

신호 성상도 설계를 통한 6G ISAC-NOMA 시스템의 성능 향상

백주영, 이영석, 정방철
충남대학교

jybaek@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Performance Improvement of 6G ISAC-NOMA Systems via Signal Constellation Design

Juyeong Baek, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문에서는 차세대 이동통신 시스템에서 활용될 것으로 예상되는 통합 센싱-통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템에서 센싱과 통신 신호 간 상호 간섭을 저감하기 위한 상향링크 신호 위상 반전 기반 비직교 다중 접속(signal phase inversion-based non-orthogonal multiple access: SPIN-NOMA) 기술에 대해 비트 당 오류율(bit-error-rate: BER) 관점에서 최적 디지털 변조 신호의 성상도를 설계한다.

I. 서론

최근 무선 자원 고갈 문제를 해결하기 위한 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA) 기법과 통합 센싱-통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템에 관한 연구가 학계 및 산업계에서 활발히 연구되고 있다 [1]. 한편, ISAC 시스템에서 발생하는 센싱-통신 성능 간 트레이드-오프(trade-off)를 해결하기 위해 신호 위상 반전(signal phase inversion: SPIN) 기술을 이용한 SPIN-NOMA 기법이 제안되었다 [2]. 그러나, [2]에서는 기초적인 성상(constellation) 회전 기법만을 적용하여 디지털 변조 관점에서 성상 간 최소 유클리디안 거리를 최대화하지 못하는 문제가 있다. 따라서, 본 논문에서는 비트 당 오류율(bit-error-rate: BER) 관점에서 SPIN-NOMA 기법을 위한 최적 디지털 변조 신호 간 성상도를 설계하여, 모의실험을 통해 제안한 신호 성상도를 적용한 SPIN-NOMA 시스템의 성능 향상을 검증한다.

II. 상향링크 SPIN-NOMA 기반 ISAC 시스템 모델

본 논문에서는 N 개의 수신 안테나와 각각 센싱과 통신을 위해 두 개의 송신 안테나를 구비한 기지국, 단일 안테나를 가진 K 개의 통신 단말, 그리고 단일 타겟이 존재하는 상향링크 ISAC 시스템 환경을 고려한다. 통신 단말은 채널이 변하지 않는다고 가정할 수 있는 상향 시간 내 두 시간 슬롯 동안 기지국으로 신호를 전송하며, 기지국과 임의의 $k(\in\{1, \dots, K\})$ 짝 통신 단말 간 무선 채널은 $\mathbf{h}_k(\in\mathbb{C}^N) \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, l_k^{-\alpha} \mathbf{I}_N)$ 인 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널 환경을 가정하였다. 여기서 l_k 는 기지국과 k 짝 단말 간의 거리를 나타내고 α 는 경로 감쇄 지수를 의미한다. 한편, 기지국은 두 시간 슬롯 동안 인접한 타겟에 대해 모노스태틱(monostatic) 레이더 기능을 동시에 수행한다. 여기서 ISAC 기지국과 타겟 간 무선 채널을 나타내는 $\mathbf{g}(\in\mathbb{C}^N)$ 는 [2]와 같이 양방향 레이더 채널을 가정하였으며 통신 신호와의 상호 간섭을 제거하기 위해 각 시간 슬롯마다 신호의 위상을 반전시켜 레이더 신호를 전송한다. 따라서, $t \in \{1, 2\}$ 짝 시간 슬롯에서 ISAC 기지국이 수신하는 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_t = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_C} \mathbf{h}_k s_{k,t} e^{-j\theta_t} + (-1)^t \sqrt{P_T} \mathbf{g} s_T + \mathbf{z}_t,$$

여기서 $s_{k,t}$, s_T , θ_t , P_C , P_T 는 각각 k 짝 단말이 t 짝 시간에 전송한 정규화된 통신 심볼, 기지국이 레이더 기능을 위해 전송한 정규화된 심볼, t 짝 시간에서의 성상 회전각, 통신 신호 송신 전력, 센싱 신호 송신 전력을 나타내며, $\mathbf{z}_t(\in\mathbb{C}^N)$ 는 t 짝 시간에서 수신기에 발생하는 부가 열잡음 벡터를 의미하며, 통계적으로 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I}_N)$ 분포를 따른다고 가정하였다. 기지국은 통신 신호를 검파하기 위해 수신 신호들을 선형 결합하여 센싱 신호를 제거한다.

$$\mathbf{y}_{\text{NOMA}} = \mathbf{y}_1 + \mathbf{y}_2 = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_C} \mathbf{h}_k (s_{k,1} e^{-j\theta_1} + s_{k,2} e^{-j\theta_2}) + \mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2.$$

이후 수신기는 선형 zero-forcing 빔포밍을 적용함으로써 단말 별 수신 신호를 획득할 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{y}}(\in\mathbb{C}^K) = \mathbf{F} \mathbf{y}_{\text{NOMA}},$$

여기서, $\mathbf{F}(\in\mathbb{C}^{K \times N})$ 는 통신 채널 벡터를 열로 갖는 행렬

$\mathbf{H}(\in\mathbb{C}^{N \times K}) = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K]$ 의 유사-역행렬을 의미한다. 따라서, 기지국은 k 짝 단말이 전송한 신호에 대해서 다음과 같이 최대 우도 검파(maximum likelihood detection: MLD)를 통해 $\hat{\mathbf{s}}_k$ 를 검파할 수 있다:

$$\hat{\mathbf{s}}_k = \arg \min_{s_1, s_2 \in \mathcal{S}} \left\{ \left| \tilde{y}_k - \sqrt{P_C} (s_1 e^{-j\theta_1} + s_2 e^{-j\theta_2}) \right|^2 \right\},$$

여기서 \tilde{y}_k 는 $\tilde{\mathbf{y}}$ 의 k 짝 원소를 나타내며 \mathcal{S} 는 정규화된 심볼의 후보 집합을 의미한다. 이때 본 논문에서는 성상 간 최소 유클리디안 거리를 최대화하도록 신호 성상도를 그림 1과 같이 설계하였다.

IV. 모의실험 결과 및 결론

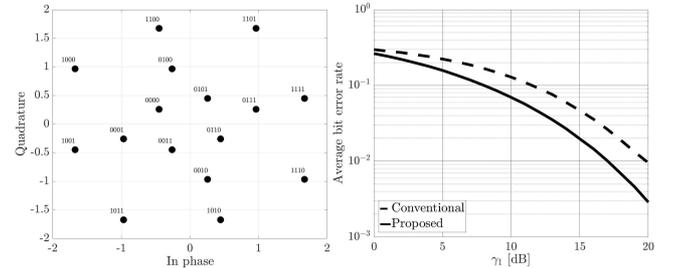


그림 1. 제안하는 결합 성상도

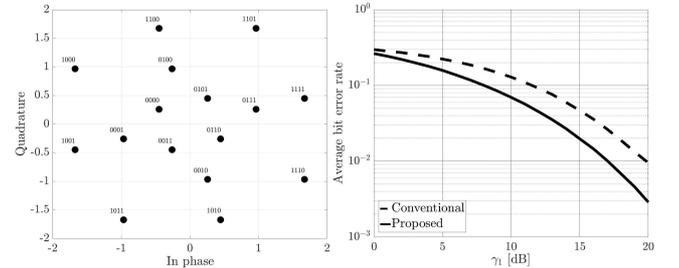


그림 2. SPIN-NOMA 기법의 BER 성능

그림 1은 직교 위상 변조(quadrature phase shift keying: QPSK) 변조를 고려할 때 두 시간 슬롯에 걸친 NOMA 신호의 결합 성상도를 도시한 예를 나타낸다. 본 논문에서는 결합 심볼 간 최소 유클리디안 거리가 최대가 되도록 두 시간 슬롯의 성상 간 회전각 차이를 $|\theta_1 - \theta_2| = \pi/6$ 로 설계하였으며, 각 사분면을 경계로 인접한 심볼 간 Gray 매핑 룰을 적용하였다. 그림 2는 본 논문에서 제안한 신호 성상도가 적용된 SPIN-NOMA 기법의 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio: SNR, $\gamma_k := P_C / (\sigma^2 l_k^{-\alpha})$) 대비 평균 BER 성능을 도시한 결과이다. 본 모의실험에서는 기지국의 수신 안테나 수, 단말 간 SNR 비를 각각 $N=4$, $\gamma_2/\gamma_1 = 1/4$ 로 설정하였다. [2]에서는 각 사분면을 경계로 인접한 신호 성상 간에 Gray 매핑과 유클리디안 거리를 최대화할 수 있는 최적 회전각을 적용하지 않았기 때문에 본 논문에서 제안한 신호 성상도를 적용한 SPIN-NOMA 기법의 BER 성능이 기존 기법보다 큰 성능 향상을 보이는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템 및 IITP-2024-RS-2024-00436406, 밀리미터급초소형 레이더-통신 시스템 개발)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] X. Mu, Z. Wang, and Y. Liu, "NOMA for integrated sensing and communications towards 6G: A multiple access perspective," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 31, no. 3, pp. 316–323, Jun. 2024.
- [2] H. Liu and E. Alsusa, "A novel ISaC approach for uplink NOMA system," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 9, pp. 2333–2337, Sep. 2023.