6G ISAC 시스템을 위한 SPIN-NOMA 기법의 성능 분석

백주영, 이영석, 정방철

충남대학교 전자공학과

e-mail : jybaek@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Performance Analysis of Signal Phase Inversion-based NOMA Technique for 6G Integrated Sensing and Communication Systems

Juyeong Baek, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

Abstract

In this paper, we investigate an uplink signal phase inversion-based non-orthogonal multiple access (SPIN-NOMA) technique [3] to suppress mutual interference between communication and sensing signals in the integrated sensing and communication (ISAC) systems. Then, we technically develop the SPIN-NOMA to improve communication reliability while maintaining other performance. We also mathematically derive the bit-error rate (BER) performance for the uplink SPIN-NOMA technique applying linear zero-forcing beamforming. Through extensive simulations, we verify that the communication performance of our developed SPIN-NOMA is clearly improved over the initially proposed SPIN-NOMA technique [3], and confirm that the theoretical BER expression well represents the simulation results.

I. 서론

최근 동일한 하드웨어 플랫폼과 신호 파형을 사용하여 통신과 레이더 기능을 동시에 지원할 수 있는 통합 센싱 및 통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템 이 학계 및 산업계에서 활발히 연구되고 있다 [1], [2]. 한편, 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA) 기술은 동일한 무선 자원을 활용하여 주파수 효율성을 크게 향상시킬 수 있는 다중접속 기술로, ISAC 시스템에서 통신 신호와 센싱 신호를 동시에 처리할 수 있는 기술로써 각광 받고 있다 [3]. 특히, [3]에서는 상향링크 ISAC 시스템에서 센싱과 통신 신호 간의 간섭 문제를 해결하기 위해 신호 위 상 반전(signal phase inversion: SPIN) 기반 NOMA 기법 을 제안하였다. 그러나 초기 SPIN-NOMA 기법은 두 개의 단말이 낮은 차수의 변조 신호 회전을 통해 기지국으로 전 송하는 기본적인 통신 절차만을 제안하였으며, 이론적 성능 분석도 수행되지 않았다.

따라서, 본 논문에서는 종래의 SPIN-NOMA 기법에서 일 반화된 *M*-진 직교 진폭 변조(quadrature amplitude modulation: QAM) 신호와 임의의 단말 수를 고려한 일반 화된 SPIN-NOMA 프레임워크를 제시한다. 또한, 본 논문 에서는 선형 zero-forcing (ZF) 수신기를 고려한 이론적 비 트 오류율(bit-error-rate: BER) 성능 및 다이버시티 이득을 분석한다. 모의실험을 통해 제안하는 일반화된 SPIN-NOMA 기법이 종래의 기법 대비 동일한 데이터 전 송률에서 우수한 BER 성능을 가짐을 확인하고, 이론적 분 석이 모의실험 결과를 잘 투영함을 검증한다.

II. SPIN-NOMA 기반 ISAC 시스템 모델

본 논문에서는 센싱 및 통신 신호를 각각 전송하기 위한 두 송신 단일 안테나와 N개의 수신 안테나를 구비한 단일 ISAC 기지국과 K개의 통신 단말과 단일 타겟이 존재하는 상향링크 ISAC 시스템 환경을 고려한다. 이때, K개의 통신 단말은 각각 단일 안테나를 갖고 있다고 가정하였으며, 채 널이 변하지 않는다고 가정할 수 있는 상관 시간 내 두 시 간 슬롯 동안 기지국으로 신호를 전송한다. 기지국과 임의 의 $k(\in \{1, \dots, K\})$ 째 통신 단말 간 무선 채널은 $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^N$ 로 정의되며, 통계적으로 독립이고 *CN*(0,d_L^αI_N)분포를 따르 는 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널 환경을 가정하였 다. 여기서 $d_k = k$ 째 단말과 기지국 간의 거리를 나타내고, α는 경로 감쇄 지수를 의미한다. 한편, ISAC 기지국은 동 일한 두 시간 슬롯 동안 인접한 타겟에 대해 모노스태틱 (monostatic) 레이다 기능을 동시에 수행한다. ISAC 기지국 과 타겟 간 무선 채널을 나타내는 $\mathbf{g} \in \mathbb{C}^N$ 는 [3]와 같이 양 방향 레이다 채널을 가정하였으며, SPIN 기법을 적용하여 두 번째 시간 슬롯에선 첫 번째 시간 슬롯에서 전송한 신호 의 위상을 반전한 신호를 송수신한다. 따라서, t∈{1,2}째 시간 슬롯에서 ISAC 기지국이 수신하는 신호는 다음과 같 이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_t = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k/2} \, \mathbf{h}_k s_k + (-1)^t \sqrt{P_T/2} \, \mathbf{g} s_T + \mathbf{w}_t,$$

여기서 P_k , P_T , s_k , s_T , $\mathbf{w}_t \in \mathbb{C}^N$ 는 각각 k째 단말의 송신 신호 전력, 센싱 신호 전력, k째 단말이 전송한 정규화된 심볼, 정규화된 센싱 신호 웨이브폼, t째 시간 슬롯에서 수 신기에 발생하는 부가 열잡음 벡터를 나타낸다. 본 논문에 서 모든 잡음 성분은 통계적으로 독립이고 동일한 *CN*(0, σ²) 분포를 따른다고 가정하였다.

이후, ISAC 기지국은 통신 단말이 전송한 신호를 검과하 기 위해 두 시간 슬롯에서 수신한 신호를 선형 결합하여 센 싱 신호를 제거한 SPIN-NOMA 신호를 도출한다.

$$\mathbf{y}_{\text{NOMA}} = \frac{\mathbf{y}_{1+}\mathbf{y}_{2}}{\sqrt{2}} = \sum_{k=1}^{K} \sqrt{P_{k}} \mathbf{h}_{k} s_{k} + \frac{\mathbf{w}_{1} + \mathbf{w}_{2}}{\sqrt{2}}$$

수신기는 단말 간의 간섭을 완화하기 위해 $\tilde{\mathbf{y}}(\in \mathbb{C}^{K}) = \mathbf{F} \mathbf{y}_{\text{NOMA}}$ 와 같이 ZF 빔포밍을 적용하여 단말 별 수신 신호를 획득할 수 있다. 여기서, $\mathbf{F} (\in \mathbb{C}^{K \times N})$ 는 기 지국과 단말 간 무선 채널 벡터를 열로 갖는 행렬 $\mathbf{H} (\in \mathbb{C}^{N \times K}) = [\mathbf{h}_{1}, \mathbf{h}_{2} \cdots \mathbf{h}_{K}]$ 의 유사-역행렬을 나타낸다. 따 라서, k째 단말이 전송한 신호에 대해 다음과 같이 최대 우 도 검파(maximum likelihood detection: MLD)를 통해 \hat{s}_{k} 를 검파할 수 있다:

 $\hat{s}_k = \arg\min_{s \in \mathbf{S}} \left\{ \left\| \tilde{y}_k - s \right\|^2 \right\},\$

여기서 \tilde{y}_k 는 $\tilde{\mathbf{y}}$ 의 k째 원소를 나타내며 S는 정규화된 QAM 심볼의 후보 집합을 의미한다.

III. SPIN-NOMA 기법의 BER 성능 분석

본 장에서는 SPIN-NOMA 기법의 BER 성능을 수학적으 로 분석한다. 이를 위해, $\tilde{y}_k/\sqrt{z_k} = \sqrt{P_k}a_ks_k + \tilde{w}_k$ 와 같이 정규화 요소(regularization factor) z_k 를 통해 \tilde{y}_k 에서 ZF 빔 포머에 의해 증폭된 잡음을 정규화한다 [4]. 여기서 z_k 는 $(\mathbf{H}^{\mathrm{H}}\mathbf{H})^{-1}$ 행렬의 k째 대각 원소를 나타내며, \tilde{w}_k 는 유효 잡음을 의미한다. a_k 는 정규화 요소로 인한 유효 채널 계수 로, $|a_k|^2$ 은 통계적으로 비율 매개변수가 d_k^a 이고 형상 매개 변수가 N - (K-1)인 어랑 분포(Erlang distribution)을 따 른다. 따라서, 임의의 M-진 QAM 변조를 고려할 때 k째 신호에 대한 BER 성능은 다음과 같이 유도된다.

$$\Pr(\epsilon_{k}) = \frac{1}{\sqrt{M}\log_{2}M} \sum_{b=0}^{\log_{2}\sqrt{M}} \sum_{i=0}^{(1-2^{-b})\sqrt{M}-1} (-1)^{\left\lfloor i\frac{2^{b-1}}{\sqrt{M}} \right\rfloor} \cdot \left(2^{b-1} - \left\lfloor i\frac{2^{b-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor\right) \\ \cdot \left(1 - \sum_{l=0}^{N-K} \binom{2l}{l} \sqrt{\frac{3(2i+1)^{2}\rho_{k}}{3(2i+1)^{2}\rho_{k} + 2(M-1)}}} \\ \left(\frac{(M-1)}{(6(2i+1)^{2}\rho_{k} + 4(M-1))}\right)^{l} \right)$$

여기서 $\rho_k = P_k / (d_k^{\alpha} \sigma^2) \leftarrow k$ 째 단말의 수신 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio: SNR)를 나타내며, $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 각 실수 이하의 최대 정수를 구하는 바닥 함수를 의미한다.

Ⅳ. 모의실험 결과 및 결론

그림 1은 임의의 16-QAM 신호에 대한 ISAC 시스템용 상향링크 SPIN-NOMA 기법의 송신 SNR 대비 BER 성능



분석 결과를 나타낸다. 본 모의실험에서는 2개의 단말이 ISAC 기지국과 통신한다고 가정하였으며, SNR 비를 $\rho_1: \rho_2 = 2:1$ 와 같이 설정하였다. 본 논문의 일반화된 SPIN-NOMA 기법은 [3]에서 두 시간 슬롯 동안 서로 다른 직교 위상 편이(quadrature phase shift keying) 변조 신호 를 성상 회전하여 전송하는 기존 SPIN-NOMA 기법과 비 교하였다. 기존 기법은 각 사분면을 경계로 인접한 신호 성 상 간에 그레이 맵핑이 적용되지 않았으며 적절한 전력 할 당 비율이 고려되지 않았다. 한편, 동일한 전송률을 가지며 두 시간 슬롯 동안 동일한 16-QAM 신호를 전송하는 제안 하는 SPIN-NOMA 프레임워크는 종래의 기법이 가진 문제 를 해결하여 더 우수한 BER 성능을 갖는 것을 확인하였다. 수학적으로 본 논문에서 분석한 상향링크 또한. SPIN-NOMA 기법의 이론적 BER 표현이 실제 모의실험 결과를 정확하게 나타내는 것을 검증하였다.

Acknowledge

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보 통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABC-MIMO : 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스 템) 및 대학 ICT연구센터사업의 지원(No. IITP-2024 -RS-2024-00436406)을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] Y. Chen, H. Hua, J. Xu, and D. K. Ng, "ISAC meets SWIPT: Multifunctional wireless systems integrating, communication, and powering," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 8, pp. 8264–8280, Aug. 2024.
- [2] F. Liu et al., "Integrated sensing and communications: Towards dualfunctional wireless networks for 6G and beyond," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1728–1767, Jun. 2022.
- [3] 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.
- [4] Y. -S. Lee, K. -H. Lee, H. S. Jang, G. Jo, and B. C. Jung, "Performance analysis of resource hopping-based grant-free multiple access for massive IoT networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 2685–2689, Dec. 2022.