter-Satellite Free Space Optical Link with Non-Zero Boresight Pointing Errors

Young-Tak Kim, Young-Chai Ko
Korea University

요약

본 논문은 비영점 보어사이트 및 지터 포인팅 오차를 고려한 위성 간 무선 광통신 채널모델을 정의하고, 이를 통해 물리 계층 보안 성능을 분석한다. 포인팅 오차 수준과 도청자 이격거리에 따른 보안 아웃티지 확률(SOP) 및 평균 보안용량(ASC)을 시뮬레이션을 통해 분석하여, 위성 간 통신환경에서 안정적인 보안통신을 위한 핵심 파라미터의 영향을 규명한다.

I. 서론

최근 차세대 우주 네트워크를 위한 기술로 위성 간 무선 광통신연구가 활발히 진행 중이다. 무선 광통신은 RF 통신보다 높은 전송속도, 넓은 대역폭과 함께 높은 지향성과 좁은 빔크기로 높은 보안성을 제공하지만, 여전히 도청의 위협은 존재한다. 이에 최근 암호화 기반 보안 외에 물리 계층 보안이 주목받고 있다[1].

위성 간 무선 광통신은 송수신 간 정밀한 빔 정렬이 필수적이나, 위성의 자세 변동이나 궤도 변화 등으로 인한 포인팅 오차(Pointing Error, PE)는 빔 이탈을 야기하여 정보 유출 및 보안 성능 저하를 초래할 수 있다.

본 논문에서는 비영점 보어사이트 오차와 지터를 포함한 현실적 PE 모델을 이용하여 위성 간 무선 광통신 채널을 분석하고, PE 와 도청자 위치 변화가 시스템의 보안 아웃티지 확률(SOP)과 평균 보안용량(ASC)에 미치는 영향을 평가한다.

II. 본론

1. 시스템 모델

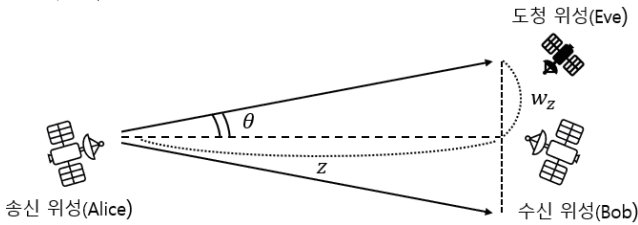


그림 1. 도청자가 존재하는 위성 간 무선 광통신 시스템

그림 1 은 송신 위성(Alice), 수신 위성(Bob), 그리고 도청 위성 Eve 로 구성된 위성 간 무선 광통신 시스템을 나타낸다. Alice 와 Bob 간의 링크 거리는 z 이고, 빔 발산각은 θ , 빔 반경은 w_z 이다. Eve 의 기본적인 수신기 특성과 링크 거리 z 는 Bob 과 동일하다고 가정하였다.

Alice 가 Bob 에게 정규화된 광신호 $x(E[|x|^2] = 1)$ 를 보낼 때, Bob 이 수신하는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y = \eta_0 \cdot h \cdot x + n_0, \quad (1)$$

이때, η_0 은 수신기의 광응답도, h 는 채널 계수, n_0 은 분산이 N_0 인 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이다.

2. 채널 모델

위성 광통신의 채널계수 h 는 다음과 같이 표현한다.

$$h = h_l h_a h_p. \quad (2)$$

위성 간 통신환경에서 경로 손실 계수 h_l 은 SNR 계산 시 다른 상수들과 통합되고 대기 난류 감쇠 계수 h_a 는 영향이 미미하여, $h_a \approx 1$ 로 가정한다[2,3]. 따라서 채널 변동성은 주로 포인팅 오차 계수 h_p 에 기인한다.

본 논문은 비영점 보어사이트 오차(μ_x, μ_y)와 지터(σ_x, σ_y)를 모두 고려하는 일반화된 PE 모델을 사용하며[4], 이로 인한 h_p 의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(h_p) = \frac{\psi_{mod}^2}{(A_{mod})^2 \psi_{mod}^2} h_p^{\psi_{mod}^2 - 1}, \quad 0 \leq h_p \leq A_{mod}. \quad (3)$$

여기서 A_{mod} 와 ψ_{mod} 는 앞서 언급한 포인팅 오차 통계량, 빔 및 수신기의 기하학적 특성으로부터 계산되는 핵심 파라미터이다[4].

3. 보안 성능 분석

수신 측의 순간 SNR(signal-to-noise ratio)은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \frac{(\eta_0 h)^2}{N_0} = \left(\frac{\eta_0^2}{N_0} \right) h_p^2. \quad (4)$$

식(3)와 식(4)의 관계를 이용해 주어진 채널에서 순간 SNR 의 확률밀도함수(PDF)와 누적분포함수(CDF)는 다음과 같이 유도된다.

$$f(\gamma) = \frac{\psi_{mod}^2}{2(A_{mod})^2 \psi_{mod}^2} \left(\frac{\sqrt{N_0}}{\eta_0} \right)^{\psi_{mod}^2} \gamma^{\frac{\psi_{mod}^2}{2} - 1}, \quad 0 \leq \gamma \leq \gamma_{max} = \frac{\eta_0^2}{N_0} A_{mod}^2, \quad (5)$$

$$F(\gamma) = \left(\frac{\sqrt{N_0}}{\eta_0 A_{mod}} \right)^{\psi_{mod}^2} \gamma^{\frac{\psi_{mod}^2}{2}}. \quad (6)$$

이를 바탕으로 SOP 와 ASC 는 각각 다음과 같이 계산된다.

SOP

$$\begin{aligned}
 &= \Pr(C_s(\gamma_B, \gamma_E) < R_{th}) \\
 &= \Pr\left\{\log_2\left(1 + \frac{e}{2\pi}\gamma_B\right) - \log_2\left(1 + \frac{e}{2\pi}\gamma_E\right)\right\} < R_{th}\right\} \\
 &= \int_{y=0}^{\infty} \Pr\left(\gamma_B < \frac{2\pi}{e}\left\{2^{R_{th}}\left(1 + \frac{e}{2\pi}y\right) - 1\right\} \middle| \gamma_E = y\right) f_E(y) dy \\
 &= \int_{y=0}^{\infty} F_B\left(\frac{2\pi}{e}\left\{2^{R_{th}}\left(1 + \frac{e}{2\pi}y\right) - 1\right\}\right) f_E(y) dy, \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ASC &= E\left[\max\left\{\log_2\left(1 + \frac{e}{2\pi}\gamma_B\right) - \log_2\left(1 + \frac{e}{2\pi}\gamma_E\right), 0\right\}\right] \\
 &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} C_s(\gamma_B, \gamma_E) f(\gamma_B, \gamma_E) d\gamma_B d\gamma_E, \quad (8)
 \end{aligned}$$

여기서 $C_s(\gamma_B, \gamma_E)$ 는 순간 보안용량을 의미하고, 보안 아웃티지 확률(SOP)와 평균 보안용량(ASC)는 각각 보안 통신이 목표 전송률 R_{th} 미만으로 실패할 확률을, 평균적으로 달성 가능한 안전한 정보 전송률의 크기를 나타낸다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션에서 Bob 의 PE 는 등방성이며, 정규화된 오차크기 $k_B = \frac{\mu_B}{w_{zeq}} = \frac{\sigma_B}{w_{zeq}}$ 을 가진다고 가정한다. Eve 는 수신면에서 Bob 기준 x 축 방향으로 정규화된 상대적 이격 거리 d_E 를 가지며 나머지 오차는 Bob 과 동일하게 설정하였다. 이로 인해, Eve 는 일반적으로 비등방성 보어사이트 오차를 경험하게 된다.

그림 2 는 k_B 값의 변화에 따른 SOP 를 Eve 의 정규화된 이격거리 d_E 의 함수로 나타낸다. 모든 경우에 Eve 가 멀어질수록, 그리고 동일한 d_E 에서 Bob 의 k_B 가 작을수록 SOP 는 낮아져 보안성이 향상된다.

예를 들어, $k_B = 1$ 일 때, SOP 값 10% 달성을 위한 Eve 의 최소 이격거리는 약 0.28(등가 빔반경의 0.28 배)이지만, $k_B = 3$ 일 때는 0.5 이상(등가 빔반경의 절반 이상)이 요구되어 보안 안정성을 위한 포인팅의 정확도의 중요성을 보여준다.

주요 시뮬레이션 파라미터는 표 1 과 같다.

표 1. 위성 간 무선 광통신 파라미터

파라미터	기호	값
수신기 조리개 반경	a	0.05 [m]
빔 발산각	θ	7.5×10^{-6} [rad]
위성 간 거리	z	500 [km]
수신기 광응답도	η_0	0.8 [A/W]
잡음 전력 스펙트럼 밀도	N_0	1×10^{-22} [A ² /Hz]

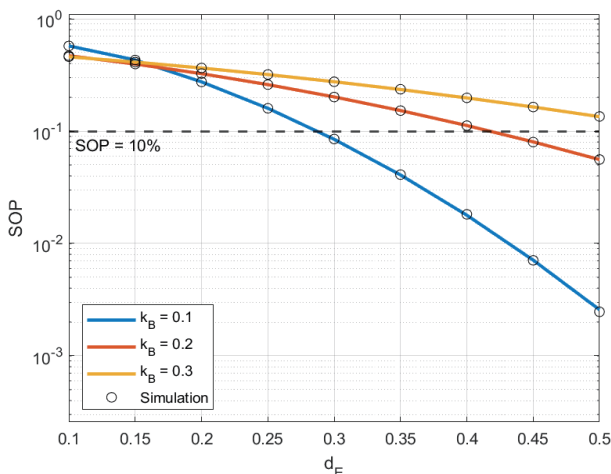


그림 2. 도청자의 이격거리에 따른 SOP

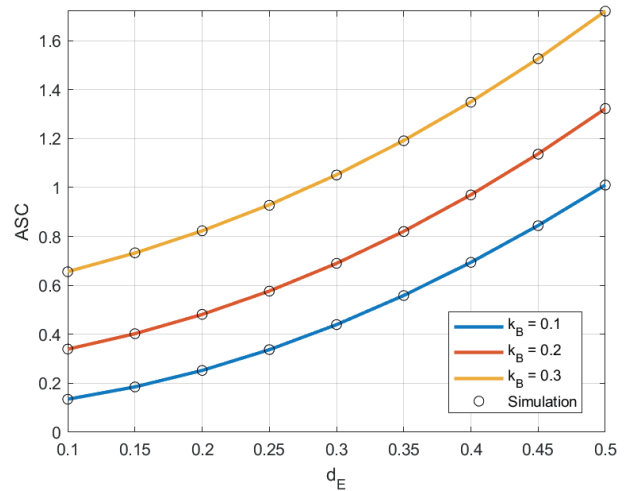


그림 3. 도청자의 이격거리에 따른 ASC

그림 3 에서는 k_B 값에 대해 d_E 가 증가함에 따라 ASC 가 증가해 보안 성능이 향상된다. 여기서 흥미로운 점은, 동일한 d_E 값에서 Bob 의 k_B 가 클수록 ASC 가 더 높게 나타난다는 것이다. 이는 k_B 가 증가하면 Bob 의 채널보다 Eve 의 채널이 더욱 악화되어 결과적으로 둘의 채널용량 차이의 평균값이 커지기 때문으로 해석된다. 즉, 포인팅 정확도가 낮으면 보안의 안정성(SOP)는 저하될 수 있지만, 일단 안전한 통신이 이뤄질 경우 평균적으로 더 많은 비밀 정보를 전송할 수 있는 트레이드-오프가 존재함을 시사한다.

시뮬레이션 결과, 해석적 분석 값(실선)과 몬테카를로 시뮬레이션 값(원형 마커)이 잘 일치해 분석 모델의 타당성을 검증하였다.

III. 결론

본 논문은 비영점 보어사이트 및 지터 포인팅 오차를 고려한 위성 간 무선 광통신 채널 모델을 통해 물리 계층 보안 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, Eve 의 이격거리가 증가하면 SOP 감소 및 ASC 증가로 보안 성능이 향상됨을 확인하였다. 특히, Bob 의 포인팅 정확도는 SOP 와 ASC 간 상충 관계를 보였으며, 이는 목표 보안 수준에 따라 위성 간 통신시스템의 포인팅 정확도와 Eve 격리 전략을 설정해야 함을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021-0-00260,저궤도 군집 소형 위성 간 통신 기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] G. Wang, et al. "Free Space Optical Communication for Inter-Satellite Link: Architecture, Potentials and Trends," IEEE Commun. Mag., vol. 62, n. 3, pp. 110-116, Mar. 2024
- [2] J.-Y. Lee, et al. "Performance analysis of multi-hop low earth orbit satellite network over mixed RF/FSO links," ICT Express, vol. 10, pp. 1051-1058, 2024
- [3] H. Kaushal, et al. "Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 19, pp. 57-96, August. 2016
- [4] R. Boluda-Ruiz, et al. "Novel approximation of misalignment fading modeled by Beckmann distribution on free-space optical links," Opt. Express, vol. 24, no. 20, pp. 22635-22649, Oct. 2016