

위성 간 무선 광통신 링크의 물리 계층 보안 강화를 위한 의도적 비정렬 성능 분석

김영탁, 고영채
고려대학교

<qkrqhdud15, koyc>@korea.ac.kr

Performance Analysis of Intentional Misalignment for Enhancing Security in Inter-Satellite Free Space Optical Link

Young-Tak Kim, Young-Chai Ko
Korea University

요 약

본 논문은 근거리 도청 위협이 존재하는 위성 간 무선 광통신 링크의 보안성 향상을 위해 ‘의도적 비정렬’ 방식을 제안한다. 제안 기법은 비영점 보어사이트 오차 및 지터를 고려한 포인팅 오차 모델을 기반으로 모델링되고, 완벽하게 정렬된 시스템과 비교하여 보안 아웃티지 확률(SOP) 성능을 정량적으로 평가한다.

I. 서 론

위성 간 무선 광통신은 높은 데이터 속도와 보안성을 바탕으로 차세대 위성 네트워크의 핵심 기술로 주목받고 있다. 하지만 레이저 빔의 폭이 매우 좁기 때문에, 작은 포인팅 오차(Pointing error)만으로도 통신 품질과 보안 성능이 크게 감소할 수 있다[1].

일반적으로 마이크로 라디안(μrad) 수준의 정밀한 조준 제어로 이 문제를 해결하지만, 이러한 완벽한 정렬은 근거리 도청 위협이 위치할 경우, 합법 채널뿐 아니라 도청 채널의 이득까지 함께 높여 오히려 시스템을 보안 위협에 더 취약하게 만들 수 있다.

이에 본 논문은 근거리 도청 위협에 대응하는 간단한 해결책으로 ‘의도적 비정렬’ 방식을 제안한다. 이는 빔의 조준점을 의도적으로 도청 위성과 먼 방향으로 이동시켜, 합법 채널의 품질 저하는 최소화하면서 도청 채널을 비대칭적으로 열화시키는 방식을 말한다. 본 분석에서는 ‘의도적 비정렬’ 방식이 완전 정렬 시스템 대비 보안 성능을 얼마나 향상시키는지 보안 아웃티지 확률(SOP)을 통해 정량적으로 평가한다.

II. 본론

1. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템 모델은 그림 1 과 같다. 합법적 수신 위성(Bob)은 수신 평면의 원점에 위치하며, 근거리 도청 위성(Eve)은 원점으로부터 거리 d 와 각도 θ_E 를 갖는 지점 $(d \cos \theta_E, d \sin \theta_E)$ 에 위치한다고 가정한다. 의도적 비정렬 방식은 송신 위성(Alice)이 빔의 조준점을 원점에서 의도적으로 오프셋 시키는 것을 의미하며, 이 빔 오프셋은 크기 r 과 각도 ψ 를 갖는 벡터 $\mathbf{r} = (r \cos \psi, r \sin \psi)$ 로 표현된다.

2. 신호 및 채널 모델

무선 광통신에서 온-오프 변조(OOK)를 사용한 강도변조/직접검출(IM/DD) 방식을 적용한 시스템을 가정할 때, Bob 이 받는 신호 y 는 다음과 같이 표현된다.

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

이때, η 는 수신기의 광응답도, x 는 송신 광 강도, h 는 채널계수, n_0 은 평균 0 에 분산이 N_0B 인 가산 백색 가우시안 잡음(AWGN)이다.

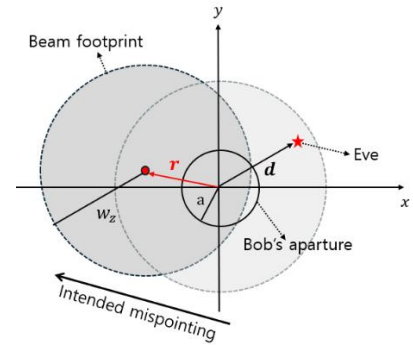


그림 1. 의도적 빔 오프셋을 적용한 시스템 모델

본 논문에서는 기존의 포인팅 오차 모델을 적용하여, 의도된 빔 오프셋을 비영점 보어사이트 오차(Boresight error)로, 위성의 미세한 기계적 진동 등으로 인한 빔의 무작위적 흔들림은 지터(Jitter)로 모델링한다. 이때, 위성 간 통신 환경을 고려하여 경로 및 대기 난류에 의한 손실을 무시할 수 있다고 가정하면[1], 총 채널 이득 h 는 포인팅 오차와 기하학적 손실로 인한 이득 h_p 와 같다($h \approx h_p$). 이때, h_p 는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$h_p(r; z) \approx A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w_{eq}^2}\right), \quad (2)$$

여기서 $A_0 = \text{erf}(v)^2$, $v = \frac{\sqrt{\pi}a}{\sqrt{2}w_z}$, $w_z = \theta z$ (a : 수신기 조리개 반경, θ : 빔 발산각), $w_{eq}^2 = \frac{\sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)} \cdot w_z^2$ 이다. 비영점 보어사이트 오차($\|\mathbf{r}\| > 0$)와 지터를 함께 고려한 h_p 의 확률밀도함수(PDF)의 근사식은 다음과 같다[2].

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

여기서 A_{mod} 와 ϕ_{mod} 는 포인팅 오차의 통계 및 수신기의 기하학적 특성으로부터 계산되는 파라미터이다.

이를 바탕으로 Bob 의 수신 SNR 을 계산하면 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \frac{(\eta h x)^2}{N_0 B} = \left(\frac{\eta^2 P_t}{N_0 B}\right) h_p^2 = \bar{\gamma} \cdot h_p^2. \quad (4)$$

이때, P_t 는 송신 광 전력이다.

식 (3)과 식 (4)를 통해 주어진 채널에서 수신 SNR 의 확률밀도함수(PDF)와 누적분포함수(CDF)를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$f_Y(\gamma) = \frac{\phi_{mod}^2}{2(A_{mod})^2 \phi_{mod}^2} \left(\frac{1}{\sqrt{\gamma}} \right)^{\phi_{mod}^2} \gamma^{\frac{\phi_{mod}^2}{2}-1}, \quad F_Y(\gamma) = \left(\frac{\gamma}{A_{mod}^2 \bar{\gamma}} \right)^{\frac{\phi_{mod}^2}{2}}, \quad (5)$$

4. 보안 성능 분석

식 (5)를 바탕으로 보안 아웃티지 확률(SOP)은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} SOP &= \Pr \left(C_s \left(\frac{e}{2\pi} \gamma_B, \frac{e}{2\pi} \gamma_E \right) < R_s \right) \\ &= \frac{\alpha^{\nu_B} X^{\nu_E}}{\Gamma_B^{\nu_B} \Gamma_E^{\nu_E}} {}_2F_1 \left(-\nu_B, \nu_E; 1 + \nu_E; -\frac{\beta}{\alpha} X \right) + \mathbf{1}_{\{X < \Gamma_E\}} \left(1 - \left(\frac{X}{\Gamma_E} \right)^{\nu_E} \right), \quad (6) \end{aligned}$$

여기서 $\alpha = \frac{2\pi(z^{R_s-1})}{e}$, $\beta = 2R_s$, $\Gamma_l = \bar{\gamma} A_{mod,l}^2$, $\nu_l = \frac{\phi_{mod,l}}{2}$ ($l \in \{B, E\}$), $X = \min\{\Gamma_E, \max(0, y^*)\}$, $y^* = \frac{\Gamma_B - \alpha}{\beta}$ 이고, $\mathbf{1}(\cdot)$ 는 지시함수를 의미한다.

5. 시뮬레이션

시뮬레이션을 위해 Alice 와 Bob 사이 링크거리(z)와 Alice 와 Eve 사이의 거리와 같고, Bob 과 Eve의 수신기 특성이 같다고 가정한다. Eve는 x 축 상에 위치하며($\theta_E = 0$), 지터는 등방성(isotropic)을 갖는다고 가정한다. 도청 위성이 빔 반경(w_z) 내에 위치하는 경우를 근거리 시나리오로 정의하며, 몬테카를로 시뮬레이션은 10^6 회 시행한다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

파라미터	기호	값
수신기 조리개 반경	a	0.1 [m]
빔 발산각	θ	7.5×10^{-6} [rad]
위성 간 거리	z	1000 [km]
수신기 광응답도	η	1 [A/W]
잡음 전력 스펙트럼 밀도	N_0	3×10^{-21} [W/Hz]
링크 대역폭	B	1.2×10^{10} [Hz]
빔 반경	w_z	7.5 [m]

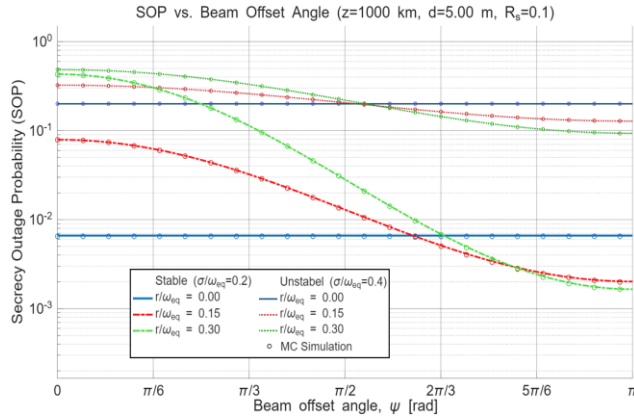


그림 2. 빔 오프셋 각도에 따른 SOP

그림 2는 Eve가 고정된 근거리($d = 5\text{m}$)에서의 빔 오프셋 각도 ψ 에 따른 SOP 변화를 나타낸다. 빔의 흔들림이 작은 경우($\sigma/w_{eq} = 0.2$), 완벽 정렬($r = 0$)시, ψ 와 상관없이 SOP가 약 6.6×10^{-3} 로 일정하다. 반면, 빔을 의도적으로 틀어($r > 0$) 도청 위성 반대 방향($\psi = \pi$)으로 향할수록, SOP는 급격히 감소한다. 특히, $r/w_{eq} = 0.3$ 일 때, $\psi = \pi$ 에서 SOP는 약 1.6×10^{-3} 까지 낮아져, 완벽 정렬 대비 SOP를 약 4배 감소시키는 효과를 보인다.

그러나 빔의 흔들림이 증가하면($\sigma/w_{eq} = 0.4$), 완벽히 정렬된 상태의 SOP가 약 2×10^{-1} 로, 상대적으로 흔들림이 적은 경우 대비 약 30배 가까이 나쁜 성능을 보인다. 이처럼 불안정한 상태에서는 의도적으로 빔 오프셋을 주

어도, ψ 에 따른 SOP의 개선 효과가 미미한 것을 볼 수 있다. 따라서 의도적 비정렬 방식은 지터의 크기가 작은 안정적인 시스템에서 적용 시 근거리 도청위협에 대한 효과가 뚜렷하며, 최적의 방향은 $\psi = \pi$ 임을 알 수 있다.

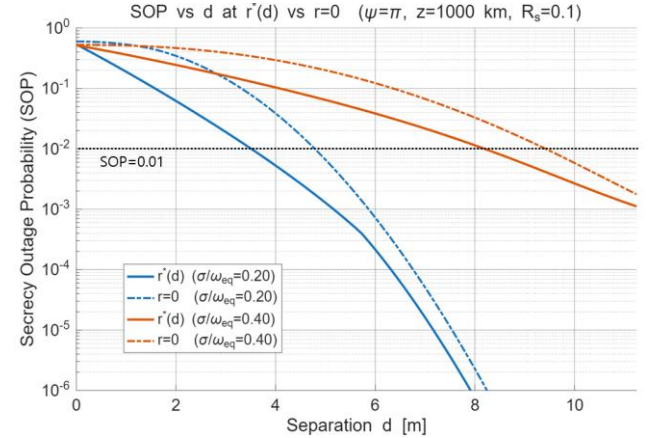


그림 3. 의도적 비정렬 vs. 완전 정렬 보안 성능 비교

그림 3은 빔을 Eve 반대 방향($\psi = \pi$)으로 고정된 상황에서 의도적 비정렬 방식과 완벽 정렬 상태의 보안 성능을 보여준다. 각 지터(σ) 수준에 대해, 점선은 완벽 정렬 시의 SOP를, 실선은 각 이격거리 d 에서 SOP를 최소화하는 최적의 비정렬(r^*)을 적용했을 때의 SOP를 나타낸다.

분석 결과, 시스템의 포인팅 지터의 크기가 작은 경우($\sigma/w_{eq} = 0.2$), 특히 도청 위성이 근거리에 위치할 때, 의도적 비정렬 방식이 완벽 정렬 대비 SOP를 5배에서 최대 약 10배 정도까지 크게 감소시켰다. 반면, 상대적으로 흔들림이 큰 경우($\sigma/w_{eq} = 0.4$)에서는 의도적 비정렬의 효과가 여전히 존재하지만, 그 개선 폭이 감소하였다. 또한, 제안 방식을 적용하더라도 근거리에선 SOP 자체가 10^{-2} 이하로 내려가지 않는다. 이를 통해 시스템의 포인팅 안정성이 우선 확보되지 않으면 높은 수준의 보안 달성이 어려움을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문은 근거리 도청 위협에 대응하기 위해 '의도적 비정렬' 방식을 제안하고 그 효용성을 분석하였다. 분석 결과, 이 방식은 지터가 작은 안정적 시스템에서 빔을 도청 위성 정반대 방향으로 향하게 할 때 완벽 정렬 대비 보안 성능(SOP)을 유의미하게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 다만 본 분석은 특정 시스템 환경을 가정한 결과로, 향후 다양한 환경을 고려한 일반화된 성능 분석이 요구된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-[2023-00242396](tel:202300242396))

참고 문헌

- [1] H. Kaushal, et al. "Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 19, no.1, pp. 57-96, 1st Quarter 2017.
- [2] 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