

# 위성 간 무선광통신 시스템에서의 링크버짓 계산

오테인, 김종민, 고영채

고려대학교

<logan10, botboy0441, koyc>@korea.ac.kr

## Link Budget Analysis for Free Space Optical Communication between Satellites

Tae-In Oh, Jong-Min Kim, Young-Chai Ko  
Korea Univ.

### 요약

본 논문은 위성 간 무선광통신 시스템에서 링크버짓을 계산한다. 이를 통해 다양한 채널 변조 기법을 적용하였을 때 특정 비트 에러율을 달성하기 위해 필요한 송신 전력을 계산한다. 또한 특정 거리에서 수신단의 최대 출력이 정해져 있을 때 얻을 수 있는 최대 링크 마진이 얼마인지 계산한다. 무선광통신에 사용되는 위성의 에너지는 제한되어 있고 위성 간 거리와 링크 마진은 위성의 에너지에 중요한 영향을 준다. 본 논문은 다양한 변조 기법에 따라 특정 링크 마진을 만족하기 위해 필요한 위성의 에너지를 최적화하여 위성의 수명을 최대화할 수 있도록 한다.

### I. 서론

무선광통신(Free Space Optics, FSO)란 실외에서 사용되는 광무선통신 기술을 지칭하며, 자외선, 가시광선 및 적외선 영역 모두 활용할 수 있다.

SpaceX의 Starlink 같은 저궤도 위성 통신에서 위성 간 무선광통신(Free space optical satellites network, FSOSNs) 기술을 사용하려고 하고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 위성 간 무선광통신은 RF 통신에 비해 더 작은 안테나 사이즈, 적은 전력 사용, 보안성 등의 여러 장점이 존재한다<sup>[2]</sup>.

위성 간 무선광통신의 전송 전력량이 증가하게 되면 위성의 배터리에서 더 많은 에너지를 필요하게 된다. 위성의 에너지 수요량의 증가는 위성의 태양광 패널의 충전을 더 자주하게 하고 이는 위성 배터리의 수명을 단축시키고 이로 인해 위성 자체의 수명이 짧아지게 된다<sup>[3]</sup>. 그렇기 때문에 위성 간 무선광통신의 링크버짓을 계산하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 위성 간의 무선 광통신의 링크 버짓을 계산하였다. 그 후, 특정 링크 거리에서 서로 다른 채널 변조 기법에서 송신 전력이 어떻게 변화하는지 살펴보았다. 그리고 송신 전력이 제한되어 있을 때 각 변조 기법에 따라 최대 링크 마진이 얼마인지 계산했다. 이를 통해 위성 간 무선광통신에 필요한 송신 전력을 최적화할 수 있다.

### II. 본론

#### 1. 링크버짓 계산

위성 간 무선광통신의 경우에는 매질이 진공이기 때문에 지상에서의 무선광통신과 달리 대기 감쇠가 나타나지 않는다. 그렇기 때문에 위성 간 무선광통신의 수신 전력  $P_R$ 은 다음과 같이 주어진다<sup>[3]</sup>.

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

이때,  $P_T$ 는 송신 전력,  $\eta_T$ 와  $\eta_R$ 은 각각 송신단과 수신단의 광전자 변환 효율이다.  $G_T$ 와  $G_R$ 은 각각 송신단과 수신단의 안테나 이득이다.  $L_T$ 와  $L_R$ 은 각각 송신단과 수신단의 포인팅 손실이다.  $L_{PS}$ 는 자유공간 전파손실로, 위성 간 거리를  $Z$ 라 하고,  $\lambda$ 가 신호의 파장이라 할 때,  $L_{PS} = \left(\frac{\lambda}{4\pi Z}\right)^2$ 이다.

송신단과 수신단의 안테나 이득은 다음과 같이 주어진다.

$$G_T = \frac{16}{\theta_T^2} \quad (2)$$

$$G_R = \left(\frac{D_R \pi}{\lambda}\right)^2 \quad (3)$$

이때,  $\theta_T$ 는 송신단의 빔 다이버전스 각도이고  $D_R$ 은 수신단의 반지름이다.

송신단과 수신단의 포인팅 손실은 각각 송신단과 수신단의 포인팅 에러  $\theta_T$ 과  $\theta_R$ 에 주어지며 다음과 같이 정의된다.

$$L_T = \exp(-G_T(\theta_T)^2) \quad (4)$$

$$L_R = \exp(-G_R(\theta_R)^2) \quad (5)$$

#### 2. 채널 변조에 따른 전력 변화

본 논문에서는 온-오프 변조(NRZ-OOK), 펄스 위치 변조(L-PPM), 차동위상편이 변조(DPSK) 3 가지 채널 변조 기법을 활용하였다.

동일한 비트 오류율(Bit error rate, BER)을 달성하기 위한 L-PPM과 NRZ-OOK의 평균 수신 전력 비율은 다음과 같다<sup>[4]</sup>.

$$\frac{P_{PPM}}{P_{NRZ-OOK}} = \sqrt{\frac{2^{1-K_1}}{K_1}} \quad (6)$$

이때,  $K_1$ 은 L-PPM의 비트 수로  $K_1 = \log_2 L$ 이다.

마찬가지로 DPSK의 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$\frac{P_{DPSK}}{P_{NRZ-OOK}} = \frac{1}{2} \quad (7)$$

## 3. 위성 간 거리와 채널 변조에 따른 송신 전력 계산

NRZ-OOK 에서 비트 에러율을  $10^{-12}$  을 달성하기 위해 필요한 수신 전력  $P_{req} = -35.5$  dBm 이고 본 논문에서는 안정적인 통신을 위한 링크 마진(Link Margin, LM)을 3 dB로 가정하였다<sup>[3]</sup>.

표 1 위성 간 무선통신 파라미터

파라미터	기호	단위	값
신호 파장	$\lambda$	nm	1550
송신단 광전자 변환 효율	$\eta_T$	—	0.8
수신단 광전자 변환 효율	$\eta_R$	—	0.8
수신단 반지름	$D_R$	mm	80
송신단 포인팅 에러	$\theta_T$	$\mu$ rad	1
수신단 포인팅 에러	$\theta_R$	$\mu$ rad	1
송신단 빔 다이버전스	$\Theta_T$	$\mu$ rad	15
링크 마진	LM	dB	3
비트 에러율	BER	—	$10^{-12}$

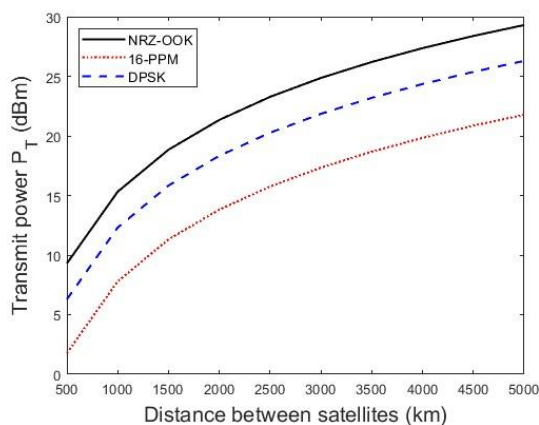


그림 1 위성 간 거리에 따른 송신 전력

표 1의 파라미터들을 바탕으로 위성 간 거리에 따른 필요한 송신 전력  $P_T$ 를 NRZ-OOK, 16-PPM, DPSK에 대해 계산하여 그래프를 그리면 그림 1과 같다. 그림 1의 그래프에서 볼 수 있듯이, 위성 간의 거리가 증가함에 따라 필요한 송신 전력이 증가함을 알 수 있다. 위성 간 거리가 2,500 km 라고 한다면 NRZ-OOK 일 때 필요한 송신 전력은 23.28 dBm 이고, 16-PPM 일 때 필요한 송신 전력은 15.75 dBm, DPSK 일 때 필요한 송신 전력은 20.27 dBm 이다.

식 6 번과 7 번에 따르면 16-PPM 은 NRZ-OOK 대비 약 7.5 dB, DPSK 는 NRZ-OOK 대비 약 3 dB 만큼 전력이 적게 필요한데 그림 1의 그래프에서도 이를 확인할 수 있다.

표 2 위성 간 거리가 2,500 km 일 때 링크 마진에 따른 수신 전력

링크 마진 (dB)	NRZ-OOK		16-PPM		DPSK	
	$P_T$ (dBm)	$P_T$ (W)	$P_T$ (dBm)	$P_T$ (W)	$P_T$ (dBm)	$P_T$ (W)
8	28.28	0.67	20.75	0.12	25.27	0.34
9	29.28	0.85	21.75	0.15	26.27	0.42
10	30.28	1.07	22.75	0.19	27.27	0.53
11	31.28	1.34	23.75	0.24	28.27	0.67
12	32.28	1.69	24.75	0.30	29.27	0.85
13	33.28	2.13	25.75	0.38	30.27	1.06
14	34.28	2.68	26.75	0.47	31.27	1.34
15	35.28	3.37	27.75	0.60	32.27	1.69
16	36.28	4.25	28.75	0.75	33.27	2.12
17	37.28	5.35	29.75	0.94	34.27	2.67
18	38.28	6.73	30.75	1.19	35.27	3.36

표 2에서는 위성 간 거리가 2,500 km 일 때 서로 다른 채널 변조 기법 상황에서 링크 마진에 따른 필요한 수신 전력을 계산했다. 만약 수신단의 출력이 1 W 이하로 제한된다면 각 채널 변조 방식에 따라 최대 얻을 수 있는 링크 마진은 NRZ-OOK 의 경우 9 dB, 16-PPM 의 경우 17 dB, DPSK 의 경우 12 dB 얻을 수 있으며 해당하는 지점을 빨간 색으로 표시했다.

그림 1에서는 각 채널 변조 기법 별로 특정 거리에서 링크 마진이 3 dB 일 때 수신 전력이 얼마나 필요한지 계산했으며 표 2에서는 각 변조 기법 별로 수신 전력의 최댓값이 정해져 있을 때 얻을 수 있는 최대 링크 마진을 계산했다. 이로 인해 위성 간 무선통신을 할 때 필요한 에너지를 예측할 수 있고 위성의 에너지 소모를 줄일 수 있다.

## III. 결론

본 논문에서는 위성 간 무선통신에서 링크 버짓을 유도하고 계산하였다. 이를 바탕으로 다양한 채널 변조 방식을 적용하였을 때 특정 위성 간 거리에서 3 dB의 링크 마진을 유지하면서 비트 에러율이  $10^{-9}$  이기 위해 필요한 송신 전력이 얼마인지 계산했다. 그리고 위성 간 거리가 2,500 km 이고 수신단의 출력이 1 W 이하로 제한된다면 얻을 수 있는 최대 링크 마진이 얼마인지 계산해 보았다. 이를 통해 위성 간 안정적인 무선통신에 필요한 수신 전력을 예측할 수 있고 위성의 에너지 최적화에 도움을 줄 수 있다.

본 논문에서 사용한 채널 변조 기법인 L-PPM의 경우 NRZ-OOK에 비해 전력 효율은 좋지만 주파수 효율은 떨어지는데, 이로 인한 트레이드 오프에 대해서도 추후 연구해 볼 수 있다.

## ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 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] A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, "Laser Intersatellite Links in a Starlink Constellation: A Classification and Analysis," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 48–56, 2021.
- [2] A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, "Free space optics for next-generation satellite networks," *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 6, pp.21–31, 2020
- [3] J. Liang, et al. "Link Budget Analysis for Free-Space Optical Satellite Networks." *In Proc. WoWMoM*, 2022.
- [4] Elganimi, Taissir Y., "Studying the BER performance, power-and bandwidth-efficiency for FSO communication systems under various modulation schemes", *in Proc. IEEE AECT*, 2013.