

시스템 레벨 시뮬레이터 기반 저궤도 위성 다운링크 성능 분석

박소민, 최민지, 곽희주, 유철우*
명지대학교

thalsi@mju.ac.kr, choiminji@mju.ac.kr, wopelt8@mju.ac.kr, *cwyou@mju.ac.kr

Performance Analysis of LEO Satellite Downlink Based on a System-Level Simulator

Somin Park, Minji Choi, Heeju Kwak, Cheolwoo You*
Myongji University

요 약

본 논문은 3GPP 에서 거론되는 시나리오를 기반으로 저궤도 위성 통신 시스템의 Downlink system-level simulator(SLS)를 구현하고, 주요 표준 지표들을 이용해 구현된 시뮬레이터의 정확도를 비교·검증한다. 구현된 SLS 는 시간에 따라 변화하는 위성과 단말 간 기하학적 정보를 기반으로 단말별 수신 신호 전력과 Co-channel 빔 간섭 전력을 산출하며, 주파수 재사용 계수에 따른 간섭 빔 범위의 변화를 반영하여 성능을 비교·분석한다. 성능 검증은 Coupling loss 와 SIR 및 SINR 분포 등 주요 참조 지표들 비교하는 방식으로 수행한다. 구현된 SLS 및 검증 결과는 향후 빔 운용과 자원할당 기법의 공정 비교를 위한 재현 가능한 Baseline 으로 활용될 수 있다.

I. 서 론

위성통신 시스템에서는 다중 스폿빔(spot beam) 구조와 주파수 재사용을 통해 동일한 주파수 자원을 공간적으로 반복 활용함으로써 위성의 총 처리량을 향상시키는 High-throughput satellite(HTS) 시스템을 활용하고 있다. 위성 다중빔 시스템은 지상 시스템보다 커버리지가 넓고 장거리 전송을 전제로 하여 경로손실과 위성 안테나 이득에 의해 수신 전력이 크게 좌우된다. 특히, 저궤도(low earth orbit, LEO) 위성 통신은 위성의 고속 이동으로 인해 위성과 단말 간 기하 정보가 시간에 따라 빠르게 변하고 주파수 재사용에 따른 다중빔, 인접 위성 간섭이 동적으로 변화한다. 따라서 저궤도 위성통신 시스템의 성능 분석을 위하여 표준 시나리오 기반의 System-level simulator(SLS) 개발이 필수적이다.

본 연구는 3GPP 에서 고려되는 위성 통신 시나리오를 기반으로 LEO 위성 SLS 를 구현하고 해당 문서의 기준 결과와 Coupling loss(CL), SIR, SINR 성능을 비교하여 구축된 시뮬레이터의 실효성을 검증한다.

II. 본론

본 연구에서는 3GPP TR 38.811[1]과 TR 38.821[2]를 참고하여 다운링크(DL) SLS 를 제작한다. 고도 600km 에 위치한 19 개의 스폿빔을 사용하는 LEO 위성들을 가정하였으며, 주파수 재사용 계수(frequency reuse factor, FRF)는 1 과 3 의 경우를 실험한다. FRF 1 은 모든 빔이 모든 대역을 함께 사용하는 것이고, FRF 3 은 주파수 대역을 3 분할하여 인접한 빔들이 다른 서로 다른 주파수 대역을 사용하도록 배치하는 방식이다.

FRF 에 따라 인접 위성의 간섭 빔 범위는 달라지며,

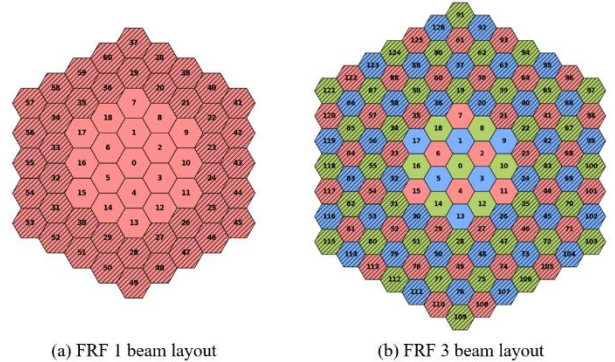


그림 1. FRF 에 따른 스폿빔 레이아웃

이에 따른 빔 레이아웃은 그림 1 과 같다. 그림에서 셀 색상은 사용하는 주파수 대역에 따라 다르게 나타내었으며, 빗금 친 셀은 인접 위성의 간섭 빔을 의미한다.

주파수 대역은 Ka-band, S-band 를 가정하였으며 각 대역의 대상 터미널은 각각 VSAT, Handheld 이다. 본 연구에서는 매 슬롯마다 단말 u 와 빔 b 간 거리 및 Elevation angle 을 통해 Path loss $L_{b,u}$ 를 계산하고, 빔의 보어사이트(Boresight)와 단말 간의 각도 $\theta_{b,u}$ 와 단말의 보어사이트와 빔 간의 각도 $\phi_{b,u}$ 를 통해 각각 빔 안테나 이득 G_b , 단말의 안테나 이득 G_{ut} 를 계산한다. 이때 위성과 단말의 안테나 이득 패턴 $G_b(\theta)$ 와 $G_{ut}(\phi)$ 는 다음 수식을 이용하여 계산한다.

$$G(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta = 0 \\ \frac{1}{4} \left| \frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin\theta)}{k \cdot a \cdot \sin\theta} \right|^2, & 0 < |\theta| \leq 90. \end{cases} \quad (1)$$

표 1. LEO 위성의 SLS 관련 변수들

	Ka-band (20 GHz)	S-band (2 GHz)
Equivalent satellite antenna aperture	0.5 m	2 m
Satellite EIRP density	4 dBW/MHz	34 dBW/MHz
Satellite Tx max Gain	38.5 dBi	30 dBi
3dB beamwidth	1.7647 deg	4.4127 deg
Satellite beam diameter	20 km	50 km
Maximum Bandwidth per beam	400 MHz	30 MHz

표 2. 단말의 SLS 관련 변수들

	VSAT	Handheld
Frequency band	Ka band (20 GHz)	S band (2 GHz)
Antenna type and configuration	Directional with 60 cm equivalent aperture diameter	(1, 1, 2) with omni-directional antenna element
Polarisation	circular	Linear: +/-45°X-pol
Rx Antenna gain	39.7 dBi	0 dBi per element
Antenna temperature	150 K	290 K
Noise power density	-176.8 dBm/Hz	-174 dBm/Hz
Noise figure	1.2 dB	7 dB

(1)에서 $J_1(x)$ 는 인수 x 를 갖는 1 중 1 차 베셀 함수 (Bessel function)이고, a 는 안테나의 Circular aperture 반지름이다. 또한 $k = 2\pi f/c$ 는 Wave number 이며, f 는 동작 주파수, c 는 진공에서의 빛의 속도, θ 는 단말과 빔의 보어사이트 간의 각도를 의미한다. 모든 빔의 송신 전력은 P_{tx} 로 동일하므로 Serving 빔의 수신 전력 S_u 은 다음 식과 같이 정의된다.

$$S_u = \frac{P_{tx} \cdot G_b(\theta_{s,u}) \cdot G_{ut}(\phi_{s,u})}{L_{s,u}} \quad (2)$$

또한, 동일 주파수 (Co-channel) 빔 집합 $I(u)$ 의 수신 전력 합으로 간섭 전력 I_u 를 정의하면 다음과 같다.

$$I_u = \sum_{i \in I(u)} \frac{P_{tx} \cdot G_b(\theta_{i,u}) \cdot G_{ut}(\phi_{i,u})}{L_{i,u}} \quad (3)$$

대역에 따른 위성 및 단말 측 파라미터는 각각 표 1 과 표 2 와 같이 설정하였다. 빔마다 10 개의 단말이 무작위로 분포된 상황을 가정하였으며, 각 단말의 안테나는 상방을 향하도록 설치되어 있다고 가정하였다.

실험의 검증을 위하여 3GPP 회의 보고서인 R1-1913404[3]의 DL calibration 결과를 사용하였다. 그림 2 는 Ka-band, 그림 3 은 S-band 에서 산출된 CL, SIR, SINR 의 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 레퍼런스와 비교한 결과를 나타낸다. 제안한 SLS 는 레퍼런스와 유사한 분포 형태를 보였으며 특히 분포의 중앙값 부근에서 레퍼런스 범위 내에 위치함을 확인하였다. 이는 본 시뮬레이터가 빔 레이아웃 설계, 빔 이득, 및 동일 주파수 간섭의 합산 등 물리계층의 핵심 모델링 요소를 적절히 반영함으로써, 3GPP 표준 기반 시스템 레벨 시뮬레이터(SLS)의 특성을 충실히 재현하고 있음을 시사한다.

III. 결론

본 연구에서는 3GPP TR 38.811 및 TR 38.821 에서 제시된 가정 및 파라미터들을 기반으로 저궤도 위성 DL

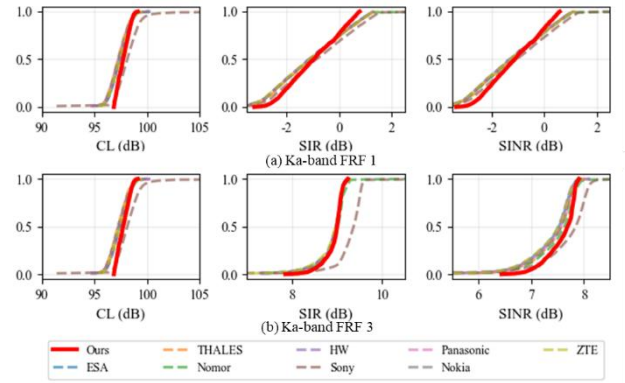


그림 2. Ka-band 검증 결과: (a) FRF 1, (b) FRF 3

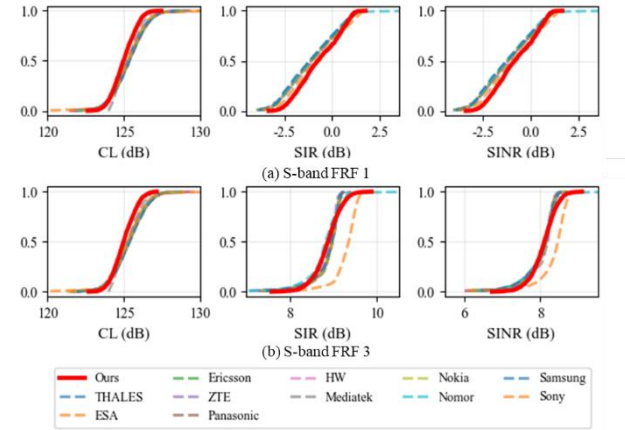


그림 3. S-band 검증 결과: (a) FRF 1, (b) FRF 3

SLS 를 구현하고, CL, SIR, SINR 의 CDF 를 도출하였다. 도출된 분포는 공개된 레퍼런스 결과와의 비교를 통해 전반적인 분포 형상과 수준이 유사함이 확인되었으며, 이를 바탕으로 구현된 시뮬레이터의 타당성을 검증하였다. 본 SLS 는 주파수 재사용 및 다중 스폿빔 환경에서의 동일 주파수 간섭을 반영한 기초 NTN 시스템 모델로서, 본 연구에서 확인한 성능 지표는 향후 알고리즘 및 시스템 설계 개선 연구를 위한 Baseline 으로 활용될 수 있다. 또한 검증된 SLS 를 기반으로 빔 운용 전략 및 자원 할당 정책 등 LEO 위성 시스템의 고도화 연구를 신뢰성 있게 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00335012).

참 고 문 헌

- [1] 3GPP, "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks," 3GPP TR 38.811, v15.4.0, Oct. 2020 (Release 15).
- [2] 3GPP, "Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN)," 3GPP TR 38.821, v16.2.0, Apr. 2023 (Release 16).
- [3] 3GPP TSG RAN WG1, "System Level Calibration Results for NTN on DL transmissions," 3GPP TDoc R1-1913404, RAN1#99, Reno, NV, USA, Nov. 18-22, 2019.