

송·수신 포인팅 오류 상관관계가 위성 간 무선 광통신 링크 버짓에 미치는 영향 분석

서정민, 고영채

고려대학교

<jmsuh904, koyc>@korea.ac.kr

Analysis of the Impact of Transmitter-Receiver Pointing-Error Correlation on Link Budget in Free-Space Optical Inter-Satellite Links

Suh Jung Min, Young-Chai Ko

Korea University

요약

본 논문은 위성 간 무선 광통신 시스템에서 송신단과 수신단의 포인팅 오류 간 상관관계가 링크 버짓에 미치는 영향을 분석한다. 기존 연구들은 송·수신단 포인팅 오류를 독립적으로 모델링하는 경우가 많았지만, 실제 위성 플랫폼에서는 두 오류 간의 연관성이 존재할 수 있다. 본 논문에서는 송·수신단 포인팅 오류를 상관계수 ρ 를 갖는 이변량 가우시안 모델로 구현하고, ρ 에 따른 필요 송신 전력을 계산한다. 이를 통해 무선 광통신 시스템 설계 시 송·수신단 포인팅 오류 간 상관관계가 필요 송신 전력에 미치는 영향을 정량적으로 분석한다.

I. 서론

위성 간 무선 광통신(Free-Space Optical Inter-Satellite Link, FSO ISL)은 RF(Radio Frequency) 통신의 한계를 극복할 수 있는 초고속·보안 통신 솔루션으로 주목받고 있다.[1] 하지만 FSO ISL에서는 좁은 빔 폭과 정밀한 빔 정렬 요구 조건으로 인해 포인팅 오류가 주요 성능 저하 요인으로 작용한다. 기존 많은 연구들은 송신단과 수신단의 포인팅 오류를 서로 독립적인 확률변수로 간주하고 링크 성능을 분석해왔다.[2]

그러나 실제 FSO ISL 시스템에서 두 위성이 동일한 궤도 정보에 기반하여 상대 위치 예측값을 공유하거나, 수신단의 링크 품질 정보를 바탕으로 송신단이 지향을 조정할 수 있기 때문에 송·수신단 포인팅 오류가 통계적으로 연동될 가능성이 존재한다. 이는 통계적으로 상관관계가 있는 이변량 가우시안 분포(bivariate Gaussian distribution) 모델로 구현될 수 있다.

본 논문에서는 송·수신단 포인팅 오류를 각각 가우시안 모델링한 후, 전체 포인팅 오류를 상관관계를 갖는 이변량 가우시안 모델로 정의한다. 그 후, 이 모델이 링크 버짓(Link Budget)에 미치는 영향을 분석한다.

II. 본론

1. 링크버짓 계산

위성 간 무선 광통신에서 수신 전력 P_R 과 송신 전력 P_T 는 다음과 같은 관계에 있다.[3]

$$P_R = P_T \eta_T \eta_R G_T G_R L_T L_R L_{PS} \quad (1)$$

여기서 η_T, η_R 는 각각 송·수신단 광전 변환 효율, $G_T = 16/(\theta_T)^2$ 는 송신단 이득, $G_R = (D_R \pi / \lambda)^2$ 는 수신단 이득으로, θ_T 는 송신단 빔 다이버전스를, D_R 과 λ 는 각각 수신단 지름과 빔의 파장을 나타낸다. L_T, L_R 는 각각 송·수신단 포인팅 손실을 나타내며, 송·수신단 이득과 송·수

신단 포인팅 오류 θ_T, θ_R 를 이용하여 각각 아래와 같이 표현된다.

$$L_T = \exp(-G_T(\theta_T)^2) \quad (2)$$

$$L_R = \exp(-G_R(\theta_R)^2) \quad (3)$$

마지막으로 자유 공간 손실 $L_{PS} = (\lambda/4\pi d)^2$ 는 λ 와 위성 간 거리 d 를 이용하여 구할 수 있다.

2. 송·수신단 포인팅 오류 가우시안 모델링

송·수신단 포인팅 오류 θ_T, θ_R 를 평균이 μ , 분산이 σ^2 인 가우시안 랜덤 변수로 설정하고 각 변수의 확률밀도함수를 구하면 아래와 같다.

$$\theta \sim N(\mu, \sigma^2), \theta \in \{\theta_T, \theta_R\} \quad (4)$$

$$f_\theta(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\theta-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \theta \in \{\theta_T, \theta_R\} \quad (5)$$

3. 이변량 가우시안 포인팅 오류 모델링

송·수신단 포인팅 오류 θ_T, θ_R 이 상관계수 ρ 를 가질때, 포인팅 오류 벡터 θ 는 다음과 같은 이변량 가우시안 분포를 따른다.

$$\theta \sim N(\mu, \Sigma) \quad (6)$$

포인팅 오류 벡터 θ , 평균 벡터 μ , 공분산 행렬 Σ 는 각각 다음과 같다.

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_T \\ \theta_R \end{bmatrix}, \mu = \begin{bmatrix} \mu \\ \mu \end{bmatrix}, \Sigma = \sigma^2 \begin{bmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이를 이용하여 포인팅 오류 벡터 θ 의 이변량 가우시안 확률밀도함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f(\theta) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\det(\Sigma)}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\theta-\mu)^T \Sigma^{-1}(\theta-\mu)\right) \quad (8)$$

4. 포인팅 손실 기댓값 계산

송·수신단 포인팅 손실 L_T , L_R 을 곱한 전체 포인팅 손실 L 을 구하면 다음과 같다.

$$L = L_T \cdot L_R = \exp(-\theta^T \mathbf{A} \theta) \quad (9)$$

여기서 송·수신단 이득 행렬 \mathbf{A} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} G_T & 0 \\ 0 & G_R \end{bmatrix} \quad (10)$$

수식 (8)과 (9)를 이용하여 전체 포인팅 손실 L 의 기댓값을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[L] &= \iint_{R^2} L \cdot f(\theta) d\theta \\ &= \frac{1}{2\pi\sqrt{\det(\Sigma)}} \iint_{R^2} \exp\left(-\theta^T \mathbf{A} \theta - \frac{1}{2}(\theta - \mu)^T \Sigma^{-1}(\theta - \mu)\right) d\theta \\ &= \frac{\exp(\mu^T \mathbf{A} (\mathbf{I} + 2\Sigma \mathbf{A})^{-1} \mu)}{\sqrt{\det(\mathbf{I} + 2\Sigma \mathbf{A})}} \end{aligned} \quad (11)$$

5. 이변량 가우시안 포인팅 오류 상관계수에 따른 필요 송신 전력

이변량 가우시안 포인팅 오류 상관계수에 따른 필요 송신 전력 P_T 는 수식 (1), (9)와 (11)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_T = \frac{P_R}{\eta_T \eta_R G_T G_R E[L] L_{PS}} \quad (12)$$

본 논문의 시뮬레이션은 OOK(On-Off Keying) 기법을 사용하고, 수신 감도 P_{req} 는 -35.5 dBm을 설정하였다. 파라미터들은 표 1에 명시되어있다.

그림 1은 세 가지 위성 간 거리 (1000 km, 3000 km, 5000 km)에 대해 상관계수 ρ 가 증가할수록 필요 송신 전력이 점진적으로 감소함을 보여준다. 거리가 1000 km일 때 필요 송신 전력은 $\rho = 0$ 과 1에서 각각 17.53 dBm, 17.10 dBm, 3000 km일때는 각각 27.08 dBm, 26.64 dBm, 5000 km일때는 각각 31.51 dBm, 31.08 dBm이다.

그림 2는 각 거리별로 ρ 가 0일 때를 기준으로 ρ 의 증가함에 따른 필요 송신 전력의 변화량을 보여준다. 본 논문에서 정의한 필요 송신 전력 변화량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_T(\rho) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_T(\rho)}{P_T(0)} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{E[L(0)]}{E[L(\rho)]} \right) \quad (13)$$

필요 송신 전력 변화량은 수식 (13)에서 확인할 수 있듯 거리와 무관하게 일정하다. $\rho = 0$ 대비 $\rho = 1$ 일때 필요 송신 전력이 약 0.43 dB 감소하며 ρ 가 증가할수록 필요 송신 전력이 감소함을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 FSO ISL에서 송·수신단 포인팅 오류 간 통계적 상관성을 이변량 가우시안 모델을 통해 구현하였고, 포인팅 오류 간 상관관계가 필요 송신 전력에 미치는 영향을 분석하였다. 상관계수가 증가할수록 포인팅 손실의 기댓값이 증가하여 필요 송신 전력이 감소하는 경향을 보였으며, 최대 약 0.43 dB (9.43 %)의 전력 절감 효과가 확인되었다. 이는 송·수신단의 광축이 동일한 방향으로 동기화되어 흔들릴 경우, 상대적인 벗어남이 줄어들어 정렬 유지 확률이 높아지기 때문이다. 이러한 결과는 위성 간 무선 광통신 시스템 설계 시, 포인팅 오류의 절대적인 크기뿐 아니라 그 통계적 구조, 특히 송·수신단 포인팅 오류 간 상관관계를 고려하는 것이 중요하다는 통찰을 제공한다. 향후에는 포인팅 오류의 동적 특성이나 위성 자세 제어기의 피드백 지연 등을 반영한 시간 상관 모델로 확장하는 것도 유의미한 연구 방향이 될 수 있다.

표 1. 위성 간 무선 광통신 파라미터

파라미터	기호	단위	값
레이저 파장	λ	nm	1550
송신단 광전 변환 효율	η_T	-	0.8
수신단 광전 변환 효율	η_R	-	0.8
수신단 지름	D_R	mm	80
송신단 포인팅 오류	θ_T	rad	$\sim N(10^{-6}, 10^{-11})$
수신단 포인팅 오류	θ_R	rad	$\sim N(10^{-6}, 10^{-11})$
송신단 빔 다이버전스	θ_T	μrad	15
링크 마진	LM	dB	3
비트 오류율	BER	-	10^{-12}
데이터 전송 속도	R_{data}	Gbps	10

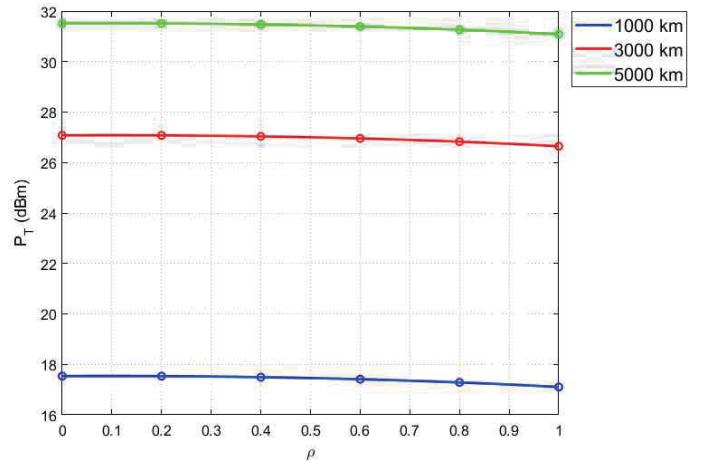


그림 1. 포인팅 오류의 상관계수에 따른 필요 송신 전력

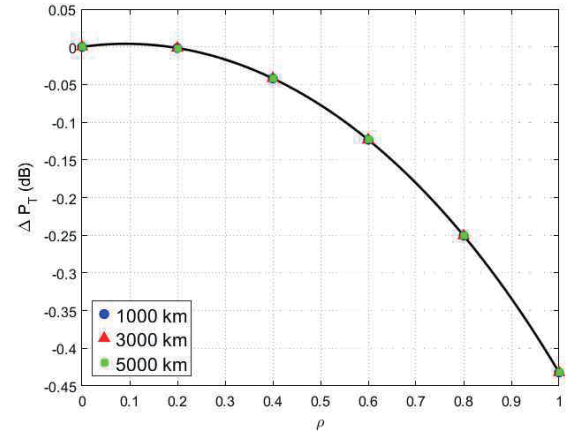


그림 2. 포인팅 오류의 상관계수에 따른 필요 송신 전력 변화량

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] 차홍철, 김종민, 임병주, 이주형, 고영채, “저궤도 군집 위성 간 통신 현황 및 주요 기술 동향”, JKICS, pp. 1508-1518, 2022, DOI : 10.7840/kics.2022.47.10.1508
- [2] Ahmed A. Farid, Steve Hranilovic, “Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links With Pointing Errors”, IEEE Journal of Lightwave Technology, pp. 1702-1710, 2007, DOI : 10.1109/JLT.2007.899174
- [3] J. Liang et al, “Link Budget Analysis for Free-Space Optical Satellite Networks”, 2022 IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2022, DOI : 10.1109/WoWMoM54355.2022.00073