

재구성 가능한 표면 기반 통합 센싱-통신 시스템 연구 동향

백주영, 정방철
아주대학교

요약

최근 통합 센싱-통신(integrated sensing and communication, ISAC) 기술이 주파수 자원 고갈, 고비용 하드웨어, 높은 에너지 소비 문제를 해결하기 위한 유망한 기술로 부상하고 있다. 그러나, 밀리미터파(millimeter wave, mmWave) 이상의 대역에서 ISAC 시스템을 구현하는데 있어 초 고주파 대역 전파의 강한 직진성과 극심한 경로 손실이 큰 문제가 되고 있다. 최근 재구성 가능한 지능형 표면(reconfigurable intelligent surfaces, RIS), 이동형 안테나(movable antenna), 그리고 재구성 가능한 홀로그래픽 표면(reconfigurable holographic surface, RHS)등과 같은 안테나 재구성 기술이 이러한 문제점을 해소하고 ISAC 시스템의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 기술로 주목받고 있다. 본 고에서는 재구성 가능한 표면 기반 ISAC 시스템의 최신 연구 동향에 대해 살펴본다.

I. 서론

미래의 디지털 사회에서는 초연결성과 함께 증강현실(augmented reality), 가상현실(virtual reality), 자율주행 차량, 스마트 공장 등 다양한 데이터 집약적 어플리케이션이 보편화 될 것으로 예상된다[1]. 이러한 어플리케이션은 기존의 이동통신 시스템이 제공할 수 있는 네트워크 용량을 뛰어넘는 대규모 데이터 전송을 필요로 한다. 국제전기통신연합(international telecommunication union, ITU)에서 발표한 세계 모바일 데이터 추이(그림 1)에 따르면 2030년까지 데이터 트래픽이 5 제타바이트에 이를 것으로 예상된다[2]. 이러한 데이터 트래픽의 기하급수적인 증가는 IEEE 802.11ad, 802.11aj, 802.11ay 개정판에서 밀리미터파(millimeter wave, mmWave) 대역의 표준화로 이어지며, 이동통신 시스템의 중요한 기반으로 자리잡았다[3]-[6]. mmWave 대역은 5G 및 그 이후 세대의 통신 시스템에서 중요한 역할을 하며, 이러한 대역을 효율적으로 활용하기

위한 다양한 기술들이 연구되고 있다.

mmWave 스펙트럼은 30~300GHz의 주파수를 포함하며, 파장은 10mm에서 1mm 사이에 위치한다. mmWave 대역은 기존의 서브-6GHz 대역에 비해 훨씬 넓은 대역폭을 제공하여 초고속 데이터 전송을 가능하게 한다[7]. 이로 인해 네트워크 용량과 사용자 데이터 속도를 향상시킬 수 있다. 또한, 신호 대역이 높아짐에 따라 안테나 소자가 소형화 되어 더 많은 안테나를 단말에 집적할 수 되었는데, 이에 따라 다수의 안테나를 활용하는 다중입출력(multiple-input multiple-output, MIMO) 기술을 단말에 적용하기 용이해졌다[8]. MIMO 기술은 빔포밍을 통해 공간적 자유도(degree of freedom, DoF)를 활용함으로써 네트워크 용량을 극대화할 수 있다.

한편, 최근 들어 학계 및 산업계에서 mmWave 센서가 급속히 개발되고 큰 주목을 받고 있다[9]. mmWave는 넓은 대역폭을 제공하여 높은 센싱 감도와 정밀도를 제공한다. 통신과 동일하게 고도의 안테나 집적을 통한 MIMO 빔포밍 기술을 지원하며, 이는 방향성 센싱을 가능하게 한다. 또한, mmWave 센싱은 라이다(light detection and ranging, LiDAR) 기술에 비해 날씨나 조명 조건에 대한 강한 저항성을 갖추고 있다. 그리고, LiDAR와 같은 카메라를 기반으로한 센싱에서 발생하는 프라이버시 문제에서 비교적 자유롭다. 이렇듯 통신과 센싱은 하드웨

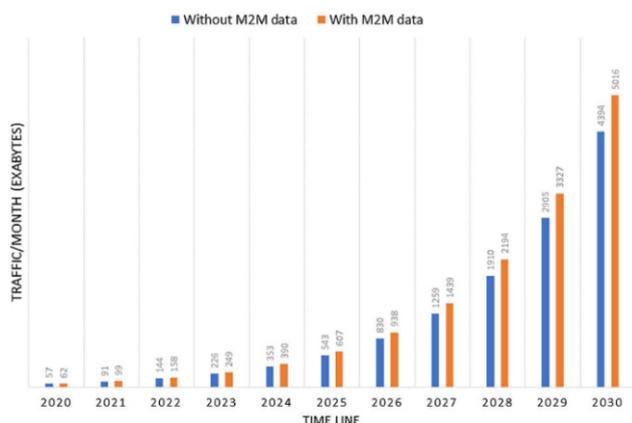


그림 1. 2030년까지 전 세계 데이터 트래픽 예측[2]

어, 신호처리 그리고 활용 주파수 측면에서 유사한 방향으로 발전하고 있다.

이러한 통신과 센싱 분야의 수렴 발전에 기인하여, 최근 통합 센싱-통신(integrated sensing and communication, ISAC) 기술이 주파수 자원 고갈, 고비용 하드웨어, 높은 에너지 소비 문제를 해결하기 위한 유망한 기술로 부상하고있다[10]. ISAC 시스템은 통신과 센싱이 동일한 하드웨어 플랫폼, 동일한 주파수 대역에서 동시에 수행되는 기술을 의미한다. ISAC은 ITU 이동 통신 부분에서 작성한 IMT-2030국제 모바일 통신 권고안에서 새로운 서비스로써 간주되고 있으며(그림 2)), Coverage 확장, 센싱 관련 역량 강화, 측위의 정밀화를 가능하게 한다(그림 3)). ISAC 시스템은 단순한 통신 목적에만 그치지 않고 광범위한 센싱 서비스를 제공하여 배치된 환경을 인식하고, 이를 통해 네트워크 운영을 최적화 할 수 있는 능력을 제공한다. 그리고, ISAC 시스템은 장치 간 정보를 공유하여 협력할 수 있도록 하여 네트워크 장치 측에서 분산된 결정을 내릴 수 있게 한다. 또한, 센싱을 통한 채널 추정 및 채널 일관성(channel coherence)을 통해 통신 성능을 향상시킨다. 이러한 기능들은 산업 전반에서 혁신적인 애플리케이션 통합을 위한 길을 열어, 기술과 상호작용

하는 방식을 변혁시킬 잠재력을 가지고 있다. 그러나, mmWave 대역에서 ISAC 시스템을 구현하는데 있어 고주파수 대역 전파의 강한 직진성과 극심한 경로 손실이 큰 문제가 되고 있다. 이를 위해 최근 재구성가능한 지능형 표면(reconfigurable intelligent surface, RIS)을 비롯한 안테나 재구성 기술이 초고주파 대역에서 wave propagation 문제를 해결할 수 있는 핵심 기술로 떠오르고 있다[12]-[15]. 본 고에서는 재구성 가능한 표면 기반 ISAC 시스템의 최신 연구 동향에 대해 살펴본다.

II. 재구성 가능한 지능형 표면 기반 ISAC 시스템

RIS는 메타 물질(metamaterial) 기반 반사 표면으로, 입사한 전파의 위상을 조정함으로써 전파 환경을 제어하며, 가시선(line-of-sight)이 존재하지 않는 상황에서 가상의 LoS (virtual LoS)을 형성하여 전파 경로를 최적화할 수 있다[13]. RIS의 주요 이점은 낮은 비용과 전력 소비로, 기존의 능동형 송수신 장비에 비해 훨씬 효율적이다. 또한, RIS는 물리적 크기가 작고 설치가 용이하여 건물의 벽, 천장, 도로 표지판 등 다양한 장소에 배치할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 RIS는 5G와 6G 시스템에서 전파 환경을 적극적으로 재구성하고, 고속 데이터 전송 및 신뢰성을 높이는 데 중요한 역할을 한다. 이에 따라 RIS와 ISAC을 결합에 대한 관심이 많아 졌다[16]. 본 절에서는 RIS 기반 ISAC 시스템의 주요 연구 주제와 최신 연구 동향에 대해 살펴본다.

1. RIS 기반 ISAC 시스템 웨이브폼, 빔포밍 디자인 설계

웨이브폼 설계는 ISAC시스템에서 핵심 기술로 평가된다. ISAC 시스템은 감지와 통신 기능을 동일한 하드웨어 플랫폼에 배치하고 동일한 주파수 대역을 공유함으로써 비용을 절감하고 주파수 효율성을 향상시킨다. 최근 ISAC 시스템에서 다중 사용자 간섭을 억제할 수 있는 RIS를 고려한 종합적인 웨이브폼, 빔포밍 설계가 활발히 연구되고 있다.

[17]에서는 RIS 기반 ISAC 시스템의 constant modulus 웨이브폼을 설계하였다. RIS의 위상 변화와 웨이브폼을 최적화를 위해 블록 좌표 하강 (block coordinate descent) 기법을 제안 하였다.

[18]에서는 RIS 기반 ISAC을 위해 감지와 통신 웨이브폼을 공동 설계하여 주파수 효율성과 에너지 효율을 극대화하는 방법을 제안하였다. 감지 웨이브폼의 공분산 행렬을 최적화하고 통신 신호를 활용해 감지 간섭을 줄이며, 통신 속도를 향상시켰다. 제한된 전력 내에서 감지와 통신 간 전력 할당을 최적화하며,

Usage scenarios

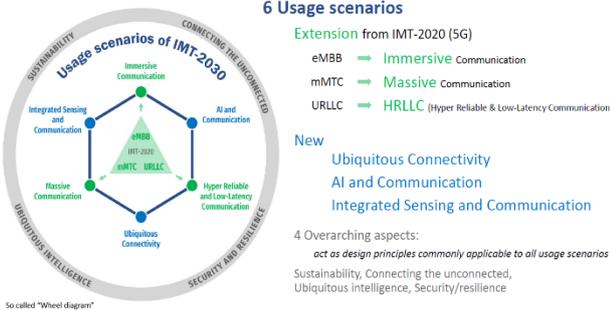


그림 2 IMT-2030 6G 사용 사례[11]

Capabilities of IMT-2030

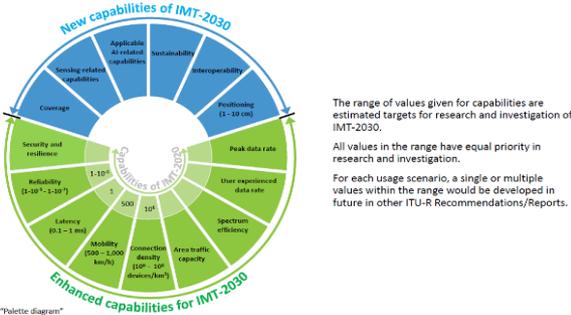


그림 3 IMT-2030 6G 핵심역량[11]

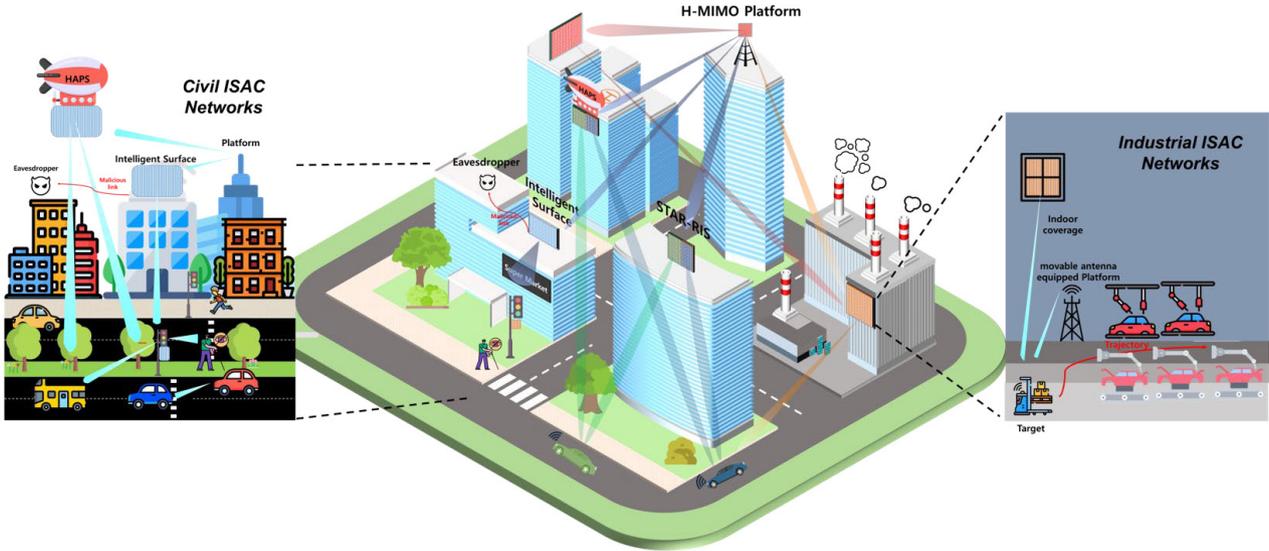


그림 4. 재구성 가능한 표면 기반 ISAC 시스템

RIS 위상 변이를 실현 가능한 값으로 변환하기 위해 localized search 알고리즘을 도입하였다.

[19]에서는 ISAC 시스템에서 동시 다중 타겟 감지와 통신 성능을 위해 빔 패턴 매칭 오류와 RIS를 활용한 다중 사용자 간섭을 최소화하는 연구를 진행하였다. 교대 최적화 알고리즘의 복잡도 문제를 해소하고자 RIS와 웨이브폼의 자연적 상수 진폭 특성을 활용한 product complex circle manifold 프레임워크를 제안하였으며, 이를 통해 RIS와 파형을 동시에 최적화하였다.

[20]은 RIS 기반 ISAC 시스템에서 RIS의 제한된 위상 변화와 웨이브폼 설계의 복잡성을 해결하기 위해, 감지의 상호 정보량 (mutual information, MI)과 통신의 총 데이터 속도를 동시에 최적화하는 문제를 제시하고, 이를 빔포머 최적화와 위상 변화 최적화로 분리한 반복 알고리즘을 개발하였다. 또한, 모든 표적에 대한 전체 채널 정보를 활용해 채널 추정 비용을 줄였으며, 크라메르-라오 하한(Cramér-Rao lower bound, CRLB) 대신 MI를 사용해 모든 타겟에 대해 전반적인 성능 향상을 이루었다.

2. RIS 기반 전이중 ISAC 시스템

RIS 기반 ISAC 시스템과 전이중(full duplex, FD) 통신의 통합은 동일한 주파수 대역에서 송수신기를 동시에 송신하고 수신할 수 있어 스펙트럼 효율성을 두 배로 늘릴 수 있는 잠재력을 가지고 있어 큰 관심을 받고 있다.

[21]에서는 RIS 기반 FD-ISAC 시스템에서 디지털, 아날로그 빔포밍을 설계하였다. 기지국의 송신 빔포밍, 단말의 송신 전력, RIS의 반사 계수는 최소 감지 전력 제약, 기지국과 단말의 송신

전력 제약을 고려하여 단말의 전송 속도를 최대화하도록 공동 최적화되었다. 이러한 non-convex한 문제를 해결하기 위해 블록 좌표 상승 (block coordinate ascent) 알고리즘을 활용하였다.

[22]에서는 RIS 기반 FD cell free MIMO 시스템에서 협력 감지 및 통신을 위한 중앙 집중식 최적화 문제를 다뤘다. Cell-free 시스템의 상호 연결된 인프라는 단일 기지국 시스템에서 발생하는 제한을 넘어 감지 능력을 향상시킬 수 있다. [22]에서 여러 개의 FD 액세스 포인트(access point)는 RIS의 도움을 받아 하향 링크 센싱 및 상향링크 통신을 수행한다. 이 문제는 하향링크 공동 센싱 빔포머, 통신-레이더 수신 빔포머, 상향링크 전송 전력, RIS 반사 계수를 최적화하는 것으로 구성되며, 이를 해결하기 위해 교차 최적화 알고리즘을 개발하였다.

3. RIS 기반 ISAC 비직교 다중접속 시스템

ISAC 시스템에서 비직교 다중접속 (non-orthogonal multiple access, NOMA)는 여러 사용자에게 동일한 주파수 자원을 할당하여 대규모 연결을 지원하고, 통신과 감지 작업을 동시에 처리할 수 있다[23][24]. NOMA는 간섭을 효과적으로 관리하고, 스펙트럼 효율성을 향상시켜 ISAC 시스템에서의 통신과 감지 성능을 최적화한다. 이를 통해 ISAC 시스템은 통신과 감지의 효율성을 높이고, 간섭을 최소화하여 더 많은 사용자와의 연결성을 높일 수 있다. ISAC NOMA 시스템에 RIS를 도입하면 간섭을 효과적으로 관리할 수 있어 통신 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, ISAC NOMA 시스템에서 RIS는 신호 위상과 진폭을 조정하여 간섭을 줄이고, 스펙트럼 효율성을 높이며, 에너지 소비를

최소화하면서 성능을 개선하는 등의 이점이 있어 많은 연구가 이루어지고 있다.

[23]에서는 RIS 기반 ISAC NOMA 시스템에서 센싱 성능을 극대화하고 최소 서비스 품질(quality of service, QoS)를 보장하는 빔패턴 이득 최적화 문제를 수립하며, 이를 해결하기 위해 IBCD (Iterative Block Coordinate Descent) 알고리즘을 제안하였다. 또한, 복잡도를 줄이기 위해 교대 최적화 알고리즘이 개발되었다.

[24]에서는 동시 전송 및 반사 재구성 가능한 지능형 표면(simultaneous transmitting and reflecting RIS, STAR-RIS) 기반 ISAC NOMA 시스템에서 최소 빔패턴 이득 극대화 문제를 설정하여 단말의 전력 할당, 능동 빔포밍, 수동 빔포밍을 최적화하였다. 이를 해결하기 위해 블록 좌표 하강법 기반 적분 행렬(integral matrix) 알고리즘과 계산 복잡도를 줄이기 위한 원소별(element-wise) 알고리즘을 제안하였다.

4. RIS 기반 ISAC 시스템 물리 계층 보안 기술

ISAC 시스템에서 통신 신호는 목표물 감지와 동시에 전달되므로, 개인 메시지가 도청자에게 쉽게 감지될 위험이 존재한다 [25][26]. 이를 해결하기 위해 물리 계층 보안(physical layer security, PLS)이 활용되며, 무선 채널의 무작위 변화를 이용해 보안을 강화한다. RIS는 ISAC 시스템에서 성능 향상 및 PLS 최적화에 중요한 역할을 하며, 전통적인 능동 안테나 배열에 비해 에너지 소비를 절감하고 배치 유연성을 제공한다. RIS는 ISAC 시스템에서 도청 신호를 최소화하는 방식으로 보안 성능을 개선한다.

[25]에서는 RIS 기반 ISAC 시스템에서 기지국의 직접 링크를 넘어서 RIS가 제공하는 DoF와 반사 링크를 활용하여 보안 통신 및 감지 능력을 향상시켰다. 또한, 단말의 QoS 요구사항, 전송 전력 제약, 센싱 신호의 강도에 관한 요구사항을 준수하는 보안 프리코딩 최적화 문제를 해결하기 위해 능동 및 수동 빔포밍을 공동 설계하였다. 복잡한 최적화 문제 해결을 간소화하고 구현 가능한 알고리즘을 개발하기 위해 고전적인 교차 최적화 기법을 활용하였으며, 이를 통해 변환된 문제들을 차례대로 successive convex 근사 알고리즘을 통해 해결하였다.

[26]에서는 RIS 기반 ISAC 시스템에서 인공 잡음의 도움을 받아, 레이더 감지에 필요한 최소 신호 대 간섭 잡음비(signal to interference plus noise ratio, SINR), 반사 계수, 총 전송 전력 제약을 고려하여, 능동 빔포밍과 수동 빔포밍을 공동 최적화함으로써 달성 가능한 합산 보안 비율(achievable sum secrecy rate)을 극대화하였다. Non convex 문제를 해결하기 위해, 테일러 근사 및 semidefinite relaxation을 사용하여 하위 문제를

재구성하고, 교차 최적화 및 연속 블록 추정 알고리즘을 적용하여 문제를 해결하였다.

5. RIS 기반 ISAC 시스템 스케줄링 기술

동일한 스펙트럼에서 통신과 감지를 수행하는 ISAC 시스템을 성공적으로 구현하기 위해서는 자원을 효율적으로 관리하고 배분하는 스케줄링 기술의 연구가 필수적이다. 그러나 아직까지 RIS 기반 ISAC 시스템의 스케줄링 기술에 대한 연구는 미진한 상태이다. [27]에서는 STAR-RIS 기반 ISAC NOMA 시스템에서 단말 페어 스케줄링, 기지국의 능동 빔포밍, STAR-RIS의 수동 빔포밍 최적화를 통해 네트워크의 평균 가중 합산 속도(average weighted sum-rate)를 최대화 하였다. Non convex 문제를 다루기 위해 concave-convex procedure 기법을 적용하였다.

III. 재구성 가능한 홀로그래픽 표면 기반 ISAC 시스템

MIMO 기술에서 안테나 간격은 일반적으로, 인접한 안테나 간의 상호 간섭으로 인해 반파장을 유지해야 한다. 이러한 제한은 주어진 크기의 안테나 배열에 배치할 수 있는 안테나 요소 수를 제한하여 안테나 이득과 ISAC 성능을 저하시킨다. 최근에는 메타물질 안테나가 이러한 반파장 제한을 극복할 수 있는 유망한 솔루션으로 개발되었다. 메타물질 안테나의 고유한 구조

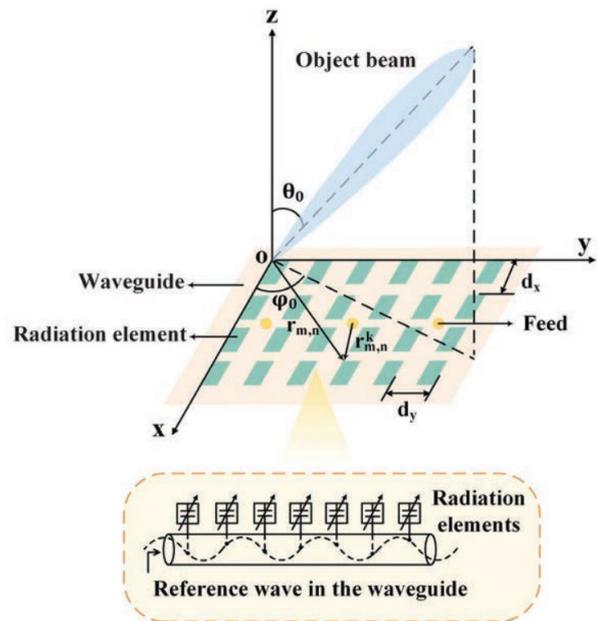


그림 5. 재구성가능한 홀로그래픽 표면[14]

는 방사 요소의 크기와 간격을 반파장보다 훨씬 작게 설계할 수 있도록 하여 우수한 빔 조향 성능을 제공한다[14]. 본 절에서는 대표적인 메타물질 안테나인 재구성 가능한 홀로그래픽 표면 (reconfigurable holographic surface, RHS) 기반 ISAC 시스템의 연구 동향에 대해 살펴본다.

[28]에서는 RHS 기반 ISAC 시스템에서 타겟 방향으로 빔패턴 이득을 최대화하며 방향 간 상호 상관을 최소화하는 문제를 정하고, 이를 효율적으로 해결하기 위한 홀로그래픽 빔포밍 최적화 알고리즘을 제안하였다.

[29]에서는 다중 대역(multi-band) RHS 기반 ISAC 시스템을 제안하였다. 다중 대역을 채택함에 따라 아날로그 및 디지털 빔포밍의 제어 변수의 수가 기하급수적으로 증가하는 문제를 해결하기 위해 CRLB의 폐쇄형 수식을 도출하고, 디지털 및 아날로그 빔포밍 변수를 교대로 최적화하는 효율적인 블록 좌표 하강 알고리즘을 제안하였다.

IV. 이동형 안테나 기반 ISAC 시스템

최근 이동형 안테나 시스템(movable antenna, MA)이 저비용으로 안테나를 재구성 할 수 있는 기술로 떠오르고 있다[15]. 고해상도의 유연한 하드웨어 아키텍처를 통해 MA 안테나는 모양과 위치를 변경하여 편파, 작동 주파수, 방사 패턴 등 다양한 특성을 재구성할 수 있다. MA 시스템은 안테나의 위치를 조정함으로써 추가적인 공간적 자유도를 제공하여 ISAC시스템 성능을 향상시킬 수 있다[30][31].

[30]에서는 이동형 안테나의 일종인 유체 안테나(fluid antenna, FA)를 활용한 ISAC 시스템을 제안하였다. 송신 전력 제약 조건 하에서 기지국과 통신 단말의 FA 위치를 공동으로 설계하여 센싱 빔패턴 이득 및 통신 속도를 최대화 하였다. Non-convex 문제를 해결하기 위해 교대 최적화 알고리즘을 활용하였으며, 테일러 급수 전개를 통해 목적 함수와 제약 조건의 하한을 구성하여 non-convex 최적화 문제를 convex 문제로 변환함으로써 유체 안테나의 위치를 결정할 수 있게 하였다.

[31]에서는 FA를 활용한 다중 사용자 MIMO-ISAC 시스템에서의 포트 선택 및 사전 부호화 최적화에 대한 연구가 진행되었다. 심층 강화 학습을 활용하여 비선형 최적화 문제를 해결하는 학습 기반 접근 방식이 제안되었다. 또한, 제약 조건을 반영한 심층 학습 네트워크가 설계되어 ISAC 사전 부호화 설계를 효과적으로 최적화되었다. 부분 채널 상태 정보(channel state information, CSI)만 사용할 수 있는 상황에서도 성능을 보장하기 위해 마스크 자동인코더(masking autoencoder)를 기반으로

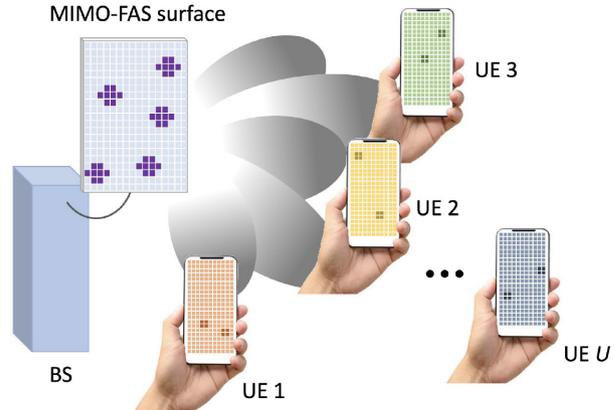


그림 6. 유체 안테나 기반 MIMO 시스템[15]

한 예측 기법이 제안되었다.

V. 결론 및 시사점

본 고에서는 재구성 가능한 표면 기반 통합 센싱-통신(integrated sensing and communication, ISAC) 시스템의 연구 동향에 대해 살펴보았다. ISAC 시스템은 통신과 센싱을 동일한 하드웨어와 주파수 대역에서 동시에 수행함으로써 주파수 자원 고갈, 고비용 하드웨어, 높은 에너지 소비 문제를 해결할 수 있는 유망한 기술로 많은 연구가 이루어지고 있으며, 특히 ISAC과 재구성 가능한 표면의 결합은 ISAC이 고주파 대역에서 동작하기 위한 핵심 기술로 다루어지고 있다. 따라서 재구성 가능한 표면 기반 ISAC 시스템은 미래 통신 시스템에서 중요한 역할을 할 것이며, 향후 다양한 기술들의 융합을 통해 성능과 효율성이 더욱 향상될 것으로 전망된다. 재구성 가능한 표면 기반 ISAC 시스템이 상용화될 경우 통신 및 센싱 기술의 새로운 패러다임을 제시할 것으로 기대된다.

Acknowledgement

This research was supported in part by the MSIT(Ministry of Science and ICT), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program(IITP-2024-RS-2024-00436406) supervised by the IITP(Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation) and in part by the Institute for Information and Communications

Technology Promotion (IITP) Grant funded by the Korea Government (MSIP, Development of Cube Satellites Based on Core Technologies in Low Earth Orbit Satellite Communications) under Grant RS-2024-00396992.

참고 문헌

- [1] Y. Lu and X. Zheng, "6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 19, Sep. 2020, Art. no. 100158.
- [2] Davies R. W. "The Data Encryption standard in perspective," *Computer Security and the Data Encryption Standard*, pp. 129-IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 24, no. 2, pp. 1072-1116, 2nd Quart. 2022.
- [3] B. van Berlo, A. Elkelany, T. Ozcelebi and N. Meratnia, "Millimeter wave sensing: A review of application pipelines and building blocks," *IEEE Sensors J.*, vol. 21, no. 9, pp. 10332-10368, May 2021.
- [4] Wireless LAN Working Group. (Dec. 2012). 802.11ad-2012 IEEE Standards Association. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_11ad-2012.html
- [5] Wireless LAN Working Group. (Oct. 2016). 802.11aj-2018 IEEE Standards Association. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_11aj-2018.html
- [6] Wireless LAN Working Group. (Feb. 2019). P802.11ay IEEE Standards Association. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/project/802_11ay.html
- [7] H. Song, X. Fang and Y. Fang, "Millimeter-wave network architectures for future high-speed railway communications: Challenges and solutions," *IEEE wireless commun.*, vol. 23, no. 6, pp. 114-122, Dec. 2016.
- [8] M. Li, Z. Wang, H. Li, Q. Liu and L. Zhou, "A hardware-efficient hybrid beamforming solution for mmWave MIMO systems," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 1, pp. 137-143, Feb. 2019.
- [9] J. Zhang et al., "A survey of mmWave-based human sensing: technology, platforms and applications," *IEEE Commun. Surv. & Tut.*, vol. 25, no. 4, pp. 2052-2087, Fourthquarter 2023.
- [10] A. Kaushik et al., "Integrated sensing and communications for IoT: Synergies with 6G technology enablers," *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 7, no. 5, pp. 136-143, September 2024.
- [11] SWG IMT-2030, Framework and overall objectives of the future development of IMT. FRAMEWORK for 2030 and Beyond, July 2023.
- [12] Y. Liu et al., "STAR: Simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 6, pp. 102-109, Dec. 2021.
- [13] C. Pan et al., "Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 6, pp. 14-20, Jun. 2021.
- [14] R. Deng et al., "Reconfigurable holographic surfaces for future wireless communications," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 6, pp. 126-131, Dec. 2021.
- [15] K. -K. Wong, K. -F. Tong and C. -B. Chae, "Fluid Antenna System—Part II: Research Opportunities," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 8, pp. 1924-1928, Aug. 2023
- [16] M. I. Ismail, A. M. Shaheen, M. M. Fouda and A. S. Alwakeel, "RIS-assisted integrated sensing and communication Systems: Joint reflection and beamforming Design," *IEEE Open J. commun. Soc.*, vol. 5, pp. 908-927, 2024.
- [17] K. Zhong, J. Hu, C. Pan, M. Deng, and J. Fang, "Joint waveform and beamforming design for RIS-aided ISAC systems," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 30, pp. 165-169, 2023.
- [18] J. Chen, K. Wu, J. Niu, Y. Li, P. Xu and J. Andrew Zhang, "Spectral and energy efficient waveform design for RIS-assisted ISAC," *IEEE Trans. Commun.*, Jul. 2024. (early access)
- [19] K. Zhong, J. Hu, J. Liu, D. An, C. Pan, K. C. Teh, X. Yu, and H. Li, "P2c2m: Parallel product complex circle manifold for ris-aided isac waveform design," *IEEE Trans. Cogn. Commun. & Netw.*, pp. 1-1, 2024
- [20] H. Zhang, "Joint waveform and phase shift design for RIS-assisted integrated sensing and communication

based on mutual information," IEEE Commun. Lett., vol. 26, no. 10, pp. 2317-2321, Oct. 2022.

[21] D. Wang, M. Wang, P. Zhu, J. Li, J. Wang, and X. You, "Performance of network-assisted full-duplex for cell-free massive MIMO," IEEE Trans. Commun., vol. 68, no. 3, pp. 1464-1478, Mar. 2020.

[22] A. Abdelaziz Salem, M. A. Albreem, K. Alnajjar, S. Abdallah and M. Saad, "Integrated cooperative sensing and communication for RIS-enabled full-duplex cell-free MIMO systems," IEEE Trans. Commun., Nov. 2024. (early access)

[23] J. Zuo, Y. Liu, C. Zhu, Y. Zou, D. Zhang and N. Al-Dhahir, "Exploiting NOMA and RIS in integrated sensing and communication," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 72, no. 10, pp. 12941-12955, Oct. 2023

[24] G. Sun, Y. Zhang, W. Hao, Z. Zhu, X. Li, and Z. Chu, "Joint beamforming optimization for STAR-RIS aided NOMA ISAC systems," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 13, no. 4, pp. 1009-1013, Apr. 2024.

[25] C. Jiang, C. Zhang, C. Huang, J. Ge, M. Debbah and C. Yuen, "Exploiting RIS in secure beamforming design for NOMA-assisted integrated sensing and communication," IEEE Internet Things J., vol. 11, no. 17, pp. 28123-28136, Sept. 2024.

[26] C. Jiang, C. Zhang, C. Huang, J. Ge, J. He and C. Yuen, "Secure beamforming design for RIS-assisted integrated sensing and communication systems," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 13, no. 2, pp. 520-524, Feb. 2024.

[27] Y. Xu, F. Wu, Y. Zou, D. Yang and Y. Liu, "Pair scheduling and beamforming in STAR-RIS empowered ISAC networks," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 73, no. 11, pp. 17732-17736, Nov. 2024.

[28] Zhang et al., "Holographic integrated sensing and communication," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 40, no. 7, pp. 2114-2130, Jul. 2022.

[29] J. Hu, Z. Chen, and J. Luo, "Multi-band reconfigurable holographic surface based ISAC systems: Design and optimization," in Proc. IEEE Int. Conf. Commun., Rome, Italy, Jun. 2023.

[30] L. Zhou, J. Yao, M. Jin, T. Wu and K. -K. Wong,

"Fluid antenna-assisted ISAC systems," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 13, no. 12, pp. 3533-3537, Dec. 2024.

[31] C. Wang et al., "Fluid antenna system liberating multiuser MIMO for ISAC via deep reinforcement learning," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 23, no. 9, pp. 10879-10894, Sept. 2024.

약 력



백주영

2024년 충남대학교 전자공학과 학사
2024년~현재 아주대학교 전자공학과 석사
관심분야: 무선통신, 무선랜 시스템, 기하적 전송



정방철

2002년 아주대학교 전자공학부 학사
2004년 KAIST 전기전자공학과 석사
2008년 KAIST 전기전자공학과 박사
2008년~2009년 KAIST IT융합연구소 연구연구원
2009년~2010년 KAIST IT융합연구소 연구교수
2010년~2014년 경상국립대학교 정보통신공학과 조교수
2014년~2015년 경상국립대학교 정보통신공학과 부교수
2015년~2025년 충남대학교 전자공학과 정교수
2025년~현재 아주대학교 전자공학과 정교수
관심분야: 무선통신, 통계적 신호 처리, 정보이론, 압축센싱, 이동통신, 주파수 공유