

6G ISAC-NOMA 시스템 성능 향상을 위한 결합 최대 우도 기반 검파 기법

황예진, 백주영, 정방철

충남대학교

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

A Novel Joint Maximum Likelihood Detection Technique for Performance Improvement of 6G NOMA-Empowered ISAC Systems

Ye Jin Hwang, Juyeong Baek, Bang Chul Jung

Chungnam National University

요약

본 논문에서는 통합 센싱-통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템에서 센싱-통신 간 성능 트레이드-오프(Trade-off)를 해소하기 위한 효과적인 간섭 제어 기술에 대해 조사한다. 그리고, 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파기를 이용한 상향링크 신호 위상 반전 기반 비직교 다중 접속(signal phase inversion-based non-orthogonal multiple access: SPIN-NOMA) 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안한 JML 검파기를 이용한 SPIN-NOMA 기법이 기존의 선형 간섭 제거(zero forcing: ZF) 수신기를 이용한 기법에 비해 평균 비트 당 오류율(bit-error-rate: BER) 측면에서 현격한 통신 성능 향상을 보이는 것을 검증한다.

I. 서론

이동 통신 시스템과 레이더(RADAR) 시스템은 주파수 자원 부족 문제를 해결하기 위해 밀리미터파(millimeter wave: mmWave)나 테라헤르츠(terahertz: THz) 이상의 초고주파 대역을 고려하고 있다. 동작 주파수 대역이 높아짐에 따라 이동 통신 시스템과 레이더 시스템의 채널 특성과 신호 처리 방식이 유사해지고 있다. 또한, 두 시스템 모두 초고주파 대역의 극심한 경로 손실(path loss)을 완화하고 더 높은 공간 자유도를 얻기 위해 대규모 다중 안테나(multi-input multi-output: MIMO)를 도입하고 있다. 이러한 이동 통신 시스템과 레이더 시스템의 유사한 발전에 기인하여 최근 동일한 인프라와 무선 자원을 활용하여 레이더와 통신을 동시에 지원하기 위한 통합 센싱-통신(integrated sensing and communication: ISAC)에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다 [1]. ISAC 시스템은 두 가지 기능을 동시에 수행함으로써 전력, 스펙트럼 및 하드웨어의 효율성을 높일 수 있는 유망한 기술이지만, 데이터 트래픽 증가와 통신-탐지 간의 성능 트레이드-오프를 유발한다. 이에 따라, 효과적인 간섭 완화 및 자원 관리 기술에 대한 필요성이 대두되고 있다 [1]-[4].

이와 관련하여, [2]에서는 하향링크 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반 결합 레이더-통신(joint radar-communication: RadCom) 시스템에서 OFDM 심볼의 주파수 오프셋과 인접한 부반송파를 점유한 단말의 간섭으로 인한 오차의 허용 범위를 실제 측정을 통해 도출해 내었으며 시스템 레벨에서 상호 간섭을 제거하는 기법을 제안하였다. 또한, 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA) 기술이 적절한 간섭 제어와 자원 관리를 통해 다수의 단말을 효과적으로 수용할 수 있는 다중 접속 기술로써 ISAC 시스템에 적용되고 있다 [3]-[4]. [3]에서는 통신과 탐지 신호가 상호 간섭을 미치는 영향을 완화하기 위해 순차적 간섭 제거(successive interference cancellation: SIC)를 이용한 센싱-통신 신호 처리 기법을 제안하였다. [4]에서는 상호 간섭을 탐지 및 통신 신호의 출력에 상관없이 저감하기 위해 상향링크 신호 위상 반전 기반 비직교 다중 접속(signal phase inversion-based NOMA: SPIN-NOMA) 시스템을 제안하였다. 구체적으로, 상관 시간(coherence time) 내의 두 시간 슬롯에 걸쳐 탐지 신호의 위상을 반전시켜 전송함으로써 탐지 신호를 자동으로 제거할 수 있도록 설계되었으며, 통신 신호 검파를 위해 선형 간섭 제거(zero forcing: ZF) 수

신기를 도입하였고, 신호 성장도 회전 기법(constellation rotation: CR)을 이용하여 비트 당 오류율(bit-error-rate: BER) 성능을 개선하였다. 그러나, 선형 간섭 제거 빔포밍은 각 통신 단말의 빔을 서로 직교하도록 빔을 형성하여 통신 단말 간 간섭을 없앨 수 있지만 잡음이 증폭되어 신호 대 잡음비(signal to noise ratio: SNR)가 열화 된다.

따라서, 본 논문에서는 선형 ZF 수신기 대신 최적의 결합 최대 우도(Joint Maximum Likelihood: JML) 검파 [5]를 이용한 SPIN-NOMA 기법을 제안한다. 또한, 모의실험을 통해 제안한 JML 검파 기반 SPIN-ISAC과 기존의 기법을 BER 측면에서 비교 검증한다.

II. JML 검파 기반 상향링크 SPIN-NOMA 기법의 시스템 모델

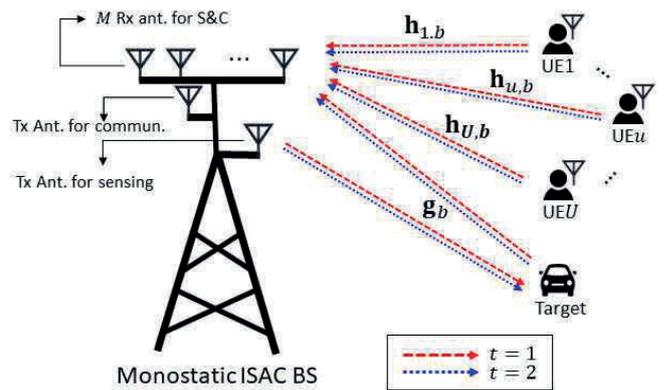


그림 1 상향링크 SPIN-NOMA 기반 ISAC 시스템 모델.

본 논문에서는 그림 1과 같이 단일 안테나를 갖는 U 개의 통신 단말이 존재하고, 센싱-통신 신호를 동시에 수신할 수 있는 M 개의 수신 안테나와 센싱 및 통신 신호를 각각 전송하기 위한 두 단일 송신 안테나를 갖는 모노스테틱(monostatic) ISAC 기지국이 존재하는 상향링크 ISAC-NOMA 시스템을 고려한다. 상관 시간 내 두 시간 슬롯 동안 단말은 기지국으로 통신 신호를 전송하고, 기지국은 통신 신호를 수신함과 동시에 주위의 타겟을 센싱 한다. 이때, 두 시간 슬롯 내에서는 단일 타겟 만이 존재한다고 가정한다.

본 논문에서는 일반성을 잃지 않고 상관 시간 내의 두 시간 슬롯에서

전송된 신호만을 고려한다. $u \in \{1, 2, \dots, U\}$ 째 통신 단말이 송신한 $b \in \{1, 2, \dots, 128\}$ 째 부반송파가 겪는 기지국과 단말 간 무선 채널은 $\mathbf{h}_{u,b} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 로 정의된다. 이때, 모든 통신 채널은 서로 통계적으로 독립이고 동일한 분포를 따른다고 가정하며 $\mathbf{h}_{u,b}$ 의 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 째 원소인 $h_{u,b,m}$ 은 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_M)$ 분포를 따르는 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널 환경을 고려한다. 그리고, 기지국이 전송한 $b \in \{1, 2, \dots, 128\}$ 째 부반송파가 겪는 센싱 채널은 $\mathbf{g}_b \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 로 정의된다. 이때, 센싱 채널은 [4]와 같이 양방향 레이다 채널을 가정하며 \mathbf{g}_b 의 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 째 원소인 $g_{b,m}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_{b,m} = \frac{\lambda \sqrt{G_{\text{Tx}} G_{\text{Rx}} \sigma}}{(4\pi)^{3/2} R^2} e^{-j2\pi b \Delta f \tau_m} e^{j2\pi f_{\text{Doppler}} k T}$$

여기서 R , λ , G_{Tx} , G_{Rx} , Δf , τ_m , f_{Doppler} , k 그리고 T 는 각각 기지국의 기준 안테나와 타겟 간 거리, 신호의 파장, 송신 안테나 이득, 수신 안테나 이득, 기지국의 m 째 안테나의 센싱 신호 전달 지연, 도플러 주파수, 시간에 따른 전송 심볼 색인 그리고 심볼 주기를 의미한다.

본 논문에서는 통신 신호에 대해 직교 위상 천이(quadrature phase shift keying: QPSK) 변조를 가정하며, 각 시간 슬롯의 통신 신호 성상 간 거리를 최대화하기 위해 신호의 위상을 조절하는 CR 기술을 적용한다 [6]. 또한, 기지국은 수신단에서 센싱 신호를 제거하기 위해 매 타임 슬롯마다 동일한 센싱 신호의 위상을 반전시켜 송신한다 [4]. 따라서, t 째 시간 슬롯에서 b 째 부반송파를 통해 기지국이 수신하는 수신 신호는 다음과 같이 유도해 낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_{t,b} = \sum_{u=1}^U \mathbf{h}_{u,b} \sqrt{P_C} x_{u,b,t} e^{-j\theta_t} + (-1)^t \sqrt{P_s} \mathbf{g}_b s_b + \mathbf{w}_t$$

여기서, P_C , $x_{u,b,t}$ 그리고 θ_t 는 각각 통신 신호의 송신 전력, u 째 단말이 t 째 시간 슬롯에서 전송한 정규화된 b 째 QPSK 심볼 그리고 t 째 시간 슬롯에서의 위상 조절 각도를 의미한다. 이때, 신호 성상 간 거리를 최대화하기 위해 위상 조절 각도를 $|\theta_1 - \theta_2| = 24^\circ$ 으로 설정한다 [6]. 그리고, P_s 와 s_b 는 각각 센싱 신호의 송신 전력과, 정규화된 b 째 부반송파를 통해 전송된 센싱 심볼을 나타낸다. 또한, \mathbf{w}_t 는 부가 열잡음 벡터를 의미하며 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, N_0 \mathbf{I}_M)$ 분포를 따른다고 가정한다. 이후, 기지국은 통신 신호를 검파하기 위해 두 시간 슬롯에서 수신한 신호를 선형결합하여 센싱 신호를 제거한다. 따라서, 센싱 신호가 제거된 수신 신호는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\mathbf{y}_b = \sum_{t=1}^2 \mathbf{y}_{t,b} = \sum_{u=1}^U \mathbf{h}_{u,b} \sqrt{P_C} (x_{u,b,1} e^{-j\theta_1} + x_{u,b,2} e^{-j\theta_2}) + \mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2$$

기지국은 상향링크 전력 영역 NOMA에서 최적의 성능을 갖는 JML 검파기를 통해 다음과 같이 U 개의 단말들이 두 시간 슬롯에 걸쳐 송신한 b 째 통신 심볼들을 검파한다.

$$\hat{\mathbf{X}}_b = \arg \min_{\substack{x_{1,b,1}, x_{1,b,2}, \dots, x_{U,b,2} \in \mathcal{X} \\ \left\| \tilde{\mathbf{y}}_b - \sum_{u=1}^U \mathbf{h}_{u,b} \sqrt{P_C} (x_{u,b,1} e^{-j\theta_1} + x_{u,b,2} e^{-j\theta_2}) \right\|^2}} \left\{ \left\| \tilde{\mathbf{y}}_b - \sum_{u=1}^U \mathbf{h}_{u,b} \sqrt{P_C} (x_{u,b,1} e^{-j\theta_1} + x_{u,b,2} e^{-j\theta_2}) \right\|^2 \right\}$$

여기서 $\hat{\mathbf{X}}_b (\in \mathbb{C}^{2 \times U}) = [\mathbf{x}_{1,b} \mathbf{x}_{2,b} \dots \mathbf{x}_{U,b}]$ 는 기지국이 검파한 u 째 통신 단말이 전송한 심볼 벡터 $\mathbf{x}_{u,b} = [x_{u,b,1} \ x_{u,b,2}]^T$ 를 열로 갖는 행렬을 나타내며 \mathcal{X} 는 정규화된 QPSK 심볼의 후보 집합을 의미한다.

III. 모의실험 결과 및 결론

그림 2는 JML 검파 기반 상향링크 ISAC-NOMA 시스템에서 단말의

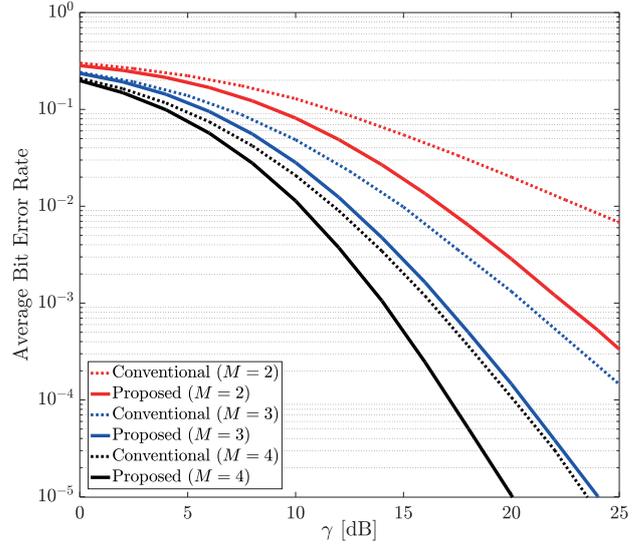


그림 2. JML 검파 기반 SPIN-NOMA 시스템의 BER 성능.

송신 비트당 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)인 $\gamma (= P_C/2N_0)$ 대비 평균 BER 성능을 도시한 결과이다. 본 모의실험에서는 $U=2$ 개의 단말이 기지국과 통신을 한다고 가정하였으며 센싱 신호 위상 반전 기법에 의해 센싱 신호가 완전히 제거되었다고 가정하였다. 모의실험 결과는 본 논문에서 제안한 JML 검파 기반 ISAC-NOMA 기법이 [4]에서 제안된 ZF 빔포밍을 이용한 기법에 비해 BER 측면에서 우수한 통신 성능을 보장할 수 있음을 보여준다. 추후, JML 검파 기반 ISAC-NOMA 기법의 BER 성능을 수학적으로 분석하여 통신 시스템에 영향을 미치는 주요 요인을 파악하고 ISAC-NOMA 기법의 시스템을 최적화할 예정이다.

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] F. Liu, Y. Cui, C. Masouros, et al., "Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1728-1767, Jun. 2022.
- [2] Y. L. Sit, B. Nuss, and T. Zwick, "On mutual interference cancellation in a MIMO OFDM multiuser radar-communication network," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 4, pp. 3339 - 3348, Apr. 2018.
- [3] C. Ouyang et al., "Revealing the impact of SIC in NOMA-ISAC," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 12, no. 10, pp. 1707 - 1711, Oct. 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, 2023.
- [5] J. S. Yeom, H. S. Jang, K. S. Ko, and B. C. Jung, "BER performance of uplink NOMA with joint maximum-likelihood detector," *IEEE Tran. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 10295-10300, Oct. 2019.
- [6] 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, 2022.