

저복잡도 시공간 선 부호기반 상향링크 비직교 다중 접속 시스템

이기훈, 정방철

충남대학교

kihun.h.lee@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

A Novel Low-Complexity Space-Time Line Coded Uplink NOMA System

Ki-Hun Lee, Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문에서는 각각 단일 안테나를 갖는 두 송신 단말과 두 개의 안테나를 갖는 기지국으로 구성된 시공간 선 부호기반 상향링크 비직교 다중 접속 (STLC-NOMA) 네트워크를 제안한다. 종래 상향링크 STLC-NOMA 시스템과는 달리 두 송신 단말은 진폭 편이 변조기를 통해 자신의 정보 비트열을 변조하며, 신호 복소 평면상에서 서로 직교하는 축에 각각 자신의 변조 심볼을 정렬한 후 STLC 신호로 부호화한다. 채널에 의한 위상 왜곡이 보상되는 STLC의 특성에 따라 각 단말의 신호는 기지국에서도 각 축에 정렬되어 수신되며, 이에 따라 기지국은 최대 우도 검파기를 통해 전송된 신호를 검출한다.

I. 서론

상향링크 비직교 다중접속(non-orthogonal multiple access: NOMA) 시스템에서 기지국이 각 송신 단말의 채널을 추정 과정에서 야기되는 신호 오버헤드를 완화하기 위해 시공간 선 부호(space-time line code: STLC)를 적용한 상향링크 STLC-NOMA 시스템이 [1]에서 최초로 제안되었으며, [2]-[4]에서는 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR) 대비 비트 당 오류율(bit-error-rate: BER) 성능이 수학적으로 분석됐다. 한편, [1]-[4]의 상향링크 STLC-NOMA 시스템은 종래 더 높은 효율성을 갖는 것으로 알려진 위상 편이 변조(phase-shift keying: PSK)를 이용하나, 기지국에서 각 단말의 신호를 검파하기 위해 결합 최대 우도(joint maximum-likelihood: joint ML) 검파기를 이용하기 때문에 변조 차수가 증가함에 따라 검출기의 계산 복잡도가 지수적으로 증가한다. 본 논문에서는 진폭 편이 방식 변조(amplitude-shift keying: ASK)와 ML 검파기를 적용한 저복잡도 상향링크 STLC-NOMA 시스템을 제안하고 그 성능을 검증한다.

II. 제안하는 저복잡도 상향링크 STLC-NOMA 시스템

본 논문에서는 [1]에서와 동일하게 각각 단일 안테나를 갖는 두 단말과 두 개의 안테나를 갖는 기지국이 STLC 신호를 송수신하는 상향링크 STLC-NOMA 네트워크를 고려한다. 즉, 두 단말의 STLC 신호가 동일한 무선 자원을 통해 전송되며, 기지국은 중첩되어 수신된 신호로부터 각 단말의 신호를 검파한다. 이때, [1]-[4]와는 달리 두 송신 단말은 ASK 변조기를 통해 자신의 정보 비트열을 변조하며, 신호 복소 평면상에서 서로 직교하는 축에 각각 자신의 ASK 심볼을 정렬한 후 STLC 부호화한다. 일반성을 잃지 않고, 첫 번째 단말은 실수축에, 두 번째 단말은 허수축에 각각 자신의 ASK 심볼을 정렬한다고 가정하면, n ($\in \{1, 2\}$) 번째 송신 단말이 t ($\in \{1, 2\}$) 번째 시간 슬롯에 전송하는 STLC 신호 $s_{n,t}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$s_{n,1} = [h_{n,1}^*(j^{n-1}x_{n,1}) + h_{n,2}^*(j^{n-1}x_{n,2})] / \sqrt{\gamma_n},$$

$$s_{n,2} = [h_{n,2}^*(j^{n-1}x_{n,1}) - h_{n,1}^*(j^{n-1}x_{n,2})] / \sqrt{\gamma_n},$$

여기서 $x_{n,t}$ 는 n 번째 송신 단말의 t 번째 ASK 심볼을 나타내며, $h_{n,m}$ 은 n 번째 송신 단말과 기지국의 m ($\in \{1, 2\}$) 번째 안테나 사이 무선 채널을 나타낸다. 본 논문에서 모든 무선 채널은 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정한다. 또한, γ_n ($:= \| [h_{n,1}, h_{n,2}]^T \|^2$)은 n 번째 송신 단말의 무선 채널 이득(effective channel gain)을 나타낸다.

한편, [1, (2)-(3)]으로부터 기지국의 STLC 복호 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$r_t = \sqrt{\gamma_1} x_{1,t} + j\sqrt{\gamma_2} x_{2,t} + w_t,$$

여기서 r_t 는 t 번째 STLC 복호 신호를 의미하며, w_t 는 $\mathcal{CN}(0, 2N_0)$ 의 분포를 따르는 열잡음을 나타낸다 [3]. STLC의 주요 특성에 따라 무선 채널에 의한 위상 왜곡이 보상되어 각 단말의 송신 신호는 복소 평면상에서 자신의 축에 여전히 정렬되어 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 기지국은 다음과 같이 결합 검파(joint detection) 없이 ML 검파기를 통해 전송된 심볼을 복원한다:

$$\hat{x}_{1,t} = \underset{x \in \mathcal{X}}{\operatorname{argmin}} |\operatorname{Re}\{r_t\} - \sqrt{\gamma_1} x|^2, \quad \hat{x}_{2,t} = \underset{x \in \mathcal{X}}{\operatorname{argmin}} |\operatorname{Im}\{r_t\} - \sqrt{\gamma_2} x|^2,$$

여기서 \mathcal{X} 는 정규화된 M -ASK 심볼들의 집합을 나타낸다.

III. 모의실험 결과 및 결론

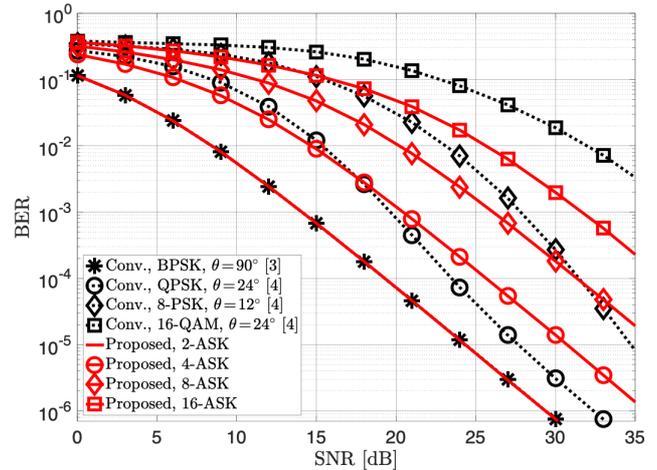


그림 1. 제안된 상향링크 STLC-NOMA의 SNR 대비 BER 성능 모의실험 결과

그림 1은 본 논문에서 제안한 저복잡도 상향링크 STLC-NOMA 시스템 (Proposed)과 종래 상향링크 STLC-NOMA 시스템(Conv.)의 SNR 대비 BER 성능 모의실험 결과이다. 공정한 BER 성능 비교를 위해 두 시스템에 대해 같은 변조 차수를 고려했다. 즉, 제안한 STLC-NOMA 시스템에 대해 2, 4, 8, 16-ASK를 고려하여, 기존 STLC-NOMA가 BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-QAM을 이용하는 경우와 각각 비교했다. 우선, 변조 차수가 2인 경우, 두 STLC-NOMA 시스템은 같은 신호 성상을 가지므로 동일한 성능을 갖는다. 변조 차수가 4인 경우, 제안된 STLC-NOMA 시스템은 18 dB 이하의 SNR 구간에서만 향상된 BER 성능을 보이지만, 변조 차수가 증가함에 따라 기존 STLC-NOMA 대비 더욱 낮은 검출 계산 복잡도를 가질 뿐만 아니라 대부분의 SNR 구간에서 향상된 BER 성능을 보이는 것을 검증했다. 특히, 기존 STLC-NOMA 시스템은 검출 과정에서 $\mathcal{O}(M^2)$ 의 계산 복잡도를 갖는 반면, 제안된 저복잡도 STLC-NOMA는 $\mathcal{O}(M)$ 의 복잡도를 갖는다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R111A3073740).

참고 문헌

- [1] 이기훈, 염정선, 정방철, 정진근, "시공간 선 부호기반 상향링크 비직교 다중 접속 시스템," *한국통신학회논문지*, vol. 44, no. 5, pp. 1015-1023, May 2019.
- [2] K.-H. Lee, J. S. Yeom, B. C. Jung, and J. Joung, "A novel non-orthogonal multiple access with space-time line codes for massive IoT networks," in *Proc. IEEE VTC-Fall*, Honolulu, HI, USA, Sep. 2019, pp. 1-5.
- [3] J. Bae, K.-H. Lee, J. M. Kim, B. C. Jung, and J. Joung, "Performance analysis of uplink NOMA-LoT networks with space-time line code," in *Proc. IEEE VTC-Fall*, Honolulu, HI, USA, Sep. 2019, pp. 1-5.
- [4] K.-H. Lee, J. S. Yeom, J. Joung, and B. C. Jung, "Performance analysis of uplink NOMA with constellation-rotated STLC for IoT networks," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 3, pp. 705-717, Apr. 2022.