

비대각 지능형 재구성 반사표면 지원 모노스태틱 통합 센싱 및 통신 시스템의 반사 행렬 최적화 기법 연구 동향

정지혁, 전정원, 권진호, 노송[‡]
인천대학교

{jihyeok.jung, jeongwon.jeon, jinhokwon, songnoh}@inu.ac.kr

Trends in Optimization Techniques for Beyond Diagonal RIS Enabled Monostatic Integrated Sensing and Communications

Jung Jihyeok, Jeon Jeongwon, Kwon Jinho, Noh Song[‡]
Incheon National Univ.

요약

통합 센싱 및 통신 시스템은 자원 효율성과 환경 인식 능력을 동시에 확보할 수 있는 기술로 차세대 무선 시스템에서 주목을 받고 있다. 이러한 통합 센싱 및 통신 시스템의 성능 향상을 위한 방안으로 기존 대각 구조의 지능형 재구성 반사체를 확장한 비대각 구조의 재구성 반사체를 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 본 논문에서는 비대각 지능형 재구성 반사체 지원 통합 센싱 및 통신 시스템에 관한 최신 연구 동향을 조사하고, 수학적 제약 조건 및 최적화 기법을 분석한다.

I. 서 론

차세대 무선 통신 시스템은 고주파수 대역(mmWave/THz, millimeter-wave/terahertz)의 활용과 초고속, 동적 환경에서의 통신 안정성을 요구한다. 최근 이러한 기술적 도전 과제 해결 방안으로 통신과 센싱을 통합하는 통합 센싱 및 통신(ISAC, Integrated Sensing and Communications) 시스템이 주목받고 있다. ISAC은 공유된 주파수 대역, 하드웨어, 신호 처리 체계를 통해 통신과 환경 인식을 동시에 수행함으로 자원 효율성과 환경 적응성을 동시에 확보할 수 있는 핵심 기술이다[1].

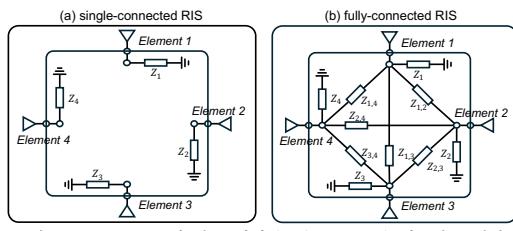
재구성 가능한 지능형 반사표면(RIS, Reconfigurable Intelligent Surface)은 전파 환경을 능동적으로 제어하여 통신 성능을 향상시킬 수 있는 기술로 스펙트럼 및 에너지 효율 측면에서 ISAC에 적합한 기술로 평가된다.

최근 기존 RIS의 제한적인 반사 행렬 구조로 인한 설계 자유도 부족 문제를 고려한 비대각 재구성 가능한 지능형 반사표면(BD-RIS, Beyond Diagonal RIS)을 이용한 ISAC 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[2].

본 논문에서는 이러한 BD-RIS 기반 모노스태틱 ISAC 시스템에 대한 최신 연구 동향을 고찰하고, 반사 행렬에 부과되는 구조적 제약 조건을 고려한 최적화 문제를 소개한다.

II. BD-RIS 지원 모노스태틱 ISAC 시스템

A. 비대각 지능형 재구성 반사표면



BD-RIS는 그림 1(a)과 같은 기존의 독립적인 임피던스 네트워크로 인한 대각 구조의 반사 행렬의 한계를 그림 1(b)과 같은 반사 요소 간의 상호 연결을 통해 극복한다. BD-RIS의 반사 행렬 $\Phi \in \mathbb{C}^{L \times L}$ 은 밀집 행렬로 모델링 되며, BD-RIS의 비대각 반사 행렬 구조는 확장된 설계 자유도에 의해 기존 RIS 대비 정밀한 빔 제어와 향상된 시스템 성능을 가능하게 한다[3].

반면, BD-RIS는 다음과 같이 에너지 보존을 위한 유니터리 제약과 채널의 쌍방향성을 보장하기 위한 대칭 제약이 있다.

$$\Phi^H \Phi = \mathbf{I}_L \quad (1)$$

$$\Phi = \Phi^T \quad (2)$$

B. BD-RIS 지원 모노스태틱 ISAC 시스템 모델

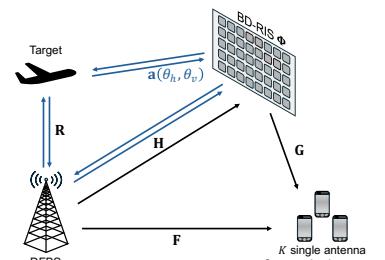


그림 2. BD-RIS 지원 모노스태틱 통합 센싱 및 통신 시스템 모델

BD-RIS 지원 모노스태틱 ISAC 시스템은 송신 및 수신 안테나 배열에 각각 N 개의 소자가 있는 이중 기능 기지국(DFBS, Dual Function Base Station)으로 구성된다. BD-RIS Φ 는 L 개의 ($L = L_x \times L_y$)요소로 이루어진 균일한 평면 배열(UPA, Uniform Planar Array)로 배열된 반사 요소로 구성된다.

각 사용자 측에서 수신된 통신 신호는 다음과 같다.

$$y_c = (\mathbf{F} + \mathbf{G}\Phi\mathbf{H})\mathbf{Ps} + \mathbf{n}_c(t) \quad (3)$$

[‡] Corresponding author

이때, $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{K \times N}$, $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{K \times L}$ 은 각각 직접 링크와 BD-RIS에 반사되어 수신된 간접 링크를 의미한다. $\mathbf{P} \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 는 DFBS 프리코더이며, $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{L \times N}$ 는 BS 와 RIS 간의 채널을 의미한다. $\mathbf{n}_c \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_c^2 \mathbf{I})$ 는 통신 수신기의 백색 잡음이다.

BD-RIS를 기준으로 한 도착 방향(DoA, Direction of Arrival)이 (θ_h, θ_v) 이고, RIS 조향 벡터가 $\mathbf{a}(\theta_h, \theta_v) = \mathbf{a}_x(\theta_h, \theta_v) \otimes \mathbf{a}_y(\theta_h, \theta_v)$ 일 때, 레이더 수신기가 수신한 에코 신호는 다음과 같다.

$$y_s = \alpha_T (\mathbf{R} + \mathbf{H}^T \Phi \mathbf{a}(\theta_h, \theta_v)) (\mathbf{R}^T + \mathbf{a}(\theta_h, \theta_v)^T \Phi \mathbf{H}) \mathbf{P} \mathbf{s} + \mathbf{n}_s \quad (4)$$

이때, $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 은 타겟과 DFBS 간의 채널이다. α_T 는 레이더 반사 면적(RCS, Radar Cross Section)이며, $\mathbf{n}_s \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_s^2 \mathbf{I})$ 는 레이더 수신기의 잡음이다.

III. 제약조건을 고려한 최적화 기법

BD-RIS 운용 ISAC 시스템은 통신 성능과 센싱 성능 간의 균형을 고려한 최적화 목적 함수를 사용한다. 반면, 모노스태틱 ISAC 시스템에서는 센싱 성능 지표가 반사 행렬에 대한 4 차 비선형 항으로 나타날 수 있으며, 수식 (1), (2)와 같은 BD-RIS의 제약조건으로 인해 최적화를 직접 수행하기 어렵다.

A. BD-RIS 지원 모노스태틱 ISAC 시스템의 센싱 성능 지표에 따른 비볼록 제약

BD-RIS 지원 모노스태틱 ISAC 시스템에서 센싱 성능을 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)로 평가할 경우 수식 (4)에 의해 반사 행렬에 대한 4 차 비선형 항이 목적함수 또는 최적화 제약조건에 포함된다.

이러한 비볼록성은 반사 행렬 최적화에 어려움을 주며, 보조 변수를 사용하여 4 차 항을 2 차 항으로 완화할 수 있다. 보조 변수는 기존 변수와의 등식 제약 조건의 형태로 최적화 문제에 포함된다[4], [5], [6].

B. BD-RIS 제약조건을 고려한 최적화 기법

BD-RIS의 반사 행렬 최적화 문제는 (1), (2)와 같은 직교 제약 조건에 의해 최적해를 찾기 어렵다. 따라서, 제약 조건을 완화하기 위한 최적화 기법들이 사용된다.

[4]에서는 BD-RIS 제약 조건 및 목적함수의 4 차 항을 완화하기 위해 세 개의 보조 변수를 도입하여 기존 제약조건은 등식 제약조건으로 완화하며 변수 간의 등식 제약 조건은 페널티 항으로 추가해 문제를 분리하여 각 변수를 교대 최적화한다. 반면, 4 차 항 및 BD-RIS 제약 완화를 위해 두 개의 보조 변수를 도입하고 페널티 기반 이중 분해 기법(PDD, Penalty Dual Decomposition)을 사용하여 페널티 계수를 점진적으로 증가시키며 범포밍 벡터와 함께 교대 최적화를 진행할 수 있다[5], [6]. 이 기법은 제약 조건 만족과 교대 최적화의 수렴 안정성을 동시에 가진다.

반면, [4], [5], [6]과 달리 센싱 성능지표 및 목적함수로 신호 대 클러터 및 잡음비(SCNR, Signal to Clutter plus Noise Ratio)를 사용하여 다중 타겟 레이더 검출 성능을 최적화 할 수 있다[7]. 최소 SCNR을 최대화하는 최소-최대 문제를 정의하고, 전송 파형 및 반사 행렬, 센싱 필터를 교대 방향 승수법(ADMM, Alternating Direction Method of Multipliers) 기반의 알고리즘을 통해 교대 최적화 한다. 반사 행렬 최적화는 제약 조건 완화를 위한 보조 변수를 도입하여 제약을 분리한 뒤, 보조 변수의 특이 값 분해(SVD, Singular Value Decomposition)로 유니터리 조건을 만족하는 해를 구한다.

센싱 성능지표로 Cramér-Rao 경계(CRB, Cramér-Rao Bound)의 최소 고윳값을 사용하여 타겟 위치 추정 정확도 문제를 다룰 수 있다[8]. 범포밍과 BD-RIS를 공동 최적화하는 두 단계 최적화 알고리즘을 제안하며, BD-RIS 반사 행렬 최적화는 보조 변수를 사용하지 않고 페널티 기반이 아닌 수식 (1)을 만족하는 유니터리 공간에서의 최적화 후 수식 (2)의 대칭 조건을 만족하는 공간으로 투영하는 대칭 유니터리 투영 기법을 사용한다.

IV. 결론

본 논문에서는 BD-RIS 운용 제약을 고려한 모노스태틱 ISAC 시스템의 최적화 기법들을 소개하였다. 향후 ISAC 시스템에서 BD-RIS의 실제적인 적용을 위해, 복합적인 BD-RIS 구조 및 운용 모드를 지원하는 ISAC 시스템 모델 및 BD-RIS 반사 소자 이산화를 고려한 최적화 기법들이 연구될 것으로 사료되며, 지능형 통신 네트워크 구축에 기여할 것으로 예상한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 지원과, 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (과제번호: NRF-2022R1F1A1074612, IITP-2025-RS-2023-00259061)

참고문헌

- [1] R. Liu, M. Li, H. Luo, Q. Liu and A. L. Swindlehurst, "Integrated sensing and communication with reconfigurable intelligent surfaces: opportunities, applications, and future directions," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 30, no. 1, pp. 50 - 57, Feb. 2023.
- [2] A. Magbool, V. Kumar, Q. Wu, M. D. Renzom, M. F. Flanagan, "A survey on integrated sensing and communication with intelligent metasurfaces: trends, challenges, and opportunities," *arXiv: 2401.15562v2*, Nov. 2024.
- [3] H. Li, S. Shen and B. Clerckx, "Beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces: from transmitting and reflecting modes to single-, group-, and fully-connected architectures," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 4, pp. 2311 - 2324, Apr. 2023.
- [4] T. Esmaeilbeig, K. V. Mishra and M. Soltanalian, "Beyond diagonal RIS: key to next-generation integrated sensing and communications?," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 32, pp. 216 - 220, 2025.
- [5] Z. Liu, Y. Liu, S. Shen, Q. Wu and Q. Shi, "Enhancing ISAC network throughput using beyond diagonal RIS," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 13, no. 6, pp. 1670 - 1674, Jun. 2024.
- [6] Z. Guang, Y. Liu, Q. Wu, W. Wang and Q. Shi, "Power minimization for ISAC system using beyond diagonal reconfigurable intelligent surface," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 73, no. 9, pp. 13950 - 13955, Sep. 2024.
- [7] B. Wang, H. Li, S. Shen, Z. Cheng and B. Clerckx, "A dual-function radar-communication system empowered by beyond diagonal reconfigurable intelligent surface," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 73, no. 3, pp. 1501 - 1516, Mar. 2025.
- [8] K. Chen and Y. Mao, "Transmitter side beyond-diagonal RIS for mmWave integrated sensing and communications," *2024 IEEE 25th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Lucca, Italy, 2024.