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

요 약

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 재고한다. 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 제안됐으며, [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:

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

여기서 $x_{n,t}$는 n번째 송신 단말의 t번째 ASK 심볼을 나타내며, $h_{n,m}$은 n번째 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, $\gamma_n\,(:=\|[h_{n,1},h_{n,2}]^{\mathrm{T}}\|^2)$은 n번째 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_t는 t번째 STLC 복호 신호를 의미하며, w_t는 $\mathcal{CN}(0,2N_0)$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:

$$\hat{x}_{1,t}=\arg\min_{x\in\mathcal{X}}|\mathrm{Re}[r_t]-\sqrt{\gamma_1}x|^2,\quad \hat{x}_{2,t}=\arg\min_{x\in\mathcal{X}}|\mathrm{Im}[r_t]-\sqrt{\gamma_2}x|^2,$$

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

Ⅲ. 모의실험 결과 및 결론

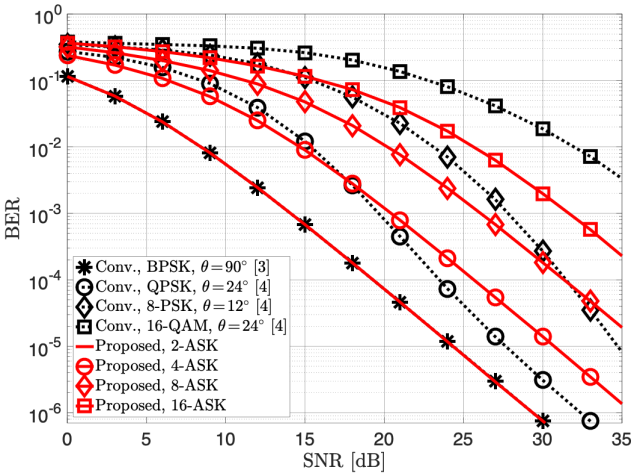

그림 1. 제안된 상향링크 STLC-NOMA의 SNR 대비 BER 성능 모의실험 결과

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-2022R1I1A3073740).

참 고 문 헌

[1] 이기훈, 염정선, 정방철, 정진곤, "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-IoT 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.