

Massive MISO 저궤도 위성 통신시스템에서 기계학습 기반 NOMA

강민정, 이정훈, 채승호*

한국의외국어대학교 전자공학과 및 응용통신연구센터, 한국공학대학교 전자공학부*

{love_minmin926, tantheta}@hufs.ac.kr, *shchae@tukorea.ac.kr

Machine Learning-Based NOMA in Massive MISO LEO Satellite Communication Systems

Min Jeong Kang, Jung Hoon Lee, and Seong Ho Chae*

Department of Electronics Engineering and Applied Communications Research Center,
Hankuk University of Foreign Studies,

*Department of Electronics Engineering, Tech University of Korea

요약

무선통신시스템에서 각 유저들에게 다중 안테나를 사용하여 비직교 다중 접속 (nonorthogonal multiple access, NOMA)으로 서비스할 경우, 최적의 복호 순서가 시스템 환경에 따라 유동적이게 변화하므로 최적의 복호 순서를 찾는 것은 중요한 요소 중 하나로 여겨진다. 그러나 유저 수가 증가할수록 최적의 복호 순서를 찾는 과정에 높은 계산 복잡도가 요구되어 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 massive multiple-input single-output (MISO) NOMA 저궤도 (low earth-orbit, LEO) 위성 통신시스템에서 기계학습 (machine learning, ML) 모델을 활용하여 낮은 복잡도로 최적의 복호 순서를 찾는 방법을 제안한다.

I. 서론

저궤도 (low earth-orbit, LEO) 위성 통신시스템은 다른 궤도에서 동작하는 위성 통신시스템에 비해 상대적으로 높은 데이터 전송률 (data rate)을 가져, 차세대 무선통신시스템에서 주목받는 기술 중 하나로 여겨진다 [1]. 특히, 다양한 빔포밍 (beamforming) 기법과 다중 안테나를 활용하여 LEO 위성 통신시스템의 데이터 전송률을 향상시키는 연구가 활발히 이루어지고 있다 [2], [3]. 또한 높은 이동성으로 인해 발생하는 채널 추정 오류를 기계학습 (machine learning, ML) 모델을 포함한 다양한 기법을 활용하여 보정하는 연구가 활발히 이루어지고 있다 [4], [5].

비직교 다중 접속 (nonorthogonal multiple access, NOMA)은 높은 주파수 효율을 가져 무선통신시스템에서 한정된 주파수 자원으로 인해 발생하는 여러가지 문제를 해결하는 주요한 기술 중 하나로 여겨진다. NOMA의 경우, 전송단이 중첩 코딩 (superposition coding, SC)을 사용하여 전송신호를 구성하므로 각 유저들은 순차적 간섭 제거 (successive interference cancellation, SIC)를 사용하여 자신의 신호를 복호한다. 이때, SIC 과정에서 사용되는 최적의 복호 순서는 single-input single-output (SISO) 시스템에서는 채널 이득 순서와 동일하지만, 다중 안테나를 사용하는 시스템에서는 빔포밍과 간섭으로 인해 유동적으로 변화한다. 그러므로 NOMA에서는 채널 상태에 적합한 복호 순서를 찾는 것이 중요한 문제 중 하나로 여겨진다. 이에 따라, 다중 안테나를 사용하는 시스템에서 최적의 복호 순서를 찾기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [6].

본 논문에서는 Massive MISO-NOMA LEO 위성 통신시스템에서 기계학습 모델을 활용하여 낮은 계산 복잡도로 총 데이터 전송률 (sum data rate)을 최대화하는 최적의 복호 순서를 찾는 기법을 제안한다. 이때, 제안하는 기법의 성능은 제안하는 기법으로 구한 복호 순서로부터 얻는 총 데이터 전송률과 반복적인

계산을 통해서 구한 복호 순서로부터 얻은 총 데이터 전송률을 비교하여 평가한다.

II. 본론

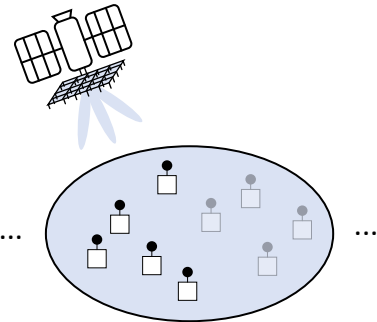


그림 1. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 나타낸다. 본 논문에서는 안테나 구조가 uniform planar array (UPA)이고, 총 $N_x \times N_y$ 개의 안테나를 갖는 위성이 서비스 범위 내에 존재하고 하나의 안테나를 갖는 K 명의 유저들에게 서비스하는 시스템을 고려한다. 여기서 N_x 와 N_y 는 각각 안테나의 x 축의 수와 y 축의 수를 의미한다. 그러므로 t 시점에서 반송파 주파수가 f 일 때, k 번째 유저가 위성으로부터 받은 신호 $y_k(t, f)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$y_k(t, f) = \mathbf{h}_k^\dagger(t, f)\mathbf{x}(t, f) + n_k(t, f), \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{h}_k(t, f) \in \mathbb{C}^{N_x N_y \times 1}$ 는 위성과 k 번째 유저 사이의 채널을 의미하며, $\|\mathbf{h}_1\|^2 \geq \dots \geq \|\mathbf{h}_K\|^2$ 를 만족한다고 가정한다. 또한 $\mathbf{x}(t, f) \in \mathbb{C}^{N_x N_y \times 1}$ 는 전송신호를 의미하고, $n_k(t, f) \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 노이즈를 의미한다. 이때, $\mathbf{h}_k(t, f)$ 는 line-of-

sight (LoS)와 non-line-of-sight (NLoS)로 표현되며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{h}_k(t, f) = \mathbf{h}_k^{\text{LoS}}(t, f) + \mathbf{h}_k^{\text{NLoS}}(t, f), \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{h}_k^{\text{LoS}}(t, f)$ 와 $\mathbf{h}_k^{\text{NLoS}}(t, f)$ 는 각각 위성과 k 번째 유저 사이의 채널 내에 존재하는 LoS 채널과 NLoS 채널을 의미한다 [4]. 또한 본 논문에서는 위성이 maximum ratio transmission (MRT) 빔포밍을 사용하여 빔포밍 벡터 (beamforming vector)를 구성한다고 가정한다. 그러므로 전송신호는 $\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k x_k$ 로 표현되며, \mathbf{w}_k 는 k 번째 유저의 빔포밍 벡터를 의미한다. 따라서 k 번째 유저가 위성으로부터 받는 신호는 다음과 같이 모델링된다 [2].

$$\begin{aligned} y_k &= \mathbf{h}_k^\dagger \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_i x_i + n_k \\ &= \mathbf{h}_k^\dagger \mathbf{w}_k x_k + \mathbf{h}_k^\dagger \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{w}_i x_i + n_k, \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{h}_k^\dagger \mathbf{w}_k x_k$ 는 k 번째 유저가 얻고자 하는 신호를 의미하고 $\mathbf{h}_k^\dagger \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{w}_i x_i$ 는 k 번째 유저가 겪는 간섭을 의미한다. 이때, 서비스 범위에서 가능한 총 복호 순서 수 S 는 $\sum_{k=1}^K K!/(K-k)!$ 가 되며, s 번째 복호 순서에서 j 번째로 복호되는 유저의 signal-to-interference-plus-noise-ratio(SINR) $\text{SINR}_{(s,j)}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{SINR}_{(s,j)} = \frac{|\mathbf{h}_{(s,j)}^\dagger \mathbf{w}_{(s,j)}|^2 p_{(s,j)}}{\sum_{i=1}^{j-1} (|\mathbf{h}_{(s,i)}^\dagger \mathbf{w}_{(s,i)}|^2 p_{(s,i)}) + |\mathbf{h}_{(s,j)}^\dagger \mathbf{w}_{(s,j)}|^2 \cdot \sum_{e=1}^{n(s)} \mu \cdot p_{(s,e)} + 1}, \quad (4)$$

여기서 $p_{(s,j)}$ 는 s 번째 복호 순서에서 j 번째로 복호되는 유저의 전력을 의미하며, s 번째 복호 순서내에 존재하는 총 유저수가 $n(s)$ 이고 전체 전력이 P 일 때, $\sum_{i=1}^{n(s)} p_{(s,i)} \leq P$ 를 만족한다. 또한 $|\mathbf{h}_{(s,j)}^\dagger \mathbf{w}_{(s,j)}|^2 \cdot \sum_{e=1}^{n(s)} \mu \cdot p_{(s,e)}$ 는 완벽하지 않은 SIC로 인해 발생하는 간섭을 의미하며, μ 완벽하지 않은 SIC 정도를 의미한다. 따라서 서비스 받을 수 있는 모든 유저의 SINR이 γ 가 되도록 서비스할 때, 최적인 복호 순서 S^* 는 $\underset{S \in \mathcal{S}}{\text{maximize}} [n(s) \cdot \log_2(1 + \gamma)]$ 가 된다.

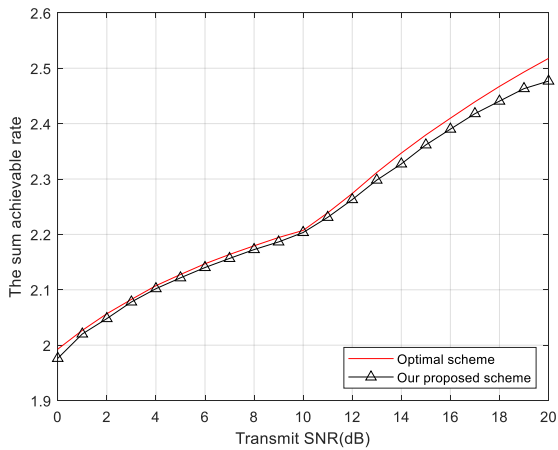


그림 2. 총 데이터 전송률

그러나 유저 수가 증가할수록 최적의 복호 순서를 구하는 과정에 높은 계산 복잡도가 요구되므로 본 논문에서는 심층 신경망 (deep neural network, DNN)을

사용하여 최적의 복호 순서를 찾고자 한다. 이때 DNN 입력 노드에는 모든 유저들의 채널 이득, 채널 상관관계, signal-to-noise ratio (SNR) 입력되고, 출력 노드에는 $\{\emptyset, 1, \dots, S\}$ 가 입력된다. 여기서, \emptyset 는 어떤 유저도 서비스 받지 않는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서 제안하는 DNN은 총 $K^2/2 + K/2 + 1$ 개의 입력 노드와 $S + 1$ 개의 출력 노드를 갖는다.

그림 2는 위성이 3×3 UPA 안테나를 사용하여 서비스 지역 내에 존재하는 총 3 ($K = 3$)명의 유저에게 서비스하고, 각 유저의 SINR이 1 ($\gamma = 1$)로 고정된 시스템에서 본 논문에서 제안하는 기법으로 구한 복호 순서로부터 얻은 총 데이터 전송률과 반복적인 계산으로 구한 최적의 복호 순서로부터 얻은 총 데이터 전송률을 비교한 결과를 나타낸다. 이때 SIC가 완벽하게 이루어지는 시스템을 고려한다. (즉, $\mu = 0$) 그림 2를 통해서 제안하는 기법이 반복적인 계산으로 최적의 복호 순서를 구하는 최적의 기법과 유사한 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 Massive MISO-NOMA LEO 위성 통신시스템에서 기계학습 모델을 활용하여 낮은 복잡도로 최적의 복호 순서를 구하는 기법을 제안하였고, 성능 평가를 통해 제안하는 기법이 반복적인 계산으로 최적의 복호 순서를 찾는 최적의 기법과 유사한 성능을 가짐을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement(KRIT) grant funded by the Korea government(DAPA(Defense Acquisition Program Administration)) (21-106-A00-007, Space-Layer Intelligent Communication Network Laboratory, 2022).

참고 문헌

- [1] S. H. Chae, H. Lim, H. Lee, and B. C. Jung, "Performance analysis of dense low earth orbit satellite communication networks with stochastic geometry," *Journal of Communications and Networks*, vol. 25, no. 2, pp. 208-221, Apr. 2023.
- [2] J. H. Lee, J. S. Joo, P. Kim, and J.-G. Ryu, "Random beam-based nonorthogonal multiple access for massive MIMO low earth orbit satellite networks," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 75725-75735, Jul. 2023.
- [3] L. You, K.-X. Li, J. Wang, X. Gao, X.-G. Xia, and B. Ottersten, "Massive MIMO transmission for LEO satellite communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 8, pp. 1851-1865, Aug. 2020.
- [4] M. J. Kang, J. H. Lee, and S. H. Chae, "Channel Estimation with DnCNN in Massive MISO LEO Satellite Systems," *2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Paris, France, 2023, pp. 825-827.
- [5] K.-X. Li, X. Gao, and X.-G. Xia, "Channel Estimation for LEO Satellite Massive MIMO OFDM Communications," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 11, pp. 7537-7550, Nov. 2023.
- [6] M. J. Kang, J. H. Lee, and J. Y. Ryu, "Machine learning-based NOMA for multiuser MISO broadcast channels," *IEEE Communication Letters*, vol. 28, no. 1, pp. 93-97, Jan. 2024.