

위성 간 무선 광통신에서의 MIMO 및 WDM 채널 용량 분석

이민지, 고영채

<ddi06048, koyc>@korea.ac.kr

고려대학교

Analysis of MIMO and WDM Channel Capacity in Inter-Satellite FSO System

Min-Ji Lee, Young-Chai Ko
Korea Univ.

요약

본 논문은 위성 간 무선 광통신 시스템에 다중 렌즈를 활용하는 경우와 파장 분할 다중화를 적용하여 각각의 경우의 채널을 분석한다. 두 가지 방법은 모두 채널 간 간섭이 발생하며 이를 고려하여 다중 렌즈와 파장 분할 다중화의 채널 용량을 비교한다.

I. 서론

무선 광통신(Free Space Optics, FSO)은 자유 공간에서 파장이 750nm에서 1600nm인 빛을 이용하는 통신 방식이다. FSO는 기존의 RF 통신 대비 넓은 대역폭을 확보할 수 있고 설치 비용이 저렴하며 직진성이 강해 보안에 유리하다는 장점이 있다. 반면 기상 상황에 성능이 좌우된다는 것이 단점이다.[1] 위성 간 통신에서 FSO를 활용할 경우에는 날씨의 영향을 무시할 수 있어 위성 간 FSO 통신이 주목을 받고 있다.[2]

FSO에서 채널 용량을 향상하기 위해 다양한 방법이 시도되고 있다. 대표적으로 다중 렌즈(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO), 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing, WDM) 등이 있다. 본 논문에서는 위성 간 통신에 무선 광통신을 사용하는 경우 MIMO와 WDM의 채널 용량을 비교한다.

II. 본론

1) 시스템 모델

a. 위성 간 FSO 채널

본 논문에서는 먼저 위성 간 FSO 시스템에서 단일 채널을 사용하는 경우를 분석한 후 MIMO와 WDM의 경우 수신 파워 및 간섭 파워, 이를 고려한 채널 용량을 설명한다.

FSO 채널에서 송신 파워 P_T 에 따른 수신 파워 P_R 은 식 (1)과 같다.[3]

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

η_T , η_R 은 송신기와 수신기의 효율, G_T , G_R 은 송신기와 수신기의 이득, L_T , L_R 은 송신기와 수신기의 포인팅 손실, L_{PS} 은 자유 공간 거리 손실을 의미한다.

G_T , G_R 은 각 송신 빔의 직경 D_T 와 수신 빔의 직경 D_R 이 클수록, 파장 λ 가 작을수록 증가한다. 이때 송·수신기 사이의 거리가 d 일 때 $D_R = D_T \left(1 + \left(\frac{\lambda d}{D_T^2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}$ 이다. [3]

$$G_T = \left(\frac{D_T \pi}{\lambda}\right)^2 \quad (2)$$

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

L_T , L_R 는 각각 송신 렌즈 및 수신 렌즈의 이득과 송신 렌즈 및 수신렌즈에서 발생하는 포인팅 오류 θ_T , θ_R 로 결정된다. [3]

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

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

L_{PS} 는 식 (6)과 같다. [3]

$$L_{PS} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (6)$$

b. MIMO 및 WDM의 신호 및 간섭

MIMO와 WDM은 서로 다른 채널의 신호를 동시에 전송하므로 채널 간 간섭이 발생한다. 채널이 M 개일 때 i 번째 수신 렌즈가 수신하는 총 파워를 P_{R_i} , i 번째 수신 렌즈가 수신하는 j 번째 채널의 파워를 $P_{R_{j,i}}$ 라 하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{R_i} = P_{R_{i,i}} + \sum_{\substack{j \in [1,M] \\ j \neq i}} P_{R_{j,i}} \quad (7)$$

이때 $P_{R_{i,i}}$ 는 i 번째 수신 렌즈에서의 신호, $\sum_{\substack{j \in [1,M] \\ j \neq i}} P_{R_{j,i}}$ 는 i 번째 수신 렌즈에서의 간섭이다.

MIMO와 WDM의 채널 간 간섭은 각각의 작동 방식에 의해 결정된다. 먼저 MIMO의 간섭은 빔의 발산에 의해

수신기에서 원하지 않는 채널의 신호를 수신하여 발생한다. 이러한 간섭은 송수신 렌즈에서 발생하는 포인팅 오류에 송수신 렌즈 사이의 변위가 더해진 것으로 볼 수 있다. i 번째 송신기와 수신기의 포인팅 오류 $\theta_{T_{i,i}}$, $\theta_{R_{i,j}}$ 를 0이라 가정하면 i 번째 송신기에서 j 번째 수신기로 보내진 빛의 포인팅 오류 $\theta_{T_{i,j}}$, $\theta_{R_{i,j}}$ 는 i 번째 송신기와 j 번째 수신기 사이의 변위이다. 본 논문에서는 MIMO 를 반지름이 r 인 원 위에 $\frac{2\pi}{M}$ 의 각도 간격으로 배치한다.

WDM 에서는 멀티플렉서와 디멀티플렉서를 통해 여러 파장의 빛을 한 번에 전송하고 다시 분리한다. 이때 디멀티플렉서가 서로 다른 파장의 빛을 완벽하게 분리하지 못하여 수신기에 다른 파장의 빛이 일부 흘러 들어가는데 이것이 WDM 채널에 간섭으로 작용한다. 이때 간섭의 세기는 디멀티플렉서의 성능에 따라 결정된다. $i \neq j$ 인 i, j 에 대해 $\epsilon_{i,j} = P_{R_{j,i}}/P_{R_{i,i}}$ 라 하면 $\epsilon_{i,j}$ 는 i 번째 수신기의 신호에 대한 j 번째 채널의 간섭의 비이다. 이때 모든 i, j 에 대해 $i\epsilon_{i,j} = \epsilon$ 이다. [4] WDM 에서는 MIMO 와 달리 서로 다른 채널의 빛을 물리적으로 같은 공간을 통해 전송하므로 동일한 시간대에 전송한 신호와 간섭의 포인팅 오류는 같다. 본 논문에서는 WDM 의 송신기와 수신기 사이의 포인팅 오류 θ_T , θ_R 를 0 으로 가정한다. 따라서 i 번째 수신 렌즈에서의 WDM 간섭 파워는 $(M-1)\epsilon P_{R_{i,i}}$ 이다.

2) 시뮬레이션 결과

표 1 위성 간 FSO 파라미터

파라미터	기호	값
총 송신 파워	P_T	1
파장	λ	1550nm
전파 거리	d	3000km
송신 빔의 지름	D_T	80mm
송수신기 효율	η_T, η_R	0.8
WDM 신호 대 간섭 비	ϵ	-30dB

위성 간 FSO 시스템에서 MIMO 를 사용하는 경우와 WDM 을 사용하는 경우 송신기의 신호 대 잡음 비(signal-to-noise-ratio, SNR)에 따른 채널 용량을 표 1 과 같은 파라미터로 MATLAB 을 통해 시뮬레이션 하였다. WDM 의 경우 채널 간격은 0.8nm 이다.

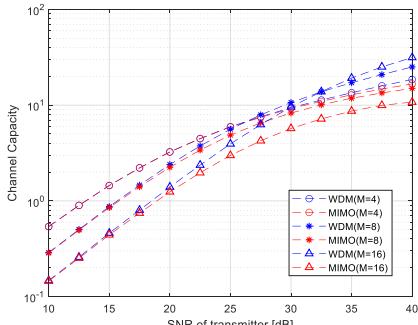


그림 1 FSO MIMO 및 FSO WDM 채널의 송신 SNR에 따른 채널 용량

그림 1 에서 SNR 이 낮을 경우 채널의 개수가 같으면 MIMO 와 WDM 의 채널 용량이 거의 일치하였다. SNR 이 증가함에 따라 MIMO 에 비해 WDM 의 채널 용량이 높은 것을 확인할 수 있다. MIMO 의 경우 채널의 개수가 많을수록 채널 용량이 낮은데 이는 다른 채널로 인한 간섭이 증가하기 때문이다. WDM 의 경우 낮은 SNR 에서는 MIMO 와 마찬가지로 채널의 개수가 적을수록 채널 용량이 높았고 SNR 이 증가함에 따라 채널의 개수가 많을수록 성능이 좋았다. 이를 통해 채널 용량의 관점에서 MIMO 의 경우 채널의 개수를 증가시키는 이득보다 그에 따라 증가하는 간섭으로 인한 손실이 크다는 것을 알 수 있다. WDM 의 경우 SNR 이 낮을 때는 MIMO 의 경우와 동일하며 SNR 이 높을 경우 채널의 개수를 증가시켜 얻는 이득이 그에 따라 증가하는 간섭으로 인한 손실보다 크다.

III. 결론

본 논문에서는 위성 간 FSO 에서 MIMO 와 WDM 의 간섭을 고려한 채널을 분석하고 시뮬레이션을 통해 SNR에 따른 채널 용량을 비교하였다.

MIMO 의 경우 채널의 개수를 증가시킬 때 얻는 효과보다 간섭이 증가하여 얻는 손실이 더 커 채널의 개수가 증가할수록 낮은 채널 용량을 보였다. WDM 의 경우 SNR 이 높을 때 채널의 개수를 증가시킬 때 얻는 채널 용량 향상 효과가 간섭으로 인한 손실을 상회하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 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. Majumdar, *Advanced Free Space Optics (FSO): A Systems Approach*, Springer
- [2] H. Kaushal, V. K. Jain and S. Kar, *Free space optical communication*, New Delhi, India: Springer India, 2017.
- [3] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, Firstquarter 2017.
- [4] I. T. Monroy and E. Tangdiongga, *Crosstalk in WDM Communication Networks*, Norwell, MA, USA: Kluwer Academic, 2002.