

저궤도 위성 네트워크를 위한 분산형 STBC 기반 하향링크 NOMA 시스템

이 기 훈*, 정 방 철°

Distributed STBC-Based Downlink NOMA System for LEO Satellite Networks

Ki-Hun Lee*, Bang Chul Jung°

요 약

본 논문에서는 저궤도(low-Earth orbit: LEO) 위성 네트워크를 위한 분산형 시공간 블록 부호(space-time block code: STBC) 기반 하향링크 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA) 시스템을 제안한다. 각 위성은 여러 지상 단말에 대한 신호를 중첩한 후 분산형 STBC를 통해 전송한다. 또한, 각 지상 단말은 STBC 복호 절차를 수행한 후, 순차적 간섭 제거(successive interference cancellation: SIC) 검파를 통해 자신의 신호를 검출한다. 모의실험 결과는 위성 간 네트워크 정보 공유 없이 기존 단일 위성 NOMA 시스템에 비해 대폭 향상된 비트 오류율(bit error rate: BER) 성능을 달성함을 검증했다.

Key Words : low-Earth orbit (LEO) satellite, co-operative communication, distributed space-time block code (STBC), non-orthogonal multiple access (NOMA)

ABSTRACT

We propose a distributed space-time block code

(STBC)-based downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) system for low-Earth orbit (LEO) satellite networks. In the proposed framework, each satellite superposes multiple ground users' signals and transmits them using distributed STBC. Each user then performs conventional STBC decoding followed by successive interference cancellation (SIC) to recover its signals. Simulation results demonstrate that the proposed system achieves significantly improved bit error rate (BER) performance compared with existing NOMA systems even without network information exchange among satellites.

1. 서 론

범지구적 초연결성과 기존 지상망과 연계하여 향상된 통신 인프라를 제공하기 위해 비지상 네트워크(non-terrestrial networks: NTN), 특히 저궤도(low-Earth orbit: LEO) 위성 기반의 비지상 네트워크가 6세대 이동통신(6G) 핵심 기술로 주목받고 있다. 3GPP는 Release-16 이후 NR-NTN 지원을 위한 표준화를 지속적으로 추진하고 있으며, 학계와 산업체에서도 저궤도 위성 네트워크를 중심으로 한 다양한 기술이 활발히 연구되고 있다^[1,2].

비직교 다중접속(non-orthogonal multiple access: NOMA)은 다수의 단말이 동일한 자원 블록을 공유하여 신호를 송수신함으로써 스펙트럼 효율을 대폭 향상할 수 있는 기술로, 이론적 분석과 응용 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 최근에는 위성 통신에 NOMA를 접목하여 전송 용량, 저지연 및 연결성을 향상하기 위한 연구가 제안되고 있다^[3,4]. 그러나, 대부분의 문헌에서는 단일 위성 기반의 시나리오를 고려하고 있으며, 다중 위성을 고려하는 경우에는 위성 간 협력 통신을 위한 중앙집중형(centralized) 최적화가 요구되는 한계가 있다.

즉, 다중 위성 기반 네트워크에서 위성 간 정보 공유에 따른 부하를 줄이면서 분산형 협력을 통해 성능을 향상할 수 있는 효율적인 전송 기술이 요구된다. 이에 따라, 본 논문에서는 다중 저궤도 위성 기반 네트워크

* 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(RS-2024-00396992, 저궤도 위성통신 핵심 기술 기반 큐브 위성 개발) 및 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2026-RS-2024-00436406)을 받아 수행되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-0415-5603) Department of Electronics and Information Engineering, Korea University, kihunlee@korea.ac.kr, 조교수, 정회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4485-9592) Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, bcjung@ajou.ac.kr, 정교수, 종신회원

논문번호 : 202511-307-B-LU, Received November 13, 2025; Revised November 22, 2025; Accepted November 22, 2025

의 신뢰성 및 주파수 효율 성능 향상을 위한 분산형 시공간 블록 부호(space-time block code: STBC) 기반 NOMA 시스템을 제안한다. 본 논문의 주요 기여는 다음과 같다:

- (i) 다중 위성 기반 하향링크 네트워크에서 분산형 STBC 기반 NOMA 시스템을 제안한다. 이는 위성 간 링크를 통한 정보 공유나 중앙집중형 처리 과정 없이, 각 위성이 단말 신호를 중첩한 뒤 분산형 시공간 부호를 구성하여 송신하는 구조를 갖는다.
- (ii) 지상 단말은 기존 STBC 수신 과정과 동일한 등가 채널 추정 및 복호 절차를 수행한 후, 기존 전력 도메인 NOMA와 동일한 순차적 간섭 제거(successive interference cancellation: SIC)를 통해 자신의 신호를 검출한다. 이에 따라 단말 측에서 수신기 구조 변경은 요구되지 않는다.
- (iii) 모의실험을 통해 제안한 시스템이 단일 위성 기반 NOMA 대비 우수한 비트 오류율(bit error rate: BER) 성능을 보임을 확인하며, 특히 높은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR) 영역에서는 직교 다중 접속 방식보다도 향상된 오류율 성능을 달성함을 검증한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 파라볼라 안테나를 탑재한 N 개의 저궤도 위성(satellite: Sat)이 단일 안테나를 가진 K 개 지상 단말(user equipment: UE)에 신호를 전송하는 위성 기반 하향링크 네트워크를 고려한다. 일 반성을 잃지 않고, 지표면의 특정 지점을 원점(0,0,0)으로 설정하며, 각 위성은 고도 H km 및 원점을 기준으로 고도각 θ rad과 방위각 $2\pi(n-1)/N$ ($n \in \{1, \dots, N\}$) rad에 위치하여, 원점으로 지향하는 빔을 통해 단말을 서비스한다고 가정한다. 또한, 각 단말은 해당 빔의 커버리지 영역(footprint) 내에 분포하는 토폴로지를 고려한다.

한편, n 번째 위성에서 k ($\in \{1, 2, \dots, K\}$)번째 단말까지의 무선 채널은 다음과 같이 표현된다^{2,5)}:

$$h_{k,n} = \sqrt{\beta_{k,n}} \tilde{h}_{k,n}, \quad (1)$$

여기서 $\beta_{k,n}$ 은 거리 및 반송파 주파수에 따른 자유공간 경로 손실, 송수신 안테나 이득, 대기 및 환경 감쇠 등을 포함한 대규모 페이딩을 나타낸다. 또한, $\tilde{h}_{k,n}$ 은 소규모

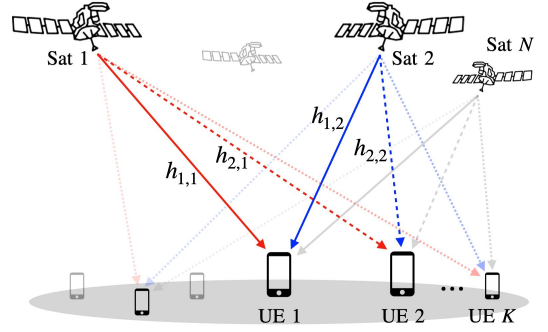


그림 1. 분산형 저궤도 위성 네트워크 시스템 모델
Fig. 1. System model of distributed LEO network

페이딩 채널을 나타내며, 모든 채널은 서로 독립이고 동일한 쉐도우 라이스안(shadowed Rician: SR) 페이딩 모델을 따른다고 가정한다. 즉, $\tilde{h}_{k,n} \sim \text{SR}(b, m, \Omega)$ 이며, 여기서 (b, m, Ω) 는 쉐도우 라이스안 파라미터를 나타낸다.

모든 저궤도 위성은 중계형(transparent) 위성을 고려하며, N 개의 위성은 지상국 또는 다른 송신원으로부터 동일한 공통 신호를 수신하여 지상 단말로 증폭 후 전달한다. 이때, 모든 위성은 오류 없이 신호를 복호한 것으로 가정한다. 아울러, 분산형 전송을 위해 모든 위성은 지상국 또는 위성 항법 시스템의 신호를 이용해 동일한 송신 슬롯을 맞추며, 이러한 슬롯 단위 거친(coarse) 동기화 하에서 신호를 전송하는 것으로 가정한다⁶⁾.

III. 분산형 STBC 기반 NOMA 시스템

앞 절에서 정의한 시스템 모델을 기반으로, 분산형 STBC 기반 비직교 다중 접속(Distributed STBC NOMA) 시스템을 제안한다. 본 논문에서는 시공간 블록 부호로 Alamouti 코드를 이용하며, 이에 따라 각 지상 단말에 두 개의 연속적인 정규화된 변조 신호 $(x_{k,1}, x_{k,2})$ 를 전송하는 시나리오를 고려한다.

각 위성은 분산형 시공간 부호를 통해 K 개 지상 단말에게 전송할 신호를 중첩하여 전송한다. 이에 따라, k 번째 단말로 두 시간 슬롯 동안 수신되는 신호 $y_{k,t}$ ($t \in \{1, 2\}$)는 다음과 같이 주어진다⁷⁾:

$$\begin{bmatrix} y_{k,1} \\ y_{k,2} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \sqrt{P_n} h_{k,n} B(\mathbf{s}) \mathbf{r}_n + \mathbf{n}_k, \quad (2)$$

여기서 P_n 은 n 번째 저궤도 위성의 송신 전력이며, 모든

위성은 동일한 송신 전력 $P_n = P_{\text{sat}}/N, \forall n$ 을 사용한

다고 가정한다. 한편, $B(\mathbf{s}) = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2 & s_1 \end{bmatrix}$ 는 Alamouti 코

드 행렬을 나타내며, $\mathbf{s} = [s_1, s_2]^T$ 는 각 위성이 두 시간

슬롯 동안 전송할 공통 신호를 나타낸다. 즉,

$s_t = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} x_{k,t}$ ($\mathbb{E}[|s_t|^2] = 1$)는 K 개 지상 단말 신호가

중첩된 신호이며, 여기서 P_k 는 k 번째 단말의 변조 신호

에 할당된 전력을 의미한다. 또한, $\mathbf{r}_n = [r_{n,1}, r_{n,2}]^T$ 은

시공간 블록 부호의 분산형 전송을 위한 n 번째 위성의

기호(signature) 벡터를 나타내며, 이는 단위 복소 초구

(hypersphere)의 표면에서 독립적으로 균등분포에 따

라 선택된다^[7, (5)]. 마지막 항 $\mathbf{n}_k$ 는 복소 가우시안

$\mathcal{CN}(\mathbf{0}, N_0 \mathbf{I}_2)$ 분포를 따르는 잡음 벡터를 의미한다.

각 지상 단말은 우선 (2)의 수신 신호로부터 STBC

복호를 수행한다. 구체적으로, k 번째 단말에 대한

STBC 복호 신호는 다음과 같이 주어진다:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{y}_{k,1} \\ \bar{y}_{k,2} \end{bmatrix} &= \frac{1}{\|\hat{\mathbf{h}}_k\|} \begin{bmatrix} \hat{h}_{k,1}^* & \hat{h}_{k,2} \\ \hat{h}_{k,2}^* & -\hat{h}_{k,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{k,1} \\ y_{k,2} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{P_{\text{sat}}}{N}} \|\hat{\mathbf{h}}_k\| \mathbf{s} + \tilde{\mathbf{n}}_k \\ &= \sqrt{\frac{P_{\text{sat}}}{N}} \|\hat{\mathbf{h}}_k\| \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \begin{bmatrix} x_{k,1} \\ x_{k,2} \end{bmatrix} + \tilde{\mathbf{n}}_k, \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\hat{\mathbf{h}}_k = [\hat{h}_{k,1}, \hat{h}_{k,2}]^T$ 는 분산형 STBC 신호 수신 과

정에서 k 번째 단말의 등가 채널 벡터를 나타내며,

$\hat{h}_{k,t} = \sum_{n=1}^N r_{n,t} h_{k,n}$ 이다. 단위 벡터가 곱해지므로 $\tilde{\mathbf{n}}_k$ 는

여전히 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, N_0 \mathbf{I}_2)$ 분포를 따른다. 최종적으로, 단말

은 중첩된 신호로부터 순차적 간섭 제거(successive

interference cancellation: SIC)를 수행하여 자신의 신

호를 복원한다. 이때, SIC 검파 순서는 기존 NOMA와

동일하게 각 단말에 할당된 전력의 상대적 크기를 기준

으로 결정된다. 구체적으로, 각 단말은 더 높은 전력이

할당된 단말 신호를 우선적으로 검출하고 제거한 뒤,

잔여 성분으로부터 자신의 신호를 복호한다.

즉, 다수의 위성이 분산형 STBC를 통해 신호를 송신

하지만, 각 단말은 기존 STBC 수신기와 동일한 방식으

로 등가 채널을 추정한 뒤 STBC 복호를 수행하여 신호

를 획득할 수 있다^[7]. 이후 복호된 신호에 대해 기존

NOMA와 동일한 SIC 검파를 적용하여 단말별 신호를

복원할 수 있으므로, 전체 수신 복잡도는 종래 단일 송

신기 기반 STBC NOMA 시스템과 동일하다^[8].

IV. 모의실험 결과

그림 2는 본 논문에서 제안한 분산형 STBC NOMA 시스템의 각 지상 단말에 대한 비부호화(uncoded) 비트 오류율(bit error rate: BER) 모의실험 결과를 나타낸다. 제안한 시스템의 기본적인 성능을 검증하기 위해, 두 지상 단말에게 직교 위상 편이 변조(quadrature phase shift keying: QPSK) 신호를 전송하는 시나리오를 고려했다. 섀도우 라이시안 파라미터 $\{b, m, \Omega\}$ 는 heavy shadowing 환경을 가정하여 각각 $\{0.063, 0.739, 0.000897\}$ 로 정의했다^[9].

한편, 지상 네트워크에서의 전력 도메인 NOMA는 기지국과 단말들 간 거리 편차가 충분히 크기 때문에, 각 단말의 전력 비율을 거리 기반으로 할당할 수 있다. 그러나 위성 기반 네트워크에서는 위성으로부터 각 단말까지의 거리가 거의 유사하여, 대규모 페이딩에 의한 채널 이득 차이가 근소하다. 즉, 지상 네트워크의 NOMA처럼 전력을 할당할 경우, 단말별 전력이 거의 동일하게 배분된다. 이 경우 중첩 신호의 성상은 최소 거리가 매우 작아지는 특성을 가지며, 이는 SIC 검파 성능을 크게 저하시키는 요인이 된다. 따라서 본 논문에서는 각 위성이 두 단말의 신호를 16-QAM 성상 형태로 중첩하여 전송한다($P_1 = 2P_2$). 또한, 모의실험에서는 소규모 페이딩만을 고려했다($\beta_{k,n} = 1$).

제안한 분산형 STBC NOMA 시스템의 성능을 기존 단일 위성 기반 NOMA (NOMA, $N=1$) 및 직교 다중

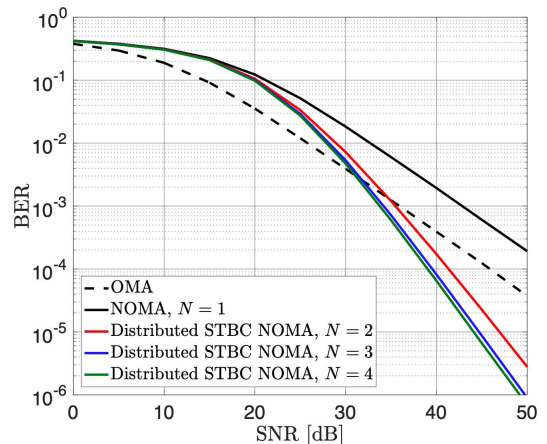


그림 2. 제안한 분산형 STBC NOMA 시스템의 BER 모의 실험 결과

Fig. 2. BER performance simulation results of the proposed distributed STBC NOMA system

접속(orthogonal multiple access: OMA) 시스템과 비교했다. 공정한 비교를 위해 각 위성의 송신 전력은 전체 위성의 수로 정규화했다. 이에 따라, 기존 NOMA와 OMA의 경우, 위성 수와 관계없이 동일한 성능을 나타낸다. 결론적으로, 제안한 분산형 STBC NOMA 시스템은 네트워크 내 위성 간 정보 공유 없이도 기존 NOMA 대비 대폭 향상된 BER 성능을 달성함을 보인다. 특히, 높은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR) 구간에서는 직교 다중 접속보다도 낮은 BER을 달성할 수 있음을 확인했다.

한편, 모의실험 결과는 일반적으로 고려되는 SNR 구간인 약 0-30 dB에서 다소 높은 오류율을 보이지만, 실제 위성 통신 시스템에서는 높은 이득의 지향성 안테나 사용으로 본 모의실험 조건보다 높은 수신 SNR을 확보할 수 있으며, 채널 부호화를 적용할 경우 유효 BER을 더욱 낮출 수 있다. 따라서 그림 2의 핵심은 절대적 링크 성능보다, 동일한 전력 및 성상 조건에서 분산형 STBC 적용 시 단일 위성 대비 확보되는 상대적 성능 이득에 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 저궤도 위성 기반 하향링크 네트워크의 신뢰성과 주파수 효율을 동시에 향상하기 위한 분산형 STBC 기반 NOMA 시스템을 제안했다. 각 위성은 지상 단말들의 변조 신호가 중첩된 신호를 분산형 STBC를 통해 독립적으로 전송하며, 단말은 기존 STBC 복호를 수행한 후 SIC 검파를 통해 자신의 신호를 검출한다. 모의실험 결과, 기존 단일 위성 기반 NOMA 대비 우수한 BER 성능을 보이며, 높은 SNR 구간에서는 OMA 보다도 낮은 BER을 달성함을 검증했다. 향후 연구에서는 제안한 분산형 STBC NOMA 시스템을 협력 위성 수 및 STBC 차수에 대해 일반화하고, 이론적 분석을 통해 해당 파라미터에 대한 성능 특성을 규명할 예정이다. 아울러, 이를 기반으로 최적의 중첩 단말 수와 중첩 신호 성상을 설계하고자 한다.

References

- [1] Z. Xiao, et al., "LEO satellite access network (LEO-SAN) toward 6G: Challenges and approaches," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 89-96, Apr. 2024.
- [2] Y. J. Han, K.-H. Lee, and B. C. Jung, "Opportunistic uplink NORA for LEO satellite-based IoT networks," *J. KICS*, vol. 50, no. 9, pp. 1405-1408, Sep. 2025.
- [3] X. Zhang, et al., "Relay-satellite-assisted LEO constellation NOMA communication system," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 61, no. 1, pp. 995-1011, Feb. 2025.
- [4] R. Liu, K. Guo, X. Li, et al., "RIS-empowered satellite-aerial-terrestrial networks with PD-NOMA," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 26, no. 4, pp. 2258-2289, 4th Quart. 2024.
- [5] E. Kim, I. P. Roberts, and J. G. Andrews, "Downlink analysis and evaluation of multi-beam LEO satellite communication in shadowed Rician channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 2, pp. 2061-2075, Feb. 2024.
- [6] X. Li, "Space-time coded multi-transmission among distributed transmitters without perfect synchronization," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 948-951, Dec. 2004.
- [7] K.-H. Lee, H. Lee, J. Choi, S. Park, and B. C. Jung, "Distributed space-time block coding for barrage relay networks," in *Proc. IEEE Military Commun. Conf.*, pp. 292-297, Boston, MA, USA, Oct. 2023.
- [8] M. Toka and O. Kucur, "Non-orthogonal multiple access with Alamouti space-time block coding," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 9, pp. 1954-1957, Sep. 2018.