주파수 다양성 배열 기반 센싱-통신 통합 시스템 연구 동향

유병하, 심성훈, 정해준
경희대학교
syeon2513@khu.ac.kr, tjdgns169@khu.ac.kr, haejoonjung@khu.ac.kr

A Review on FDA-Based Integrated Sensing and Communication Systems

Byungha You, Sunghoon Shim, Haejoon Jung
Kyung Hee Univ.

요 약

안테나 요소 별 송신 주파수를 달리하여 거리-각도 혹은 시간-각도 의존적 빔패턴을 형성할 수 있는 주파수 다양성 배열은 기존 위상 배열 대비 빔패턴의 공간 선택성 측면에서 유리하여 레이더 및 통신 분야에서 연구가 활발히 이뤄지고 있다. 본 논문에서는 주파수 다양성 배열을 이용한 센싱-통신 통합 시스템 연구 동향을 제시한다. 센싱을 중점으로 둔 통합 시스템 설계와 센싱-통신 공동 파형 연구로 분류하고 연구 동향을 분석한다.

Ⅰ. 서 론

센싱-통신 통합 (integrated sensing and communications, ISAC) 기술은 환경 인식과 데이터 전송을 동시에 수행할 수 있는 차세대 무선 네트워크 및 6G의 핵심 기술로 주목받고 있다 [1]. 기존에는 센싱과 통신을 별도로 설계했으나 joint sensing and communication (JSC), joint radar-communication (JRC), dual-function radar-communication (DFRC)라고도 일컫는 ISAC은 두 기능을 하나의 플랫폼 상에서 공동 설계함으로써 스펙트럼과 하드웨어 자원의 효율적인 활용이 가능하다. 이러한 통합은 자원 분리형 방식부터 완전 통합 파형 기반 방식까지 다양한 수준에서 연구되고 있으며, 특히 후자는 비용 및 지연 시간 절감을 위해 각광받고 있다.

하지만 기존의 위상 배열 (phased array, PA) 안테나를 기반으로 한 ISAC 시스템은 각도에만 의존하는 빔 패턴을 제공하므로 거리 해상도 측면에서 한계가 있으며, 이는 복잡하거나 동적인 환경에서 센싱 성능 저하를 초래한다. 이러한 문제를 극복하기 위해 주파수 다양성 배열 (frequency diverse array, FDA)이 도입되었으며, 안테나 간 주파수 오프셋 (frequency offset, FO)을 활용해 각도-거리 의존적 빔패턴을 형성할 수 있다. 특히 FDA의 고해상도 거리 추정 및 고성능 잡음 억제 능력으로 인해 견고한 ISAC 시스템 구축을 위한 유망한 솔루션으로 부상하고 있다. 이에, 본 논문에서는 FDA를 활용한 ISAC (FDA-ISAC) 시스템에 대한 연구 동향을 논의한다. ISAC 시스템에서 FDA의 다양한 활용 방안 및 사례를 소개하고 그에 따른 특성과 장점에 대해 분석한다.

Ⅱ. 본 론

FDA는 전통적인 PA와 달리, 각 안테나 요소에 서로 다른 FO를 부여함으로써 거리-각도, 즉 시간-각도 의존적 빔패턴을 생성할 수 있는 기술이다. 전통적인 FDA는 선형 FO를 적용하여 S자 형태의 거리-각도 평면 상 빔패턴을 생성하며, 이는 안테나별 송신 주파수를 다르게 함으로써 시간에 따라 자율적으로 스캔할 수 있는 auto-scanning 특성을 보임을 의미한다 [2]. 파형의 위상을 전자적으로 조정하지 않고도 송신 빔 방향이 시간에 따라 연속적으로 이동할 수 있는 선형 FO 기반의 FDA 외에도, 비선형 FO, 시변 (time-modulated) FO, random FO 등 FO 설계 자유도 향상을 통해 sidelobe 조작 및 억제, 공간 다양성/선택성을 달성할 수 있다. 이를 통해 거리-각도 센싱 분해능, 타겟 빔 집중도 등을 향상시키며, 센싱 및 통신 모두에서 뚜렷한 강점으로 작용되어 ISAC 시스템 구현을 위한 요소 기술로서 각광받고 있다.

FDA-ISAC을 위한 초기 연구는 직교 주파수 분할 다중화 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 파형을 센싱에 활용하거나 레이더 파형을 통신에 재활용하는 기존 시스템 중심적 접근법이 주를 이루었으나, 이러한 방식은 필연적으로 센싱-통신 트레이드오프 문제를 동반한다. 이를 해결하기 위해, 최근에는 파형과 빔형성을 동시에 최적화하는 공동 설계 기반 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 장에서는 FDA를 활용한 레이더 중심 ISAC 설계와 센싱-통신 공동 파형 설계에 대한 최신 연구 동향을 소개한다.

Ⅱ-1. FDA-ISAC을 위한 센싱(레이더) 중심 접근법

센싱 중심 ISAC 시스템은 기존 레이더 자원을 활용하여 센싱 성능을 유지하면서 통신 기능을 동시에 수행하는 것을 목표로 한다. FDA가 레이더 기능 수행을 위해 처음 제안되었음을 고려할 때 센싱(레이더) 중심 FDA-ISAC 연구가 널리 이루어지고 있는 것은 자연스럽다. 초기 연구에서는 FDA-multiple-input multiple-output (FDA-MIMO) 레이더, 즉 다중 안테나를 이용해 레이더 신호를 송신하고 반사 신호를 수신하며, 시간-주파수 직교성을 만족하는 파형을 방사하는 구조를 통해 타겟 탐지 혹은 거리·각도 추정 성능을 향상시키는 것을 주요 목표로 삼았다. [3]에서는 레이더 기능을 유지하는 동시에 이진 데이터 비트를 FO에 삽입하는 데이터 전송 방식을 제안하였으며, 이에 대한 비트 오류율(bit error rate, BER) 및 Cramér-Rao Bound (CRB)를 분석하였다. [4]에서는 FDA-MIMO 구조에서 Costas 주파수 코드 기반의 송신 파형에 위상 편이 변조 (phase shift keying, PSK) 심볼을 삽입하여 통신 기능을 추가한 DFRC 시스템을 제안하였다. 레이더 기능은 Costas 코드의 낮은 자기 상관 특성을 기반으로 수행되며, 통신 수신기는 ratio test을 통해 PSK 심볼을 복호하고, 이에 대한 심볼 오류율(symbol error rate, SER), 신호대간섭잡음비(signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR), 전송률 등의 통신 성능을 수치적으로 분석하였다.

한편, 빔 조향을 통해 레이더의 mainlobe를 유지한 채 통신 신호를 null 영역에 투사하는 연구가 이루어졌다. [5]에서는 FDA-Butler Matrix

(BM) 기반의 DFRC 시스템에서 사이드로브 조작 기법을 도입하고, 빔 직교성을 확보함으로써 레이더 및 통신 신호 간 간섭을 최소화하였다. [6]에서는 subaperturing FDA 빔패턴의 null depth 차이를 활용해 통신 정보를 삽입하는 null depth control (NDC) 기법이 제안되었다.

이러한 접근법들은 레이더 성능을 보존하면서 통신 기능을 통합할 수 있는 실용적인 방향을 제시하였으나, 다음과 같은 한계를 내포하고 있다. 첫째, [3], [4]와 같은 구조는 통신 심볼을 FO나 파형 위상에 삽입하는 방식이지만, 이는 레이더 조향 구조 내에 제한적으로 삽입되므로 통신 전송률의 확장성이 떨어진다. 둘째, [5], [6]에서와 같이 공간 영역에서 통신 신호를 레이더 mainlobe의 null 방향으로 제한하는 구조는 통신 도달 범위와 전송 성능에 구조적 제약을 발생시키며, 통신 품질 보장을 위한 파형 설계나 최적화는 고려되지 않는다. 나아가, 센싱 및 통신 성능 간 정량적 트레이드오프 관계를 수학적으로 모델링하거나 이를 기반으로 최적화하는 체계적인 설계 프레임워크가 전무하다.

Ⅱ-2. FDA-ISAC을 위한 센싱-통신 공동 파형 설계

ISAC 시스템은 센싱 정확도와 통신 용량 간의 트레이드오프 문제를 동반하며 센싱 중심 FDA-ISAC 시스템은 센싱 및 통신 성능을 모두 향상시키기에는 그 한계가 명확하다. 이를 해결하기 위해 센싱-통신을 동시에 수행할 수 있는 공동 파형의 설계가 필수적이다. 초기 연구 [7]에서는 OFDM 기반 FDA 파형을 활용 시 자원 효율성과 시스템 통합 가능성을 탐색하였다. OFDM-chirp 신호를 사용함으로써 거리-도플러 해상도를 확보하는 동시에 통신 심볼을 삽입하는 구조를 구성하였으며 스펙트럼 공유 기반 통합 시스템의 설계 가능성을 제시하였다. [8]에서는 FO permutation index modulation (FOPIM) 방식을 제안하여 FO pool에서 FO 선택 및 permutation 수행을 통해 추가 정보 비트를 주입함으로써 타겟 추정 CRB 요구사항 하에서 데이터 전송률을 향상시키는 방안을 탐구하였다. 센싱-통신 공동 파형 기반의 FOPIM에서는 거리-각도 추정 및 복조를 위해 2단계로 이루어진 maximum likelihood estimator (MLE) 기법을 제안하고 그에 대한 CRB 및 BER 성능을 분석하였다.

기존 연구들이 공동 파형 기반 설계에도 불구하고 센싱 및 통신 개별 성능에 집중한 것과 달리, [9]-[11]은 두 기능 간 성능 균형을 고려하여 통합 최적화 프레임워크를 제안하였다. [9]에서는 직교 주파수 다양성 파형에 weighted phase-modulated signals를 임베딩하는 공동 파형이 제안되었다. 다중 타겟 위치 추정을 위한 CRB와 통신 용량을 분석하였으며, CRB 제약조건 하에서 통신 용량을 최대화하는 sequential parametric convex 및 semidefinite relaxation 기반 빔포밍 최적화 기법이 제안되었다.

[10]에서는 THz near-field FDA-ISAC 시스템에서 통신 심볼과 센싱 신호를 하나의 송신 파형 내에 통합한 구조를 바탕으로 센싱-통신 성능 간 trade-off를 고려한 빔포밍 최적화 기법이 제안되었다. 다중 사용자 및 다중 타겟을 가정하고, 다중 사용자 간섭을 최소화하면서도 다중 타겟 센싱을 수행하도록 weighting factor를 도입하여 통합 성능 제어 및 최적화를 위한 빔포밍 전략이 제안되었다.

FDA-ISAC 시스템이 재구성 가능 지능형 표면 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 기술과 결합될 경우, 극심한 전파 손실이나 장애물이 존재하는 환경에 강인한 시스템을 구축할 수 있다. [11]에서는 레이더 echo 신호의 signal-to-clutter-plus-noise ratio (SCNR) 요구사항을 만족하면서도 sum rate을 최대화하도록 하는 빔포밍 벡터 및 RIS 행렬, FO 등에 대한 최적화를 수행하였으며, RIS가 포함된 단일 사용자 단일 타겟 시나리오에서 FDA-ISAC 시스템은 PA 기반 ISAC 시스템보다 항상 높은 SCNR 성능을 보였다.

Ⅲ. 결 론

본 논문에서는 FDA-ISAC 시스템의 기술 동향을 센싱 중심 및 공동 파형 설계의 두 가지 범주로 나누어 정리하였다. 초기 센싱 중심 연구들은 FDA의 거리-각도 분해능 향상 특성을 활용하여 통신 기능을 제한적으로 삽입하거나 공간적으로 분리하는 구조를 채택하였다. 이후 파형 내 통합 설계를 기반으로 하는 공동 파형 설계 기반 연구들이 등장하였으며, 최근에는 센싱 및 통신 성능 균형을 최적화하는 통합 설계 프레임워크가 제안되고 있다. 아울러, THz 대역 통신 및 RIS 등 6G 핵심 기술과의 융합을 통해 FDA-ISAC 적용 가능성이 더욱 확장되고 있다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the MSIT, Korea, in part under the National Research Foundation of Korea grants (RS-2023-00303757, RS-2023-00276086), in part under the ITRC support programs (IITP-2025-RS-2021-II212046), and in part under the Convergence security core talent training business support program (IITP-2023-RS-2023-00266615) supervised by the IITP.

참 고 문 헌

[1] Z. Wei *et al.*, "Integrated Sensing and Communication Signals Toward 5G-A and 6G: A Survey," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 10, no. 13, pp. 11068-11092, Jul. 2023.

[2] W. Jia *et al.*, "Time-Range FDA Beampattern Characteristics," *Signal Process.*, vol. 218, pp. 109393, May 2024.

[3] S. Ji *et al.*, "A Dual-function Radar-Communication System Using FDA," in Proc. *IEEE Radar Conf.*, pp. 0224-0229, Apr. 2018.

[4] S. Y. Nusenu and W. -Q. Wang, "Dual-Function FDA MIMO Radar-Communications System Employing Costas Signal Waveforms," in Proc. *IEEE Radar Conf.*, pp. 0033-0038, Apr. 2018.

[5] S. Y. Nusenu *et al.*, "Dual-Function Radar-Communication System Design Via Sidelobe Manipulation Based On FDA Butler Matrix," *IEEE Ant. Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 452-456, Mar. 2019.

[6] A. Basit *et al.*, "Range-Angle-Dependent Beampattern Synthesis With Null Depth Control for Joint Radar Communication," *IEEE Ant. Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 9, pp. 1741-1745, Sep. 2019.

[7] H. Huang and W. -Q. Wang, "FDA-OFDM for integrated navigation, sensing, and communication systems," *IEEE Aerosp. Electronic Syst. Mag.*, vol. 33, no. 5-6, pp. 34-42, May-Jun. 2018.

[8] J. Jian *et al.*, "FDA-MIMO-Based Integrated Sensing and Communication System With Frequency Offsets Permutation Index Modulation," *IEEE Trans. Commun*, vol. 72, no. 11, pp. 6707-6721, Nov. 2024.

[9] X. Zhou *et al.*, "Performance Analysis and Waveform Optimization of Integrated FD-MIMO Radar-Communication Systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 20, no. 11, pp. 7490-7502, Nov. 2021.

[10] Q. Wu *et al.*, "Beamforming Design Optimization Utilizing Frequency-Controlled Arrays for Terahertz Near-Field Integrated Sensing and Communication," in Proc. *IEEE 24th Int. Conf. Commun. Tech. (ICCT)*, pp. 1299-1303, Oct. 2024.

[11] H. Yang *et al.*, "Frequency Diverse Array-enabled RIS-aided Integrated Sensing and Communication," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, Apr. 2025 (Early Access).