

6G ISAC 시스템에서 신호 위상 반전 기반 NOMA 기법의 성능 분석

백주영, 이영석, 정방철
충남대학교

gybaek@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
Chungnam National University

요약

본 논문에서는 동일한 하드웨어 및 웨이브폼을 이용하여 이종(heterogeneous) 서비스를 동시에 지원할 수 있는 통합 센싱-통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템을 위한 상향링크 신호 위상 반전 기반 비직교 다중 접속(signal phase inversion-based non-orthogonal multiple access: SPIN-NOMA) 기술을 소개하고 그 성능을 이론적으로 분석한다. 구체적으로, 본 논문에서는 M -진 직교 진폭 변조(quadrature amplitude modulation: QAM) 신호를 고려하면서 임의의 단말 수에 대한 상향링크 SPIN-NOMA 기법의 일반화된 비트 당 오류율(bit-error rates: BER) 성능을 수학적으로 분석하고, 모의실험을 통해 SPIN-NOMA 기법의 이론적 BER 표현이 실제 모의실험 결과를 잘 나타내는 것을 검증한다.

I. 서론

차세대 이동 통신 시스템은 주파수 자원 고갈, 고비용 하드웨어, 높은 에너지 소비와 같은 문제를 해결할 방안으로 이종(heterogeneous) 서비스 간 하드웨어/소프트웨어 융합 기술이 주목받고 있다. 이로 인해, 최근 무선 통신 인프라를 활용하여 통신과 다기능 레이더(RADAR) 기능을 동일한 하드웨어 및 신호 웨이브폼을 통해 동시에 지원할 수 있는 통합 센싱-통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템 연구가 학계 및 산업계에서 활발히 연구되고 있다 [1]. 한편, ISAC 시스템에서 급증하는 데이터 트래픽 처리와 이종 서비스 동시 지원으로 인해 발생하는 센싱-통신 기능 간 성능 트레이드-오프(trade-off)를 해결하기 위한 효과적인 간섭 완화 및 자원 관리 기술에 대한 필요성이 대두되고 있다 [2].

비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA) 기술은 적절한 간섭 제어와 자원 할당을 통해 다수의 단말을 효과적으로 수용할 수 있어 ISAC 시스템을 위한 무선 접속 기술로 활발히 연구되고 있다 [2]-[4]. 구체적으로, [3]에서는 통신과 센싱 신호가 상호 간에 미치는 영향을 완화하기 위해 순차적 간섭 제거(successive interference cancellation: SIC)를 이용한 ISAC 신호 처리 기술을 제안하였다. [4]에서는 상향링크 ISAC 시스템에서 발생할 수 있는 센싱-통신 기능 간 간섭에 대해 신호 위상 반전(signal phase inversion: SPIN) 기술을 이용한 SPIN-NOMA 기법을 제안하였다. 구체적으로, SPIN-NOMA 기법은 상관 시간(coherence time) 내 두 시간 슬롯 동안 센싱 신호의 위상을 반전시켜 전송하고 수신기는 단순한 선형 결합을 통해 통신 또는 센싱 신호만을 검출하여 각 신호를 검파할 수 있는 기술을 나타낸다. 그러나, [4]에서는 두 단말이 정상(constellation) 회전을 적용한 낮은 차수의 변조 신호를 기지국으로 전송하는 기초적인 SPIN-NOMA 기법이 제안되었으며 SPIN-NOMA 기법의 이론적인 통신 성능은 수학적으로 분석되지 않았다.

따라서, 본 논문에서는 ISAC 시스템을 위한 M -진 직교 진폭 변조(quadrature amplitude modulation: QAM) 신호를 고려하고 임의의 단말 수에 대한 일반화된 SPIN-NOMA 기법을 제시한다. 또한, 선형 ZF 수신기를 도입하여, 무선 채널의 통계적 특성을 활용한 이론적인 통신 성능을 비트 당 오류율(bit-error rates: BER) 관점에서 최초로 분석한다. 모의실험을 통해, 본 논문에서 제시한 M -진 QAM을 활용한 일반화된 SPIN-NOMA 기법이 [4]에서 제안한 기초적 SPIN-NOMA 기법보다 동일한 전송률에 대해 더욱 향상된 BER 성능을 갖는 것을 확인하였으며, 본 논문에서 분석한 수학적 성능이 실제 모의실험 결과를 정확하게 나타내는 것을 검증하였다.

II. 상향링크 SPIN-NOMA 기반 ISAC 시스템 모델

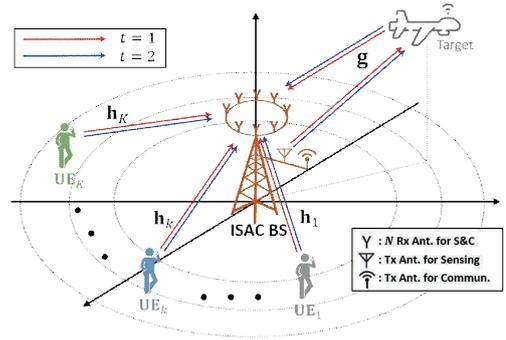


그림 1. 상향링크 SPIN-NOMA 기반 ISAC 시스템 모델.

본 논문에서는 그림 1과 같이 센싱 및 통신 신호를 각각 전송하기 위한 두 송신 단말 안테나와 N 개의 수신 안테나를 구비한 단일 ISAC 기지국과 K 개의 통신 단말과 단일 타겟이 존재하는 상향링크 ISAC 시스템 환경을 고려한다. 이때, K 개의 통신 단말은 각각 단일 안테나를 갖고 있다고 가정하였으며, 채널이 변하지 않는다고 가정할 수 있는 상관 시간 내 두 시간 슬롯 동안 기지국으로 신호를 전송한다. 기지국과 임의의 k ($\in \{1, \dots, K\}$) 째 통신 단말 간 무선 채널은 $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^N$ 로 정의되며, 통계적으로 독립이고 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, d_k^{-\alpha} \mathbf{I}_N)$ 분포를 따르는 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널 환경을 가정하였다. 여기서 d_k 는 k 째 단말과 기지국 간의 거리를 나타내고, α 경로 감쇄 지수를 의미한다. 한편, ISAC 기지국은 동일한 두 시간 슬롯 동안 인접한 타겟에 대해 모노스태틱(monostatic) 레이더 기능을 동시에 수행한다. ISAC 기지국과 타겟 간 무선 채널을 나타내는 $\mathbf{g} \in \mathbb{C}^N$ 는 [4]와 같이 양방향 레이더 채널을 가정하였으며, SPIN 기법을 적용하여 두 번째 시간 슬롯에선 첫 번째 시간 슬롯에서 전송한 신호의 위상을 반전한 신호를 송수신한다. 따라서, $t \in \{1, 2\}$ 째 시간 슬롯에서 ISAC 기지국이 수신하는 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 $P_k, P_T, s_k, s_T, \mathbf{w}_t \in \mathbb{C}^N$ 는 각각 k 째 단말의 송신 신호 전력, 센싱

신호 전력, k 째 단말이 전송한 정규화된 심볼, 정규화된 센싱 신호 웨이브폼, t 째 시간 슬롯에서 수신기에 발생하는 부가 열잡음 벡터를 나타낸다. 본 논문에서 모든 잡음 성분은 통계적으로 독립이고 동일한 $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 분포를 따른다고 가정하였다. 이후, ISAC 기지국은 통신 단말이 전송한 신호를 검파하기 위해 다음과 같이 두 시간 슬롯에서 수신한 신호를 선형 결합하여 센싱 신호를 제거한 SPIN-NOMA 신호를 도출한다.

$$\mathbf{y}_{\text{NOMA}} = \frac{\mathbf{y}_1 + \mathbf{y}_2}{2} = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \mathbf{h}_k s_k + \frac{\mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2}{2}.$$

수신기는 단말 간의 간섭을 완화하기 위해 다음과 같이 ZF 빔포밍을 적용하여 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 기지국과 단말 간 무선 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 나타낸다. 따라서, k 째 단말이 전송한 신호에 대해 다음과 같이 최대 우도 검파(maximum likelihood detection: MLD)를 통해 \hat{s}_k 를 검파할 수 있다:

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

여기서 \tilde{y}_k 는 $\tilde{\mathbf{y}}$ 의 k 째 원소를 나타내며 \mathcal{S} 는 정규화된 직교 진폭 변조(quadrature amplitude modulation: QAM) 심볼의 후보 집합을 의미한다.

III. 상향링크 SPIN-NOMA 기법의 BER 성능 분석

본 장에서는 ISAC 시스템용 SPIN-NOMA 기법에 대해 임의의 단말 수와 변조 차수를 고려한 닫힌 형태의 일반화된 BER 성능을 수학적으로 분석한다. 이를 위해, 다음과 같이 정규화 요소(regularization factor) z_k 를 통해 \tilde{y}_k 에서 ZF 빔포밍에 의해 증폭된 잡음을 정규화한다 [5].

$$\frac{\tilde{y}_k}{z_k} = \sqrt{P_k} a_k s_k + \tilde{w}_k,$$

여기서 z_k 는 $(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$ 행렬의 k 째 대각 원소를 나타내며, a_k 와 \tilde{w}_k 는 정규화 요소로 인한 유효 채널 계수와 유효 잡음을 의미한다.

임의의 M -진 QAM 변조를 고려하면서 유효 채널 a_k 가 주어졌을 때 k 째 신호에 대한 조건부 오류 확률은 다음과 같다 [6].

$$\Pr(\epsilon_k | a_k) = \frac{2}{\sqrt{M}} \sum_{b=0}^{\log_2 \sqrt{M}-1} \sum_{i=0}^{2^{b-1} \sqrt{M}-1} (-1)^{\lfloor i \frac{2^{b-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} \cdot \left(2^{b-1} - \left\lfloor i \frac{2^{b-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) Q \left((2i+1) \sqrt{\frac{3|a_k|^2 \gamma_k}{M-1}} \right)$$

여기서 $\gamma_k = P_k / \sigma^2$ 는 k 째 단말의 송신 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio: SNR)를 나타내며, $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 각 실수 이하의 최대 정수를 구하는 바닥 함수를 의미한다. 이때, ZF 빔포밍을 통한 k 째 수신 신호의 유효 채널 이득 $|a_k|^2$ 은 통계적으로 형상 매개변수가 $N - (K-1)$ 이고 비율 매개변수가 d_k^α 인 어랑 분포(Erlang distribution)을 따른다. 따라서, 전체 확률 정리(total probability theorem)에 의해 M -진 QAM 변조를 고려한 임의의 k 째 단말의 오류 확률은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\Pr(\epsilon_k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{b=0}^{\log_2 \sqrt{M}-1} \sum_{i=0}^{2^{b-1} \sqrt{M}-1} (-1)^{\lfloor i \frac{2^{b-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} \cdot \left(2^{b-1} - \left\lfloor i \frac{2^{b-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \cdot \left(1 - \sum_{l=0}^{N-K-2} \binom{2l}{l} \sqrt{\frac{3(2i+1)^2 \gamma_k}{3(2i+1)^2 \gamma_k + 2(M-1)d_k^\alpha}} \right)^l \cdot \left(\frac{(M-1)d_k^\alpha}{6(2i+1)^2 \gamma_k + 4(M-1)d_k^\alpha} \right)^l$$

IV. 모의실험 결과 및 결론

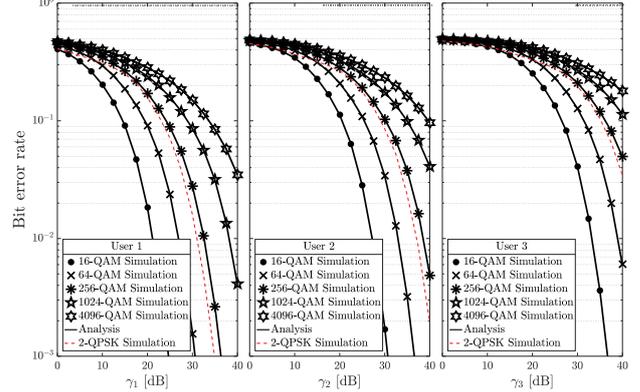


그림 2. ISAC 시스템용 상향링크 SPIN-NOMA 기법의 BER 성능 분석.

그림 2는 임의의 M -진 QAM 신호에 대한 ISAC 시스템용 상향링크 SPIN-NOMA 기법의 송신 SNR 대비 BER 성능 분석 결과를 나타낸다. 본 모의실험에서는 3개의 단말이 (16 ~ 4096)-진 QAM 변조 신호로 ISAC 기지국과 통신한다고 가정하였으며, 기지국의 수신 안테나 수, 경로 감쇠 지수, 각 단말과 기지국 간의 거리는 각각 $N=8$, $\alpha=2$, $d_1=5\text{m}$, $d_2=10\text{m}$, $d_3=20\text{m}$ 로 설정하였다. 본 논문의 일반화된 SPIN-NOMA 기법은 [4]에서 두 시간 슬롯 동안 서로 다른 직교 위상 편이(quadrature phase shift keying: QPSK) 변조 신호를 성상 회전하여 전송하는 기존 SPIN-NOMA 기법과 비교하였다. 기존 기법은 각 사분면을 경계로 인접한 신호 성상 간에 그레이 코딩이 적용되지 않았으며 적절한 전력 할당 비율이 고려되지 않았기 때문에, 동일한 전송률을 갖는 16-QAM 신호에 대한 SPIN-NOMA 기법이 더 우수한 성능을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 본 논문에서 수학적으로 분석한 상향링크 SPIN-NOMA 기법의 이론적 BER 표현이 실제 모의실험 결과를 정확하게 나타내는 것을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 및 한국연구재단의 지원(No. NRF-2022R111A3073740)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] Y. Cui, F. Liu, X. Jing, and J. Mu, "Integrating sensing and communications for ubiquitous IoT: Applications, trends, and challenges," *IEEE Netw.*, vol. 35, no. 5, pp. 158 - 167, Sep./Oct. 2021.
- [2] X. Mu, Z. Wang, and Y. Liu, "NOMA for integrated sensing and communications towards 6G: A multiple access perspective," *IEEE Wireless Commun.*, Jan. 2023 (Early access).
- [3] C. Ouyang, Y. Liu, and H. Yang, "Revealing the impact of SIC in NOMA-ISAC," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 12, no. 10, pp. 1707 - 1711, Jun. 2023.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 백주영, 이영석, 정방철, "하향링크 RIS-NOMA 시스템에서 일반화된 M-QAM 기법의 성능 분석," *한국통신학회 동계종합학술발표회*, pp. 1233-1234, Feb. 2024.