

LEO 위성 네트워크에서 Cooperative NOMA 시스템을 위한 수신 빔포밍 기법

이유진, 염정선, 정방철
충남대학교

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

A Receive Beamforming Technique for Cooperative NOMA in LEO Satellite Networks

Yu-Jin Lee, Jeong Seon Yeom, and Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문은 다중 저궤도 (low earth orbit, LEO) 위성기반 하향링크 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access, NOMA) 시스템에서 두 개의 직교 채널을 통해 두 개의 신호를 각각 수신하는 수신기에서 최소 평균 제곱 오차(minimum mean square error, MMSE) 수신 빔포밍을 적용하는 기법을 고려한다. MMSE를 통해 간섭 신호를 백색화하므로 신호 대 간섭 잡음비(signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)를 최대화한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 기존 선택적 결합(selective combining, SC) 기법과 비교하여 동일 안테나 개수에서 월등한 비트 오류율 (bit-error rate) 성능을 보이며 안테나의 개수가 증가할수록 성능이 급격히 향상됨을 확인한다.

1. 서론

5G 이동 통신이 상용화되어있는 현 시점에서도 무선통신을 통한 정보 전달에 어려움을 겪는 지역이 존재한다. 이런 문제를 해결하기 위해 글로벌 커버리지를 지원하는 저궤도 (low earth orbit, LEO) 위성을 기반으로 6G 이동 통신에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 위성 통신의 주파수 효율성을 향상하기 위해서 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access, NOMA) 기술을 적용한 LEO 통신 기술이 활발히 연구되고 있다[3]. [3]에서는 서로 다른 직교 주파수를 사용하는 두 개의 위성으로부터 중첩된 신호를 동시에 수신하는 단일 안테나 수신기를 고려하였고 해당 수신기에서 두 신호 중 신호 대 간섭 잡음비(signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)가 더 높은 신호를 선택하는 선택적 결합(selective combining, SC) 기법과 연속 간섭 제거(successive interference cancellation, SIC) 기법이 사용되었다.

본 논문에서는 두 주파수로부터 수신된 신호의 채널을 고려하여 기존 SC기법 대비 더 높은 SINR을 얻을 수 있는 최소 평균 제곱 오차(minimum mean square error, MMSE) 기법을 고려한다. 또한, 시뮬레이션을 통해 수신기의 안테나 개수를 확장하여 기존 기법 대비 비트 오류율 (bit-error rate) 성능이 향상됨을 확인한다.

II. 시스템 모델 및 MMSE 기법

본 논문에서는 2개의 저궤도 위성과 N 개의 수신 안테나를 지닌 3개의 지상 단말이 하향링크를 통해 신호를 수신하는 시스템을 고려한다. 단말 1과 2는 각각 위성 1과 2가 서비스하는 빔 영역 중심 부근에 위치하며 단말 c는 위성 1과 위성 2의 빔이 교차되는 빔 가장자리에 위치한다고 가정한다.

본 시스템에서는 NOMA 기술을 적용하여 위성 $i(i \in \{1, 2\})$ 가 단말 i 의 신호 x_i 와 단말 c의 신호 x_c 를 중첩하여 전송한다. 본 논문에서는 두 개의 위성으로부터 신호를 수신하는 단말 c에 대해서만 고려한다. 두 개의 서로 다른 주파수로부터 신호를 수신하는 단말 c의 수신 신호 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{PL_1\alpha_1}\mathbf{h}_1 \\ \sqrt{PL_2\alpha_2}\mathbf{h}_2 \end{bmatrix} x_c + \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{PL_2\bar{\alpha}_2}\mathbf{h}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{n}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식에서 $\mathbf{y}_i \in \mathbb{C}^N$ 는 위성 i 로부터 수신된 신호 벡터, P 는 두 위성의 전송 전력이며, $\alpha_i (\in (0, 1))$ 는 x_c 에 대한 위성 i 의 전송 전력할당 계수이며, $\bar{\alpha}_i = 1 - \alpha_i$, L_i 는 위성 i 에서 단말 c사이 경로 손실 (path loss)를 의미한다. 채널 벡터 $\mathbf{h}_i (\in \mathbb{C}^N)$ 는 위성 i 와 단말 c사이의 shadowed rician 페이딩을 고려한 페이딩 채널이며 다음과 같이 주어진다.

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

위 식에서 k 는 rician factor, $\mathbf{h}_{LOS,i}$ 는 $|\mathbf{h}_{LOS,i}| \sim \text{Nakgami}(m, \Omega)$ 으로 Nakami- m 페이딩 채널로 모델링된 가시선 성분의 채널이며, $\mathbf{h}_{NLOS,i}$ 는 $|\mathbf{h}_{NLOS,i}| \sim \text{Rayleigh}(\sigma)$ 으로 Rayleigh 페이딩 채널로 모델링된 비가시선 성분의 채널이다. n_i 는 위성 i 으로부터 수신받은 신호에 대한 가산 백색 가우시안 잡음으로, $\mathbf{n}_i (\in \mathbb{C}^N) \sim \mathcal{CN}(0, N_0 \times \mathbf{I}_N)$ 이다.

지상의 단말에게 전송된 신호에서 간섭을 백색화 (whitening)하여 SINR을 최대화하는 MMSE 수신 빔포밍 기법을 적용한다. 신호를 수신받은 지상 단말 c에서 x_c 의 채널 벡터는 $\mathbf{h}_c := [\sqrt{L_1\alpha_1}\mathbf{h}_1^T \sqrt{L_2\alpha_2}\mathbf{h}_2^T]^T (\in \mathbb{C}^{2N})$ 이며, 단말 c에서 간섭으로 작용하는 단말 1과 단말 2에 의한간섭 채널 벡터는 각각 $\mathbf{h}_1 := [\sqrt{L_1(1-\alpha_1)}\mathbf{h}_1^T \mathbf{0}_N^T]^T$, $\mathbf{h}_2 := [\mathbf{0}_N^T \sqrt{L_2(1-\alpha_2)}\mathbf{h}_2^T]^T$ 이다. 수신 신호

호의 x_c 의 MMSE 빔포밍 벡터는 $\mathbf{w} = \frac{(N_0\mathbf{I}_{2N} + \mathbf{R}_{12})^{-1}\mathbf{h}_c^H}{\| (N_0\mathbf{I}_{2N} + \mathbf{R}_{12})^{-1}\mathbf{h}_c^H \|}$ 이며, 여기서, $\mathbf{R}_{12}$

는 간섭 채널의 공분산 행렬이다.

단말 c에서 수신된 신호벡터 $\mathbf{y}$ 와 자신의 신호 채널 $\mathbf{h}_c$ 에 각각 MMSE 빔포밍 벡터를 곱하여 얻어진 값을 각각 $\bar{y}$ 와 $\bar{h}_c$ 이라고 정의하며, 식으로 표현하면 $\bar{y} = \mathbf{w}^H \mathbf{y}$, $\bar{h}_c = \mathbf{w}^H \mathbf{h}_c$ 가 된다. MMSE 빔포밍 벡터가 적용된 수신 신호에는 간섭이 백색화되어 있으므로 기존 NOMA의 SIC기법을 사용하는 것이 아닌 최대우도 (maximum likelihood) 검파 방법을 적용하여 위성이 전송한 신호를 다음과 같이 검파한다.

$$\hat{x}_c = \underset{s_c \in \mathcal{X}}{\text{argmin}} \|\bar{y} - \bar{h}_c s_c\|^2, \quad (3)$$

여기서 $\mathcal{X}$ 는 송신 신호 x_c 와 동일한 변조 신호들의 집합이다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

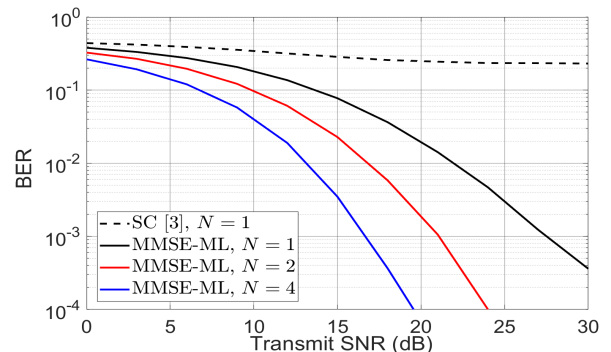


그림 1 다중 위성기반 하향링크 NOMA 시스템의 BER 성능 비교

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 다중 위성기반 하향링크 NOMA 시스템에서 제안하는 MMSE 기법과 기존 SC기법을 BER 측면에서 비교한다. 본 시뮬레이션은 $(k, m, \Omega) = (1, 1, 1)$, $(\alpha_1, \alpha_2) = (0.7, 0.6)$, $\sigma = 1/\sqrt{2}$ 으로 설정한다.

단일 안테나 시스템에서 제안하는 MMSE 빔포밍 기법이 기존 SC를 고려한 SIC 검파 기법과 비교하여 월등한 성능 향상을 보인다. 또한, 수신 안테나의 개수가 증가할수록 다이버시티 이득이 점차 증가하는 것을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정보(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (21-106-A00-007, 우주계층 지능통신망 특화연구실). 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2022R111A3073740).

참고 문헌

- [1] X. Lin et al., "On the Path to 6G: Embracing the Next Wave of Low Earth Orbit Satellite Access," *IEEE Commun.*, vol. 59, no. 12, pp. 36-42, Dec. 2021.
- [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] 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.