

저궤도 위성 특성에 따른 CSI 성능 분석

문태한, 이재영, 이재열*, 안유정, 이종태, 김재현**

아주대학교 AI융합네트워크학과, 아주대학교 우주전자정보공학과*, 아주대학교 전자공학과**

{ansxogks3, dlwdudd4865, *jaeyel98, dbwj5825, jtle830, **jkim}@ajou.ac.kr

CSI Performance Analysis in Low Earth Orbit Satellite Environments

Taehan Moon, Jaeyeong Lee, JaeYeol Lee*, Yujeong Ahn, Jongtae Lee, Jae-Hyun Kim**

Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University,

*Department of Space Electronics and Information Engineering, Ajou University,

**Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

요약

저궤도 위성 네트워크는 긴 전파 거리로 인한 전송 지연과 위성의 빠른 이동 속도로 인해 채널 상태가 빠르게 변화하는 특성을 갖는다. 이러한 특성은 채널 상태 정보(channel state information, CSI) 추정 및 피드백 과정에서 채널 노화(channel aging)가 발생하여 전반적인 시스템 처리를 저하가 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 저궤도 위성의 특성인 전파 지연, 도플러 천이에 따른 CSI 성능을 분석한다.

I. 서론

저궤도 위성(LEO, low Earth orbit)은 기존의 지상 셀룰러 네트워크의 커버리지를 보완하고 전 지구적 연결성을 제공하는 핵심 인프라로 주목받고 있다. 그러나 저궤도 위성은 긴 전파 거리로 인한 전송 지연과 위성의 빠른 이동으로 인해 채널 상태 정보(CSI, channel state information)의 신뢰성이 저하될 수 있으며, 이는 전반적인 시스템 처리를 저하로 이어질 수 있다. 최근에는 과거 CSI의 시간적 패턴을 학습하여 미래 CSI를 예측하는 AI(Artificial Intelligence) 기반 예측 기법이 활발히 연구되고 있다 [1]. 하지만 대한민국 환경에서 저궤도 위성 통신 시스템의 CSI 성능 분석 연구는 부족하다. 따라서, 본 논문에서는 대한민국 환경에서 저궤도 위성의 특성인 전파 지연 및 도플러 천이에 따른 CSI 성능을 분석한다. 또한, 채널 노화(channel aging)에 따른 시스템 처리를 저하를 분석한다.

II. 시스템 모델 설계

본 논문에서는 대한민국 상공에서 다중 빔을 방사하는 저궤도 위성 시스템을 고려한다. 저궤도 위성은 $\mathbf{S} = \{s | s = 1, 2, \dots, S\}$ 으로 구성된다. 대한민국 내의 기지국들은 $\mathbf{G} = \{g | g = 1, 2, \dots, G\}$ 개로 구성되며, 저궤도 위성은 $\mathbf{T} = \{t | t = 1, 2, \dots, T\}$ 시간 동안 대한민국 내 기지국에게 통신 서비스를 제공한다. 시간 t 에서 저궤도 위성 s 와 기지국 g 간 고도각 $\theta_g^s(t)$ 이 최소 고도각 θ_{\min} 을 넘으면 하향 링크가 형성된다. 그림 1은 저궤도 위성 s 와 기지국 g 사이의 CSI 피드백 절차를 나타낸다. 저궤도 위성 s 는 시간 t_1 에서 CSI-RS(CSI-Reference Signal)를 송신하고, 기지국 g 은 이를 기반으로 CSI를 추정한 후 피드백을 전송한다. 그러나 저궤도 위성 s 가 시간 t_2 에 이동함에 따라 기지국 g 의 피드백 정보는 실제 채널과 불일치하게 되며, 이로 인해 채널 노화가 발생한다. 이때, 기지국 g 가 저궤도 위성 s 에게 수신한 신호 y_g^s 는 아래와 같다.

$$y_g^s = \mathbf{H}_g^s \mathbf{x}_g^s + n_g, \quad (1)$$

\mathbf{H}_g^s 는 저궤도 위성 s 와 기지국 g 간의 채널을 의미하며, 자유공간 경로

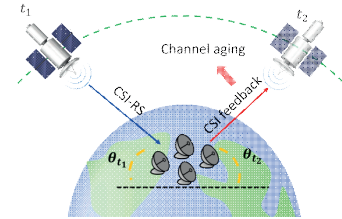


그림 1. CSI feedback 시스템 모델

손실, 음영 효과, 기타 fading 요소를 포함한다. \mathbf{x}_g^s 는 저궤도 위성 s 가 기지국 g 로 전송된 송신 신호, n_g 는 AWGN(additive white gaussian noise)을 의미한다. 시간 t 에서 저궤도 위성 s 와 기지국 g 간의 하향 링크 신호 세기를 측정하기 위해, SINR(signal-to-interference plus noise ratio)은 아래와 같이 정의한다.

$$SINR_g^s(t) = \frac{|\mathbf{H}_g^s(t)|^2 P_g^s}{\sum_{\substack{m \neq g \\ m=1}}^G |\mathbf{H}_m^s(t)|^2 P_g^s + N_0}, \quad (2)$$

P_g^s 는 저궤도 위성 s 으로부터 기지국 g 간의 송신 전력, N_0 은 잡음 전력을 의미한다. 시간 t 에서 저궤도 위성 s 와 기지국 g 간의 데이터 전송률 C_g^s 는 아래와 같이 정의한다.

$$C_g^s(t) = B \log_2(1 + SINR_g^s(t)), \quad (3)$$

B 는 대역폭을 나타낸다. 저궤도 위성 s 가 기지국 g 에게 CSI feedback을 받는 과정에서, 저궤도 위성 s 와 기지국 g 간의 거리 d_g^s 로 인해 지연이 발생한다. 이때 지연은 전파 지연만 고려하고, 아래와 같이 정의한다.

$$r_g^s = \frac{2d_g^s}{c}, \quad (4)$$

r_g^s 는 d_g^s 에 의한 왕복 지연 시간(RTT, round trip time)을 의미한다. 저궤

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Values
S	1
G	19
θ_{\min}	30°
h_0	600 km
Inclination	43°
Carrier frequency	2 GHz
Tx antenna gain	30 dBi
Effective Isotropically Radiated Power	48.8 dBW
UE antenna gain	0 dBi
Bandwidth	30 MHz
Subcarrier spacing	30 kHz
CSI period	2, 4, 5, 8, 10 ms

도 위성의 빠른 이동으로 인하여, 저궤도 위성 s 와 기지국 g 간의 도플러 천이 f_g^s 가 발생한다. 도플러 천이는 채널 변화 속도에 영향을 주며, 채널 유효시간(coherence time) τ_c 은 아래와 같이 정의된다.

$$\tau_c \approx \frac{0.423}{|f_g^s|}, \quad (5)$$

CSI 보고에 따라 저궤도 위성 s 와 지상국 g 간의 SINR 갱신은 SINR 측정 시점 t 이후의 경과시간 Δt 와 전파 지연 r_g^s , 그리고 채널 유효시간 τ_c 과의 관계에 따라 아래와 같이 정의된다.

$$\text{SINR}_g^s(t + \Delta t) = \begin{cases} \text{SINR}_g^s(t), & \text{if } \Delta t < \min(\tau_c, r_g^s), \\ \text{SINR}_g^s(t + \Delta t), & \text{if } \Delta t \geq \min(\tau_c, r_g^s), \end{cases} \quad (6)$$

따라서, 본 논문에서는 위에서 제시한 SINR 갱신 모델을 기반으로, CSI 보고 주기에 따른 성능 변화를 분석하며, 갱신된 SINR 값을 토대로 데이터 전송률을 측정한다.

III. 시뮬레이션 구성 및 결과

본 논문에서는 3GPP(3rd generation partnership project) 문서를 기반으로 저궤도 위성 파라미터를 설정한다 [2]. 저궤도 위성의 각 빔은 단일 기지국에게 하향 링크를 형성한다. 대한민국 내의 기지국 배치는 중심 기지국을 기준으로 $25\sqrt{3}$ km 간격으로 18개의 간접 기지국들을 육각형 형태로 배치한다. 중심 기지국의 CSI report 주기는 3GPP 문서에서 정의된 주기를 기준으로 설정한다 [3]. 저궤도 위성은 기지국에서 보고된 CSI 정보를 활용하여 하향 링크의 SINR을 주기적으로 갱신한다. 표 1은 시뮬레이터에서 사용한 파라미터를 나타낸다.

그림 2는 저궤도 위성 시스템에서 도플러 천이와 RTT의 특성을 보여준다. 그림 2-(a)는 시간에 따른 도플러 천이 변화를 나타낸다. 저궤도 위성 과 기지국 간의 최소 고도각에서 도플러 천이는 26.61 kHz가 발생한다. 이에 따라 채널 유효시간은 $15.89 \mu\text{s}$ 로 측정되며, 도플러 천이로 인해 채널 상태가 실시간으로 빠르게 변화하면서 CSI 정보가 실제 채널과 불일치하는 문제가 발생한다. 그림 2-(b)는 고도각에 따른 RTT 변화를 나타낸다. 저궤도 위성 과 기지국 간의 고도각이 작을수록 저궤도 위성 과 기지국 간의 거리가 증가하며, 이에 따라 전파 지연이 증가한다. 고도각이 30°일 때 RTT는 7 ms가 측정되며, 90°에서는 4 ms가 측정된다. 이러한 RTT는 CSI가 활용되는 시점까지의 지연을 의미하며, 채널 유효시간보다 RTT가 길어질 경우, CSI는 채널 상태를 정확히 반영하지 못한다. 결과적으로 도플러 천이와 전파 지연은 CSI의 정확도와 유효시간을 감소시키며, 이는 저궤도 위성 시스템의 데이터 처리를 감소를 발생시킨다.

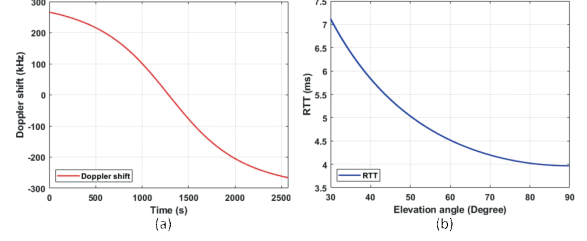


그림 2. 저궤도 위성 특성: (a) 도플러 천이, (b) RTT

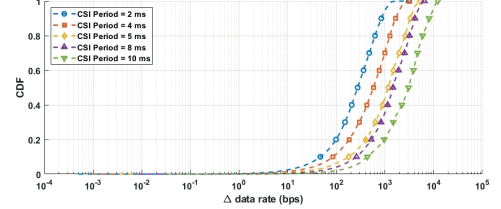


그림 3. CSI 주기에 따른 데이터 전송률 오차

그림 3은 CSI 주기에 따른 데이터 전송률 오차를 나타낸다. 최소 오차는 2 ms 주기에서 발생하며, 최대 오차는 10 ms 주기에서 발생하였다. CSI 주기가 길어질수록 채널 노화의 영향이 커져 데이터 전송률의 정확성이 저하되는 경향을 보인다. 하지만 CSI 주기가 짧아질수록 CSI를 빈번히 처리함에 따라, 오버헤드가 증가하는 단점이 발생한다. 그러나 CSI 주기가 10 ms에서 최대 오차는 12.24 kbps가 발생함에 따라, 저궤도 위성 환경에서는 CSI 주기를 상대적으로 길게 설정하고, 이에 따른 오버헤드를 최소화하는 방안이 적합할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 대한민국 환경에서 저궤도 위성 통신 시스템에서의 CSI 성능 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 고도각에 따른 RTT, 도플러 천이를 분석하였다. 또한, CSI 보고 주기에 따른 데이터 전송률의 오차를 측정하였다. 시뮬레이션 결과, CSI 주기가 짧을수록 데이터 전송률의 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 주기가 짧아질수록 저궤도 위성 통신 시스템에서는 오버헤드가 증가하는 trade-off가 발생한다. 따라서 저궤도 위성 환경을 고려하여 CSI 주기를 길게 설정하고 오버헤드를 최소화하는 방안도 고려해야 한다. 향후 연구에서는 AI를 활용하여 저궤도 위성 통신 환경에 최적화된 CSI 예측 알고리즘을 개발하는 연구를 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2022-II220704, 초고속 이동체 지원을 위한 3-D NET 핵심 기술 개발)

참고 문헌

- [1] Y. Zhang, et al., "Deep Learning-Based Channel Prediction for LEO Satellite Massive MIMO Communication System," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 8, pp. 1835-1839, Aug. 2021.
- [2] 3GPP TR 38.821 v16.2.0, "Solution for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16)," Mar. 2023.
- [3] 3GPP TS 38.331 v18.5.1, "5G; NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 18)," Apr. 2025.