

무선 광통신 (FSO)을 이용한 위성간 통신에서의 아웃티지 확률 성능 분석

이준영, 차홍철, 고영채

고려대학교

{jylee25, chahongseol, koyc}@korea.ac.kr

Outage Probability Performance Analysis With FSO Based On Inter Satellite Link (ISL)

Joon-Young Lee, Hong-Seol Cha, Young-Chai Ko

Korea Univ.

요약

저궤도위성 (LEO Satellite) 통신은 매우 낮은 지연시간과 함께 전 세계적으로 매우 넓은 커버리지를 넓힐 수 있다. 또한 무선 광통신 (FSO)을 위성통신에 접목시키게 되면 대기상태에 영향을 거의 받지 않기 때문에 매우 빠른 속도의 데이터 전송률을 달성할 수 있게 된다. 이러한 특징을 활용한 위성통신은 매우 유망한 기술로 대두되어지고 있으며, 최근 많은 연구가 진행되어지고 있다. 본 논문에서는 FSO를 활용한 위성간 통신에서의 아웃티지 확률 (Outage Probability)의 식을 유도하고 그 성능을 확인한다.

I. 서론

위성을 활용한 통신은 매우 광범위한 지역으로 서비스를 제공하는 이점을 활용하여, 방송 및 재난 구호분야 등에서 널리 사용되어지고 있다. 최근 해외 여러 기업에서 이러한 위성통신에 대해 연구중에 있다. 특히, Space X의 Starlink는 수백 개의 저궤도 위성을 보유하여 현재 베타 테스트 진행중에 있다 [1].

또한 위성통신에서는 Radio Frequency (RF)통신 대신에 무선광통신 (FSO)이 핵심적인 역할을 할 것으로 기대되어진다. RF 통신은 FSO 통신에 비해 더 큰 빔 다이버전스로 인하여 인하여 더 큰 전력이 필요하게 되고, 또 저궤도 위성간 넓은 통신 거리를 감안 할 때, 위성통신에서는 FSO가 더 적합하다. [2]에서는 FSO를 활용한 위성간 통신에서의 BER 성능을 분석하였다.

본 논문에서는 저궤도 위성간 통신의 상황에서의 Outage Probability 수식을 유도하고, 그 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

II. 본론

FSO의 채널은 송수신단의 거리에 영향을 받게 되는 경로 감쇄(Path Loss, h_l), 날씨 등에 영향을 받게 되는 대기 감쇄(Atmospheric Loss, h_a), 그리고 수신단에 얼마나 정확하게 포인팅이 되는지에 의해 결정되는 포인팅 오류(Pointing Error, h_p)에 $h = h_l h_a h_p$ 로 결정된다.

1) 경로 감쇄(Path Loss, h_l)

Beer-Lambert Law에 따르면 경로 감쇄 h_l 은

$$h_l = \exp(-\sigma L) \quad (1)$$

로 결정된다. 여기서 σ 는 감쇄 상수이고 L 은 전송거리를 의미한다. 이 두 가지 파라미터가 결정되면 경로 감쇄는 보통 deterministic하다고 가정된다.

2) 대기 감쇄 (Atmospheric Loss, h_a)

위성간 통신에서는 고도 약 550km 위치에서 진행된다. 이 구간에서는 대기상태에 따른 영향을 거의 받지 않는다고 가정하여 약한 난기류 (weak turbulence) 모델에서 사용되는 Log-Normal 분포 모델을 사용하였다. 이 모델의 PDF 식은 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{1}{2h_a\sqrt{2\pi\sigma_X^2}} \exp\left(-\frac{(\ln h_a + 2\sigma_X^2)^2}{8\sigma_X^2}\right) \quad (2)$$

Rytov variance인 $\sigma_R^2 = 1.23k^{7/6}C_n^2 z^{11/6}$ 을 이용하여 $\sigma_X^2 = \sigma_R^2/4$ 로 표현할 수 있다. k 는 optical wave length, C_n^2 은 고도에 따른 intensity of atmospheric turbulence를 나타낸다. [3]

3) 포인팅 오류(Pointing Error, h_p)

빔폭이 w_z 인 가우시안 분포를 따른다고 가정하였을 때 포인팅 오류의 식은 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$h_p \approx A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w_{z_{eq}}^2}\right) \quad (3)$$

$A_0 = [erf(v)]^2$ 는 포인팅 오류 없이 정확하게 align 되었을 때의 h_p 를 나타내고, 수신기의 반지름 a 와, 거리 z 에서의 equivalent 빔폭을 나타내는 $w_z \approx w_{z0} \sqrt{1 + \epsilon \left(\frac{\lambda z}{\pi w_{z0}^2}\right)^2}$ 를 이용하여 $v = \frac{a\sqrt{\pi}}{w_z\sqrt{2}}$ 로 표현할 수

있다.

[4]을 참고하여 (1), (2), (3)을 이용한 h 에 대한 composite PDF를 구하면 아래의 (4)로 나타낼 수 있다.

$$f_h(h) = \frac{\epsilon^2}{2(A_0 h_l)^2} h^{\epsilon^2 - 1} \exp(2\sigma_X^2 \epsilon^2 (1 + \epsilon^2)) \times \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \left(\frac{h}{A_0 h_l} \right) + 2\sigma_X^2 (1 + 2\epsilon^2)}{\sqrt{8\sigma_X^2}} \right) \quad (4)$$

이를 SNR γ 와 h 의 관계를 이용하여 γ 에 의한 PDF를 구하면

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{\epsilon^2}{4} \left(\frac{\epsilon^2}{1 + \epsilon^2} \right) \gamma^{-\frac{\epsilon^2}{2}} \gamma^{\frac{\epsilon^2}{2} - 1} \exp(2\sigma_X^2 \epsilon^2 (1 + \epsilon^2)) \times \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \left(\frac{\epsilon^2}{1 + \epsilon^2} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma}} \right) + 2\sigma_X^2 (1 + 2\epsilon^2)}{\sqrt{8\sigma_X^2}} \right) \quad (5)$$

위와 같이 (5)로 나타낼 수 있다.

아웃티지 확률은 아래의 식 (6)을 이용하여 얻을 수 있다.

$$P_{out} = \Pr(\gamma < \gamma_{th}) = F(\gamma_{th}) \quad (6)$$

$F(\gamma)$ 는 γ 에 대한 CDF로 식 (5)의 PDF를 랜덤변수 변환과 테일러 시리즈 변환을 이용하여 적분하면 식 (7)로 나타낼 수 있다.

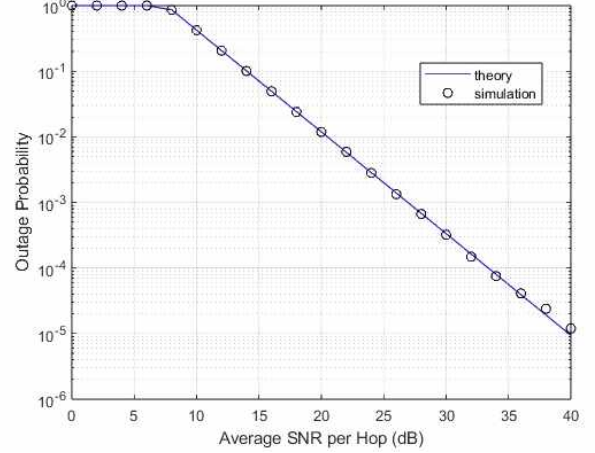
$$F(\gamma) = \frac{1}{2} \exp(-2\sigma_X^2 \epsilon^4) [\exp(\sqrt{8\sigma_X^2} \epsilon^2 A(\gamma)) \operatorname{erfc}(A(\gamma)) + \sqrt{\pi} \exp(2\sigma_X^2 \epsilon^4) (\operatorname{erf}(A(\gamma)) - \sqrt{2\sigma_X^2}) + 1] \quad (7)$$

이 때의 $A(\gamma)$ 는 $A(\gamma) = \frac{\ln \left(\frac{\epsilon^2}{1 + \epsilon^2} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma}} \right) + 2\sigma_X^2 (1 + 2\epsilon^2)}{\sqrt{8\sigma_X^2}}$ 로 나타낼 수 있다.

그림 1은 (7)을 활용하여 이론값과 시뮬레이션 값을 비교한 그래프이다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 <표 1>에 있다.

w_{z0}	50cm	σ_X^2	2.016×10^{-80}
a	3cm	σ_R^2	4.032×10^{-80}
visibility	100km	σ_x	0.3
altitude	550km	ϵ	1.179
λ	1550nm	C_n^2	3.033×10^{-89}
z	500km		

<표 1> 파라미터 값



III. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성간의 통신의 아웃티지 확률 수식을 유도하였다. 또한 이 수식을 시뮬레이션을 통해 타당함을 확인하였다. 추후 이 결과를 활용하여 여러 위성을 연결한 멀티홉 통신 등에서도 활용할 수 있을 것이라 예상된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021-0-00260, 저궤도 군집 소형 위성 간 통신 기술 개발)

참고 문헌

- [1] N. Pachler, I. del Portillo, E. F. Crawley, and B. G. Cameron, "An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband," in Proc Int. Conf. Commun. Workshops (ICC Workshops), Jun. 2021, pp. 1-7.
- [2] 이준영, 오태인, 고영채, "광통신(FSO)을 이용한 위성간 통신의 BER 성능 분석," 2023년 한국통신학회 추계종합학술발표회, 경주, 대한민국, Nov.22-24, 2023.
- [3] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques," IEEE Commun. Surveys Tut., vol. 19, no. 1, pp. 57-96, Firstquarter 2017.
- [4] Y. Zhang, S. Tang and J. -Y. Wang, "Average bit error rate performance of direct current biased orthogonal frequency division multiplexing in free-space optical communications over weak turbulence," 2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Hefei, China, 2014, pp. 1-5.