

다중 LEO 위성통신 환경에서 하향링크 NOMA 시스템용 다중안테나 수신기법

이유진, 염정선, 정방철
충남대학교 전자공학과

leeuj@o.cnu.ac.kr, jsyeom@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

1. 서론

6G 이동 통신의 핵심 인프라 중 하나인 저궤도 (low earth orbit) 위성 네트워크는 글로벌 커버리지 및 저지연성 등의 장점이 있기 때문에 최근 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 비직교 다중 전송 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 기술은 주파수 효율성을 향상시키기 위한 기술로 알려져 있으며 [2,3] 저궤도 위성 통신 시스템에서는 위성이 지상 단말에게 신호를 전송하는 하향링크 시스템에서 동일 빔에 존재하는 단말들에게 동일 무선 자원을 할당함으로써 NOMA 기술이 사용될 수 있다[4]. [4]에서 서로 다른 직교 주파수를 사용하는 두 개의 위성으로부터 동시에 서로 다른 NOMA 신호를 수신하는 단말이 존재하는 시스템을 고려하였다. 또한, 두 개의 주파수로 수신한 신호 중 신호대 잡음비 (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)가 더 큰 신호를 선택하는 선택적 결합 (selective combining, SC) 기법을 사용하였다. 하지만 독립된 다중 채널 시스템에서 SINR을 최대화하는 기법은 최소 평균제곱오차 (minimum mean square error, MMSE)이므로 본 논문에서는 단말에서 MMSE 수신 빔포밍을 고려한다.

2. 시스템 모델

본 논문에서는 2 개의 저궤도 위성과 N 개의 안테나를 갖는 3 개의 지상 단말이 존재하는 하향링크 시스템을 고려한다. 이 때, 단말 1과 2는 각각 위성 1과 2의 빔 중앙 근처에 위치하여 신호를 수신한다. 한편, 단말 c 는 위성 1과 위성 2의 빔이 교차되는 빔 가장자리에 위치한다고 가정한다. 본 시스템에서 NOMA 기술을 적용하여 위성 i ($i \in \{1,2\}$)는 단말 i 의 신호 x_i 와 단말 c 의 신호 x_c 를 중첩하여 전송한다. 단말 1과 2는 일반적인 하향링크 시스템의 수신기이므로 본 논문에서는 단말 c 의 복호화만 고려한다. 두 개의 직교 주파수에 의한 단말 c 의 수신 신호 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{P_{L_1} \alpha_1} \mathbf{h}_1 \\ \sqrt{P_{L_2} \alpha_2} \mathbf{h}_2 \end{bmatrix} x_c + \begin{bmatrix} \sqrt{P_{L_1} (1 - \alpha_1)} \mathbf{h}_1 & 0 \\ 0 & \sqrt{P_{L_2} (1 - \alpha_2)} \mathbf{h}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{n}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{y}_i \in \mathbb{C}^N$ ($i \in \{1,2\}$)는 위성 i 로부터 받은 수신 신호이다. 또한, P 는 두 위성의 전송 전력, α_i 는 x_c 에 대한 위성 i 의 전송 전력할당 계수이며 L_i 는 위성 i 로부터 단말 c 까지의 link budget을 의미한다[2]. 채널 벡터 $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^N$ 는 위성 i 로부터 단말 c 까지의 페이딩 채널로써 본 논문에서는 shadowed Rician 페이딩 채널 모델을 고려하므로 다음과 같이 채널이 주어지며

$$\mathbf{h}_i = \sqrt{k/(k+1)} \mathbf{h}_{\text{LOS},i} + \sqrt{1/(k+1)} \mathbf{h}_{\text{NLOS},i} \quad (2)$$

여기서 k 는 Rician factor이며 $\mathbf{h}_{\text{LOS},i}$ 는 가시선 (line-of-sight, LoS) 성분의 채널을 의미하며 Nakagami- m 페이딩 채널로 모델링되며 $\mathbf{h}_{\text{NLOS},i}$ 는 비가시선 (non-LoS, NLoS) 성분의 채널을 의미하며 Rayleigh 페이딩 채널로 모델링된다. 즉, $|\mathbf{h}_{\text{LOS},i}| \sim \text{Nakagami}(m, \Omega)$ 이며, $|\mathbf{h}_{\text{NLOS},i}| \sim \text{Rayleigh}(\sigma)$ 이다. 위성 i 가 전송하는 신호에 대한 가산 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise)은 $\mathbf{n}_i \in \mathbb{C}^N (\sim \mathcal{CN}(0, N_0 \mathbf{I}_N))$ 로 표현된다.

3. MMSE 수신 빔포밍

본 논문에서는 지상 단말 c 에서 SINR을 최대화하기 위해서 MMSE 수신 빔포밍 기법을 적용한다. 지상 단말 c 에서 지상 단말 c 의 신호에 대한 채널벡터를 $\mathbf{h}_c \triangleq [\sqrt{L_1} \alpha_1 \mathbf{h}_1 \quad \sqrt{L_2} \alpha_2 \mathbf{h}_2]$ 로 정의하고 단말 1과 2의 신호에 의한 간섭 채널 벡터를 각각 $\mathbf{h}_1 \triangleq$

$[\sqrt{L_1} (1 - \alpha_1) \mathbf{h}_1 \quad 0]$ 과 $\mathbf{h}_2 \triangleq [0 \quad \sqrt{L_2} (1 - \alpha_2) \mathbf{h}_2]$ 로 정의한다. 그러므로 MMSE 빔포밍 벡터 \mathbf{u} 와 수신단 SINR은 각각 다음과 같이 주어지며 여기서 \mathbf{R}_{12} 는 두 간섭 채널의 공분산 행렬을 의미한다.

$$\mathbf{u} = \frac{(N_0 \mathbf{I}_{2N} + \mathbf{R}_{12})^{-1} \mathbf{h}_c^H}{\| (N_0 \mathbf{I}_{2N} + \mathbf{R}_{12})^{-1} \mathbf{h}_c^H \|}, \text{SINR} = \frac{P |\mathbf{u}^H \mathbf{h}_c|}{\mathbf{u}^H (N_0 \mathbf{I}_{2N} + P \mathbf{R}_{12}) \mathbf{u}} \quad (3)$$

4. 모의실험 결과 및 결론

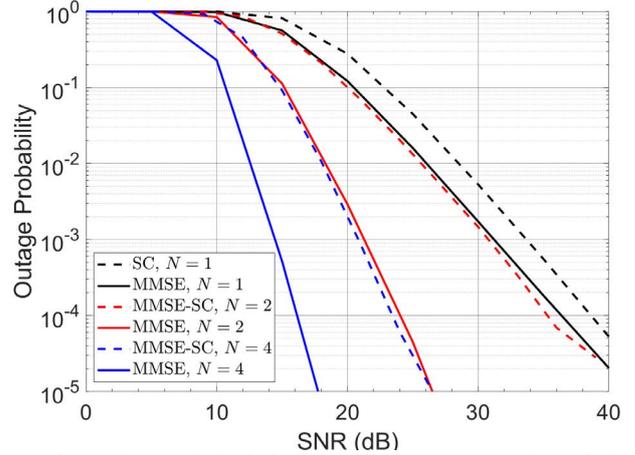


그림 1 다중 위성기반 하향링크 NOMA 시스템의 아웃티지 확률

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 다중 위성기반 하향링크 NOMA 시스템에서 기존 SC 기법과 본 논문에서 사용한 MMSE 수신 빔포밍 기법을 아웃티지 확률 측면에서 비교한다. 이때, $(k, m, \Omega) = (1, 1, 1)$, $(\alpha_1, \alpha_2) = (0.7, 0.6)$, $\sigma = \sqrt{1/2}$ 이다. SC 기법을 다중 안테나로 확장하기 위해 주파수 별 MMSE를 적용한 후 SINR이 더 큰 신호를 선택 (MMSE-SC)하여 복호화를 시도한다.

시뮬레이션 결과로부터 모든 전송 SNR 구간에서 안테나 개수에 상관없이 MMSE 수신 빔포밍 기법이 MMSE-SC 기법보다 성능이 월등함을 확인할 수 있다.

5. ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 및 한국연구재단의 지원(No. NRF-2022R111A3073740)을 받아 수행된 연구임.

6. 참고 문헌

- [1] X. Zhu and C. Jiang, "Integrated Satellite-Terrestrial Networks Toward 6G: Architectures, Applications, and Challenges," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 1, pp. 437-461, Jan., 2022.
- [2] J. S. Yeom, H. S. Jang, K. S. Ko, and B. C. Jung, "BER Performance of Uplink NOMA With Joint Maximum-Likelihood Detector," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 10295-10300, Oct. 2019.
- [3] J. S. Yeom, Y. -B. Kim, and B. C. Jung, "Spectrally Efficient Uplink Cooperative NOMA With Joint Decoding for Relay-Assisted IoT Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 1, pp. 210-223, Jan. 2023.
- [4] B. M. Elhalawany et al., "Outage Analysis of Coordinated NOMA Transmission for LEO Satellite Constellations," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 3, pp. 2195-2202, Nov. 2022.