

Double Shadowed Rician 기반 위성-지상 링크의 물리계층 보안 성능 분석

손정민, 고영채
고려대학교

<jmson0307, koyc>@korea.ac.kr

Physical Layer Security Analysis of Satellite-to-Ground Links Based on Double Shadowed Rician Fading

Jung-Min Son, Young-Chai Ko
Korea Univ.

요약

본 논문에서는 Double Shadowed Rician(DSR) 페이딩 모델을 적용하여 RF 기반 위성-지상 링크의 물리계층 보안(PLS) 성능을 분석하였다. 보안 아웃티지 확률(Secrecy Outage Probability, SOP)을 통해 도청 취약성을 평가하였으며, 이중 쉐도잉을 반영한 DSR 모델을 통해 위성-지상 채널의 현실적인 특성을 고려하였다. 또한 도청자(Eve)의 오프축 이격에 따른 전파 감쇠 효과를 분석하여, 수신 위치 변화가 보안 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

I. 서론

LEO(Low Earth Orbit) 위성 통신은 낮은 전송 지연과 넓은 서비스 범위로 인해 차세대 통신 인프라의 핵심 기술로 주목받고 있다. 그러나 개방된 RF(Radio Frequency) 채널을 사용하는 특성상, 외부 도청이나 신호 노출 등 보안 위협에 쉽게 노출되는 한계가 존재한다. 이러한 문제를 완화하기 위해 인공 잡음, 빔포밍, 전력 제어와 같은 물리계층 보안(Physical Layer Security, PLS)기법이 활발히 연구되고 있으며, 최근에는 좁은 빔 전송을 활용하여 도청 가능성을 최소화할 수 있는 무선 광통신(Free-Space Optical, FSO)기술이 보안 향상 대안으로 제시되고 있다. 본 연구에서는 RF 기반 위성-지상 링크를 대상으로, 실제 전파 환경을 보다 정밀하게 반영할 수 있는 Double Shadowed Rician(DSR) 페이딩 모델을 적용하였다. 또한 도청자의 오프축 위치에 따른 전파 감쇠 효과를 고려하여, 수신 위치 변화가 보안 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 DSR 기반 링크에서 오프축 감쇠가 보안 아웃티지 확률(Secrecy Outage Probability, SOP)에 미치는 영향을 분석하고, 향후 FSO 기반 위성 통신 시스템의 보안성 향상을 위한 기초적 분석 결과를 제시하였다.

II. 본론

1) 시스템 모델

본 연구에서는 RF 기반 위성-지상 링크의 물리 계층 보안 성능을 분석하기 위해 와이어맵 채널 기반의 시스템 모델을 구성하였다. 송신자 Alice(LEO 위성)는 지상 수신자 Bob에게 신호를 전송하며, 도청자 Eve가 이를 수신할 수 있는 다운링크 환경을 가정한다. 시스템은 송신자와 수신자가 각각 하나의 안테나를 사용하는 SISO 구조로 설정하였다. Bob은 위성의

보어사이트(bore sight) 근처에 위치하여 높은 링크 품질을 확보하고, Eve는 빔 중심으로부터 일정 각도 이격된 오프축 위치에 존재한다고 가정한다. 이 구성은 빔 중심부에 위치한 합법적 사용자와 주변부에 위치한 도청자 간의 링크 품질 차이를 반영하기 위한 것이다. 본 연구에서는 위성-지상 환경의 실제 특성을 고려하기 위해 DSR 페이딩 모델을 적용하였으며, 이를 바탕으로 보안 용량(Secrecy Capacity) 및 보안 아웃티지 확률(SOP)을 중심으로 보안 성능을 평가하였다.

2) 채널 모델

위성 통신 환경에서 물리 계층 보안 성능을 분석하기 위해서는 신호의 페이딩과 쉐도잉(shadowing) 현상을 동시에 고려할 수 있는 채널 모델이 필요하다. 기존의 Shadowed Rician(SR) 모델은 직접파(LoS, Line-of-Sight) 성분의 쉐도잉 효과만을 고려한다. 따라서 본 논문에서는 도심지, 지형, 기상 변화 등으로 인해 장기적 전력 변동이 발생하는 위성-지상 통신의 환경적 요인을 보다 정확히 반영할 수 있는 Double Shadowed Rician(DSR) 모델을 적용하였다. DSR 모델은 LoS 및 NLoS 구성요소에 각각 독립적인 쉐도잉 변수를 도입함으로써 복잡한 전파 환경에서의 위성-지상 링크를 보다 현실적으로 표현한다. DSR 페이딩 채널의 채널 이득 h_{DSR} 은 다음과 같이 정의된다.[1]

$$h_{DSR} = \sqrt{\zeta_d} \sqrt{(K\Omega)/(K+1)} e^{j\theta} + \sqrt{\Omega/(K+1)s} \quad (1)$$

여기서 $\zeta_d \sim \Gamma(m_d, 1/m_d)$, $\zeta_s \sim \text{Inv-}\Gamma(m_s, 1/m_s)$ 이며, 각각 LoS와 NLoS 성분의 쉐도잉 변동을 나타낸다. m_d 는 LoS 성분의 단기적인 쉐도잉 강도를, m_s 는 링크 전력의 장기적 변동 정도를 제어하는 형상 파라미터이다. DSR 모델은 평상시 안정적인 링크가 유지되다가, 간헐적으로 큰 감쇠가 발생하는 위성-지상 통신의 장기적 변동 특성을 잘 반영해 실제 링크의 전파 특성을 보다 정확히 모사할 수 있다.

위성 빔의 중심(boresight)으로부터 수신기 위치가 이격되면 수신 전력이 감소하며, 이는 오프축 전파 감쇠(off-axis attenuation)로 정의된다. SISO 환경에서의 오프축 감쇠는 다음과 같이 표현된다.

$$b(\varphi) = (J_1(u)/2u + 36(J_3(u)/u^3))^2, u = 2.07123 d/R \quad (2)$$

여기서 $J_1(\cdot)$, $J_3(\cdot)$ 은 베셀 함수이며, R 은 빔의 반지름, d 는 빔 중심과 수신기 간 거리이다. 식 (2)에 따라 수신기가 보어사이트로부터 멀어질수록 감쇠 계수 $b(\varphi)$ 가 감소하여 수신 신호 세기가 약화된다. 최종적으로, 오프축 감쇠 계수 $b(\varphi)$ 와 채널 백터 g 를 결합한 전체 채널 모델과 수신기에서의 SNR은 다음과 같이 정의된다.

$$h = \sqrt{b(\varphi)} g, \gamma = P/\sigma^2 |h|^2 \quad (3)$$

여기서 P 는 송신 전력, σ^2 는 수신 잡음 전력이다. 즉, 위 식은 빔 중심으로부터의 거리 이격에 따른 감쇠와 페이딩 채널의 통계적 특성을 동시에 고려한 유효 수신 SNR 모델을 나타낸다.

3) 보안 성능 지표 정의

본 논문에서는 RF 기반 위성-지상-위성 시스템의 보안 성능을 평가하기 위해 보안 용량(Secrecy Capacity, C_s)과 보안 아웃타지 확률(Secrecy Outage Probability, SOP)을 사용한다. 보안 용량은 합법 수신자 Bob과 도청자 Eve 간의 순간적인 채널 용량 차이를 의미하며, 물리 계층 보안 측면에서 안전하게 전송 가능한 정보량으로 정의된다. 보안 용량은 다음과 같다.

$$C_s = \begin{cases} C_B - C_E, & \gamma_B > \gamma_E \\ 0, & \gamma_B \leq \gamma_E \end{cases} \quad (4)$$

여기서 C_B , C_E 는 각각 Bob과 Eve의 채널 용량을 나타낸다. SOP는 주어진 목표 비밀율 R_s 보다 실제 보안 용량이 낮을 확률로 정의되며, 이는 보안 통신 실패 확률을 의미한다. SOP는 다음과 같이 표현된다.

$$Pr(C_s < R_s) = Pr(\log_2((1 + \gamma_B)/(1 + \gamma_E)) < R_s) \quad (5)$$

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 경험적 누적분포함수(empirical CDF)를 추정하여 계산 복잡도를 완화하고, 수치적으로 근사된 SOP를 도출하였다. 이를 통해 DSR 페이딩 및 오프축 감쇠 특성이 보안 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

4) 시뮬레이션 결과

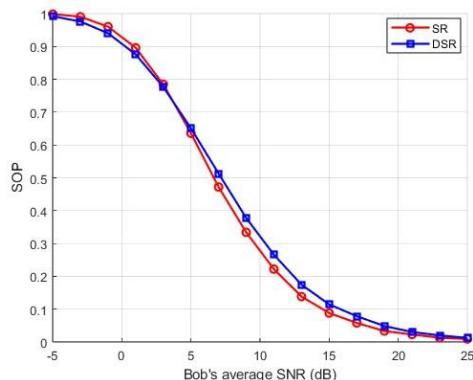


그림 1 SR 및 DSR의 SOP 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 SR 및 DSR 채널의 보안 성능을 비교하였다. Eve의 평균 SNR을 2 dB로 고정하고, Bob의 평균 SNR을 변화시키며 SOP의 변화를 분석하였다. 시뮬레이션은 RF 기반 위성-지상 다운링크 환경에서 수행되었으며, LoS가 존재하되 산란이 우세한 도심형 환경을

모사하였다.[1] 그림 1은 Bob의 평균 SNR 변화에 따른 SR 및 DSR 채널의 SOP 곡선을 나타낸다. 두 모델 모두 SNR이 증가함에 따라 SOP가 감소하였다. DSR은 저 SNR 영역에서 우수한 보안 성능을 보인 반면 고 SNR 영역에서는 DSR의 채널 분산이 SR보다 커 일부 샘플이 불리한 조건을 만족하지 못함에 따라 상대적으로 낮은 성능을 보였다. 이는 쉐도잉 변동성을 현실적으로 반영한 결과로 해석된다.

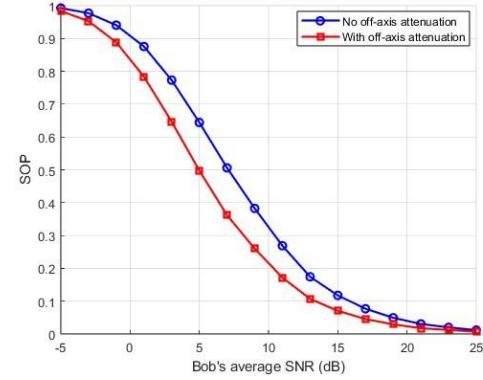


그림 2 오프축 전파 감쇠 유무에 따른 SOP 결과

그림 2는 DSR 채널에 오프축 전파 감쇠(off-axis attenuation)를 적용했을 때의 SOP 변화를 보여준다. 위성 및 수신자의 파라미터는 표 1과 같다. 시뮬레이션 결과 오프축 감쇠를 고려한 경우 SOP가 전 구간에서 감소하였다. 도청자가 빔 중심에서 멀어질수록 수신 신호가 감쇠되어 Eve의 SNR이 낮아지고, 결과적으로 C_s 가 증가하기 때문이다.

파라미터	기호	값
SOP 임계치	R_s	1 [bits/s]
위성 고도 [LEO]	R_{alt}	500 [km]
빔 커버리지	R_{beam}	120 [km]
Eve의 이격 각도	θ_E	5° – 25°
Bob의 평균 SNR	$\bar{\gamma}_b$	-5:2:25 [dB]
Eve의 평균 SNR	$\bar{\gamma}_e$	2[dB]
DSR 페이딩	m_d, m_s, Ω	2.3, 3.8, 1

표 1 시뮬레이션 파라미터

III. 결론

본 논문에서는 RF 기반 위성-지상 링크의 PLS 성능을 분석하기 위해 DSR 페이딩 모델을 적용하였다. DSR 모델의 현실적인 채널 특성을 반영하였고, Eve의 오프축 이격에 따른 전파 감쇠 효과를 함께 분석하였다. 시뮬레이션 결과, Eve의 이격 거리가 증가할수록 수신 신호 감쇠로 인해 보안 용량이 향상되고 SOP가 감소함을 확인하였다. 향후 연구에서는 멀티홉 위성-지상 구조 및 FSO 링크와의 연계를 통해 보안성 향상 방안을 도출하는 것을 목표로 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022-0-00704, 초고속 이동체 지원을 위한 3D-NET 핵심 기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] N. Bhargav, S. L. Cotton, P. S. Bithas, P. C. Sofotasios, M. D. Yacoub, and M. Valkama, "Double shadowing the Rician fading model," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 392–395, Aug. 2016.