

대기 채널의 난류 페이딩을 고려한 CCSDS 광통신 시스템의 성능 분석

선승우, 노정훈

충북대학교 전자정보대학 반도체공학부

sunsunsw@chungbuk.ac.kr, jh.noh@chungbuk.ac.kr

Performance Analysis of CCSDS Optical Communication Systems Considering Turbulence Fading

Seung Woo Sun, JungHoon Noh

Chungbuk National Univ.

요 약

본 논문에서는 지구-우주 간 광통신 시스템에서 대기 채널의 난류 페이딩을 고려한 성능 분석을 수행하였다. ITU-R P.1621-2 및 P.1622-1 권고안을 기반으로, 중심 주파수 193 THz 대역에서 운용되는 지구-우주 광통신 링크를 가정하고, CCSDS 표준에 따른 링크 수준 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하였다. 레이저 통신 시스템에서 대기 채널은 일반적으로 수 ms 수준의 긴 Coherence time 을 가지며, CCSDS 광통신 표준 역시 이를 반영하여 수백 ms 에 달하는 인터리빙 블록 크기를 허용하고 있다. 인터리빙 블록의 크기는 시스템 지연, FEC 성능, 수신기 하드웨어 복잡도 등과 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서는 대기 난류의 강도, 채널 Coherence time, SNR 에 따른 성능을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 제안된 시뮬레이션 플랫폼과 분석 결과는 향후 심우주 및 저궤도 위성과 지상국 간의 광통신 시스템 설계에 유용한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서 론

최근 심우주 및 지구 저궤도 위성과의 통신 수요 증가에 따라 고속·고용량 데이터 전송이 가능한 광통신 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 20 THz~375 THz 의 대역을 이용한 광통신은 RF 통신에 비해 월등히 넓은 대역폭을 제공한다는 장점이 있다. 그러나 지구 대기를 통과하는 광신호는 흡수, 산란, 굴절, 난류 등의 채널 손상 요인에 의해 심각한 성능 저하를 겪는다[1].

이 중 대기 난류는 광신호의 진폭과 위상에 빠른 변화를 유발하여 통신 품질에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 CCSDS 표준에 따른 광통신 시스템에 대기 난류 페이딩 영향을 반영한 채널 모델을 적용하고, 실제와 유사한 환경에서의 시스템 성능을 분석하였다. 본 연구는 ITU-R P.1622-1[1] 권고안에 기반한 대기 채널 모델을 구현하였으며, 기존에 독립적인 난류 페이딩 채널을 가정하고 이론적 BER 성능을 분석한 연구들과 달리 채널의 시간적 상관관계를 고려하고 채널 부호화와, 인터리빙 등의 실제 광통신 표준 규격을 적용한 시뮬레이션을 수행했다는 점이 특징이다.

II. 시스템 구현

1. CCSDS 표준 시뮬레이터

본 연구는 CCSDS 표준 기반의 링크 레벨 시뮬레이터(Link-Level Simulator, LLS)를 기반으로 수행되었다. 구현된 LLS 는 랜덤하게 생성된 전송 프레임을 입력받아, 이를 부호화한 후 인터리빙 및 변조 과정을 거쳐 0 과 1 로 구성된 이진 벡터를 물리 계층에 전달한다. CCSDS 표준은 1/2 및 9/10 LDPC 부호를 기본으로 채택하고 있으며, 반복 부호(repetition coding)를 통해 다양한 유효 코드율을 지원할 수 있도록 설계되어 있다. 특히 광통신 채널의 특성을 고려하여, 인터리빙 블록의 크기를 기존 RF 통신에 비해 훨씬 크게 설정할 수 있는 점이 주요한 특징이다. 예를 들어, 2 Gbps 의 전송 속도에서는 인터리빙 블록의 길이가 최대 1 초에 이를 수 있으며, 이는 수 밀리 초(ms) 수준의

대기 난류 채널의 coherence time (τ_c)을 반영한 설계라 할 수 있다. 이진 벡터의 각 비트는 슬롯 단위의 광 펄스 유무를 나타내며, 물리 계층에서는 이를 On-Off-Keying (OOK)심볼로 변환한다. 송신된 신호는 대기 채널의 난류, 흡수, 산란, 포인팅 오차 등의 영향을 받아 감쇄되거나 변형된다. 수신 측에서는 이러한 왜곡된 신호를 동기화, 복호화 하며, 역 인터리빙 과정을 통해 원래의 전송 프레임을 복원한 후 상위 계층으로 전달한다.

2. 대기 채널 모델 구현

ITU-R P.1622-1[1] 권고안은 20~375 THz 주파수 대역에서의 지구-우주 간 통신을 위한 대기 채널 특성을 정의하며, 채널 품질에 영향을 주는 주요 손상 요인은 흡수, 산란, 굴절, 그리고 난류로 구분된다. 이중 대기 난류는 온도와 압력의 공간적 불균일로 인해 발생하는 공기의 굴절률 변화로, 신호의 위상과 진폭을 빠르게 변동시키는 주요 원인이다.

대기 난류가 광통신 시스템에 미치는 영향은 크게 진폭 Scintillation, Variation of Angle of arrival, Beam wander, Beam spreading 의 네 가지 범주로 분류된다. 이러한 현상 중 특히 진폭 Scintillation 은 진폭 빔 내 에너지의 재분포로 인한 현상으로, 수신 신호의 강도가 시간에 따라 무작위로 변동한다. 이로 인해 지구-우주 및 우주-지구 경로 모두에 영향을 미치며, RF 통신에서의 Fast 페이딩과 유사한 영향성을 가져 난류 페이딩으로 간주된다.

Scintillation 의 영향은 log-irradiance 의 분산 $\sigma_{\ln N}^2$ 으로 측정되며, 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_{\ln N}^2 = \frac{1.924 \times 10^8 \int_{h_0}^Z C_n^2(h)(h - h_0)^{5/6} dh}{\lambda^{7/6} \sin^{11/6} \theta}$$

여기서 $C_n^2(h)$ 는 난류 구조 파라미터, λ 는 파장(μm), θ 는 고도 각, h_0 는 지구국의 고도(m), Z 는 난류 유효 높이(일반적으로 20,000m)이다. 이 분산이 클수록 신호의 변동이 심해져 통신 품질이 저하된다.

우주-지구 경로에서는 Aperture Averaging 에 의해 그 영향을 감소시킬 수 있으며, 해당 계수 A 는 다음과 같이 계산된다.

$$A = \frac{1}{1 + 1.1 \times 10^7 \left(\frac{D^2 \sin \theta}{z_0 \lambda} \right)^{7/6}}$$

여기서 D 는 지구국 수신 개구부의 직경(m)을 의미한다. z_0 는 난류 스케일의 높이로, 다음과 같이 정의된다.

$$z_0 = \left[\frac{\int_{h_0}^z C_n^2(h) h^2 dh}{\int_{h_0}^z C_n^2(h) (h - h_0)^{5/6} dh} \right]^{6/7}$$

대기 난류 채널의 시간적 변동을 모사하기 위해 다음과 같은 Ornstein-Uhlenbeck (OU) 프로세스 $X(n)$ 를 이용한다.

$$X(n) = e^{-\frac{\Delta t}{\tau_c}} X(n) + \sqrt{\left(1 - e^{-\frac{2\Delta t}{\tau_c}}\right) \cdot A \sigma_{\ln N}^2} \cdot \xi_n, \quad \xi_n \sim \mathcal{N}(0,1)$$

여기서 Δt 는 OOK 심볼 시간을 의미한다. 시간에 따라 생성된 $X(n)$ 을 통해 생성된 채널 이득은 다음과 같다.

$$h(n) = \exp\left(X(n) - \frac{1}{2} A \sigma_{\ln N}^2\right)$$

III. 성능 분석 결과

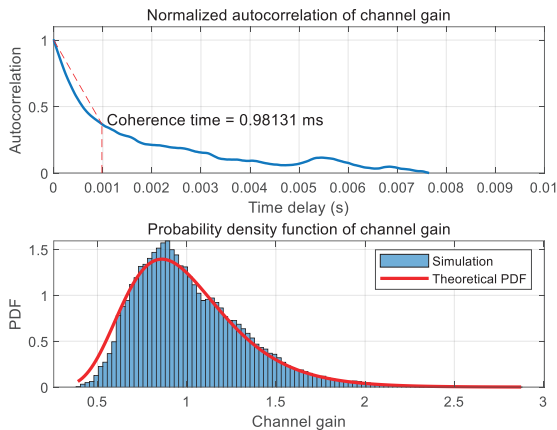


Figure 1. Statistical characteristics of channel gain

시뮬레이션은 레이저 파장 1550 nm, 고도 각 40°, 지표 난류 구조 파라미터 $C_0 = 1.0 \times 10^{-13} m^{-2/3}$, 바람 세기 $V_{rms} = 30 m/s$, 1/2 LDPC code, Repetition 1을 가정하여 수행되었다. 먼저 Fig. 1은 OU 프로세스 기반 난류 채널 모델의 시간적 및 통계적 특성을 나타낸다. 시뮬레이션 데이터의 자기상관 함수로부터 계산된 τ_c 은 약 0.98 ms, 이는 채널의 시간 상관성과 일치한다. $A \sigma_{\ln N}^2$ 은 약 0.1로 설정되었으며, 시뮬레이션 된 채널 이득의 PDF는 이론적 로그정규 분포와 높은 일치율을 보여 모델의 타당성을 확인할 수 있다.

Fig.2는 AWGN 채널과 대기 난류 채널에서 다양한 coherence time($\tau_c = 1ms, 5ms$), 난류 강도($\sigma = 0.1, 0.5$), 인터리빙 블록 크기($N = 2048, 4096$)에 따른 SNR 대 BER 성능을 나타낸다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이, 난류 강도가 클수록, 그리고 coherence time이 짧을수록 전체적으로 BER 성능이 저하된다. 특히 $\sigma = 0.5$ 및 $N = 2048$ 이하의 조건에서는 BER이 높은 수준($10^{-1.5}$)으로 유지되어, 수신 성능이 크게 약화됨을 알 수 있다. 반면, 인터리빙 블록 크기를 증가시킬수록 성능 향상이 뚜렷하게 나타나며, 특히 $N = 4096$ 의 경우 SNR 5 dB

미만에서도 BER이 급격히 저하하며, 긴 인터리빙 블록이 버스트 오류를 효과적으로 분산시켜, 오류 정정 능력을 극대화할 수 있음을 보여준다.

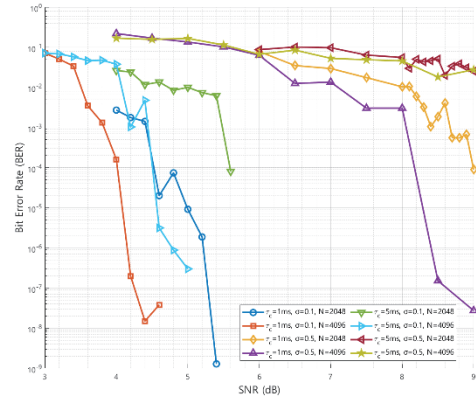


Figure 2. 난류 강도, coherence time 및 인터리빙 블록 크기에 따른 BER 성능 비교

이러한 결과는 자유 공간 광통신 시스템에서 대기 난류에 효과적으로 대응하기 위해 충분히 큰 인터리빙 블록 크기($N = 4096$ 이상)가 필요함을 시사한다. 또한 동일한 인터리빙 블록 크기에서도 난류 강도가 낮을수록 BER 성능이 전반적으로 향상되는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 시스템 설계 시, 인터리빙 블록 크기, 난류 강도, 그리고 coherence time 간의 상호작용을 고려하여, 지연 시간과 시스템 복잡도 제한 내에서 최적의 인터리빙 블록 구성을 도출하는 것이 필수적이다.

IV. 결론

본 논문에서는 대기 난류 채널 모델을 고려하여 CCSDS 표준의 광통신 시스템 성능을 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 τ_c 이 매우 긴 대기 난류 페이딩의 영향으로 인해 발생하는 버스트 오류는 광통신 시스템의 성능에 결정적인 영향을 미치며, 이를 극복하기 위해 적절한 크기의 인터리빙 블록 적용이 필수적임을 확인하였다. 본 논문에서는 우주-지구 방향의 채널에서 진폭 Scintillation 효과만을 분석하였으나, 향후 지구-우주 방향의 채널, 대기의 흡수 및 산란 효과, Beam wander, Variation of Angle of arrival, Beam spreading 등까지 고려한 시뮬레이션을 통해 보다 실제적인 환경에서의 시스템 성능을 예측하고자 한다. 본 연구 결과는 향후 심우주 및 저궤도 위성과 지상국 간의 광통신 시스템 설계에 있어 유용한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술평가연구소의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRIT-CT-22-040, 이종 위성군 우주 감시정찰 기술 특화연구센터)

참고 문헌

- [1] ITU-R P.1622-1, "Prediction methods required for the design of Earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz," International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2022.
- [2] The Consultative Committee for Space Data Systems. "Optical Communications Coding and Synchronization, Recommended Standard, Issue 2. CCSDS 142.0-B-1", CCSDS, Jan. 2022.