

ISAC 시스템을 위한 능동 RIS와 이동형 안테나의 공동 최적화

신승석, 조인식, 김규남*, 문상미**, 황인태
전남대학교, *한국알프스, **나사렛대학교

ssskit7@naver.com, Cho-insik@jnu.ac.kr, kyunam.kim@kr.alps.com, moonsm@kornu.ac.kr,
and hit@jnu.ac.kr

Joint Optimization of Active Reconfigurable Intelligent Surfaces and Movable Antennas for Integrated Sensing and Communication Systems

Seungseok Sin, Insik Cho, Kyunam Kim*, Sangmi Moon**, and Intae Hwang
Chonnam National Univ., *Alps Electric Korea Co., Ltd., **Korea Nazarene Univ.

요약

차세대 6G 무선 통신에서는 통신과 센싱 기능을 통합하는 통합 센싱-통신 시스템(Integrated Sensing and Communication, ISAC)이 핵심 기술로 주목받고 있다. 한편, 이동형 안테나(Movable Antenna, MA)는 공간적 자유도 확장과 채널 품질 향상을 위한 유망한 기술로 평가된다. 본 논문에서는 MA 위치를 최적화하여 레이더 감지 성능을 극대화하는 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서는 MA의 위치를 최적화하기 위해 MA 위치에는 1차 테일리 근사 기반 SCA 방법을 사용한다. 시뮬레이션을 통해 MA의 최적화를 통해 기존 고정형 안테나 대비 높은 Radar SINR 향상을 달성함을 확인하였다.

I. 서 론

차세대 6G 통신에서는 통신과 센싱 기능을 통합하여 주파수 자원을 효율적으로 활용하는 통합 센싱과 통신 시스템 (Integrated Sensing and Communication, ISAC)이 핵심 기술로 부상하고 있다 [1], [2]. ISAC은 동일한 주파수 대역과 하드웨어를 통해 고해상도 센싱과 고속 통신을 동시에 수행함으로써 스펙트럼 효율과 에너지 효율을 동시에 향상시키는 혁신적인 패러다임이다 [1], [2]. 한편, 재구성 가능한 지능형 표면 (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) 기술은 무선 전파 환경을 능동적으로 제어하여 추가적인 공간 자유도를 확보함으로써 통신 및 센싱 성능을 향상시킬 수 있다. RIS는 다수의 수동 위상 제어 소자로 구성된 메타 표면으로서, 반사 신호의 위상과 진폭을 정교하게 조절함으로써 신호 세기 증대, 다중 사용자 간섭 완화, 목표 탐지 및 추적 정밀도 향상 등의 장점을 제공한다. 이러한 특성 덕분에 RIS는 6G 시대의 ISAC 핵심 보조 기술로 주목받고 있다. 그러나 기존 수동 (passive) RIS는 반사 신호가 두 번의 경로 손실을 겪는 곱 페이딩 (multiplicative fading) 문제로 인해 성능 개선 폭이 제한적이며, 강한 직진 경로 (LoS)가 존재할 경우 용량 이득이 거의 발생하지 않는 한계가 있다 [3]. 이를 보완하기 위해서 [4]에서는 내부에 저잡음 증폭기를 탑재하여 입사 신호를 증폭 후 재방사하는 능동 (Active) RIS를 활용하여 수동 RIS의 근본적인 한계를 극복할 수 있는 대안을 제안하였다. 최근 연구에서는 능동 RIS를 적용한 ISAC 시스템이 수동 RIS 대비 Radar SINR이 약 7 ~ 8 dB 수준으로 향상되었다 [7]-[9]. 한편, 기존 무선 시스템의 기지국 (Base Station, BS) 안테나 배열은 고정된 위치에 설치되어 있어 채널의 공간적 변화 (spatial variation)를 능동적으로 활용하기 어렵다 [3]. 특히 밀리미터파 (mmWave) 등 고주파 대역에서는 경로 수가 적고 차단에 취약하여 LoS 경로가 사라질 경우 통신 및 센싱 품질이 급격히 저하되는 문제가 발생한다 [3]. 이를 해결하기 위해 제안된 이동형 안테나 (Movable Antenna, MA) 기술은 안테나의 위치를 기계적으로 조정하여 기하학적 다이버시티를 확보함으로써 채널 이득을 향상시키고 공간적 제약을 완화할 수 있다 [4]-[6]. 이에 본 논문에서는 MA를 결합한 새로운 ISAC 시스템 구조를 제안하고, MA의 위치를 최적화 (optimization) 함으로써 통신과 센싱 성능을 동시에 향상시키는 방안을

제시한다.

II. 본론

1. 시스템 모델 및 채널 모델

본 논문에서는 능동 RIS와 MA가 결합된 ISAC 시스템을 고려한다. 그림 1과 같이 시스템은 ISAC BS, UAV RIS, 레이더 표적, 그리고 복수의 단일 안테나 사용자(UAV-UE)로 구성된다. 편의상 ISAC BS는 BS,

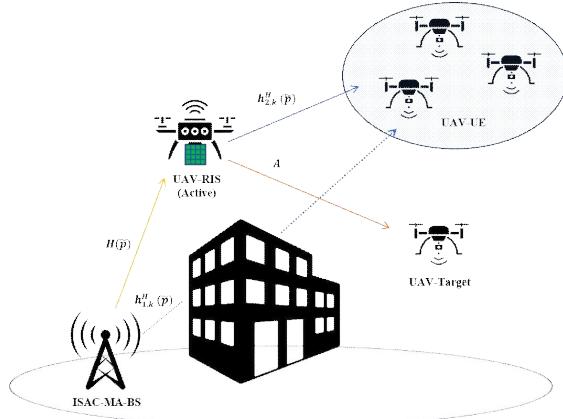


그림 1. 능동 RIS 와 이동형 안테나 기반 ISAC 시스템 모델

Fig. 1. System model of the Active RIS and MA-aided ISAC system.

UAV RIS는 RIS로 표기한다. BS는 M 개의 MA를 보유하며, 안테나 위치를 사전 정의된 영역 내에서 조절할 수 있어 채널 환경을 능동적으로 개선할 수 있다. 이를 통해 BS는 K 명의 사용자에게 통신 신호를 송신함과 동시에 레이더 표적에 대한 탐지 신호를 전송한다. BS와 표적 간 직LoS 경로는 차단되어 있다고 가정한다. 이를 보완하기 위해 N 개의 반사 소자를 갖는 Active RIS를 UAV에 부착한다. Active RIS는 각 반사 소자에 전력 증폭기를 탑재하고 있어, 수신 신호의 위상 조절뿐 아니라 증폭도 가능하다. 이를 통해 4-hop 경로에서 발생하는 곱셈형 감쇠 (multiplicative fading) 문제를 효과적으로 완화할 수 있다. ISAC 기지국의 송신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{W}_r s + \mathbf{W}_c c = [\mathbf{W}_r, \mathbf{W}_c] \begin{bmatrix} s^T \\ c^T \end{bmatrix} = \mathbf{Wx} \quad (1)$$

여기서 $s \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 레이더 전용 신호이며, $c \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 는 K 명의 단일 안테나 사용자에게 송신되는 정보 신호를 나타낸다. $\mathbf{W}_r \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 과 $\mathbf{W}_c \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 는 각각 레이더 및 통신 범포밍 행렬이며, $\mathbf{W} = [\mathbf{W}_r, \mathbf{W}_c] \in \mathbb{C}^{M \times (M+K)}$ 는 전체 송신 범포밍 행렬을 의미한다. 레이더 신호 s 는 의사 난수 부호화를 통해 생성되며 $E[\mathbf{s}\mathbf{s}^H] = \mathbf{I}_M$ 을 만족한다. 정보 신호 c 는 $CN(0, \mathbf{I}_K)$ 의 복소 가우시안 분포를 따른다. 따라서 송신 과정의 공분산 행렬은 다음 수식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = \mathbf{W}\mathbf{W}^H = R_c + \sum_{k=1}^K \mathbf{R}_k \quad (2)$$

또한 본 논문에서는 [7]의 평면 원거리 응답(planar far-field response) 모델을 사용하며, 채널 응답은 MA의 위치와 전파 환경에 따라 달라진다. [7]에 따르면, ISAC BS-UAV RIS 링크에서 위치 $\mathbf{p} = [x, y]^T$ 에 있는 MA의 필드응답벡터는 수식(3)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{g}(\mathbf{p}) = [e^{j2\frac{\pi}{\lambda}\rho_1^i(\mathbf{p})}, \dots, e^{j2\frac{\pi}{\lambda}\rho_m^i(\mathbf{p})}]^T \in \mathbb{C}^{L_i \times 1} \quad (3)$$

여기서 $\rho_t^j(\mathbf{p}) = x \sin\theta_j^t \cos\phi_j^t + y \cos\theta_j^t$ 는 기준점 대비 j 번째 송신 경로의 추가 전파 거리 차이를 나타낸다. ISAC BS-UAV RIS 링크에서 모든 MA의 필드응답행렬은 수식(4)과 같이 주어지며, 사용자 k 에 대한 ISAC BS-UAV UE 링크의 필드응답행렬은 수식(5)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{G}(\tilde{\mathbf{p}}) = [\mathbf{g}(\mathbf{p}_1), \mathbf{g}(\mathbf{p}_2), \dots, \mathbf{g}(\mathbf{p}_M)] \in \mathbb{C}^{L_i \times M} \quad (4)$$

$$\mathbf{G}_k(\tilde{\mathbf{p}}) = [\mathbf{g}_k(\mathbf{p}_1), \mathbf{g}_k(\mathbf{p}_2), \dots, \mathbf{g}_k(\mathbf{p}_M)] \in \mathbb{C}^{L_k \times M} \quad (5)$$

2. 능동 RIS 및 이동형 안테나 최적화

본 절에서는 앞서 언급한 최적화 문제의 복잡성을 완화하기 위해, 우선 목적 함수를 보다 다루기 쉬운 형태로 재공식화한다. 이후 AO 기반의 반복 알고리즘을 적용하여 ISAC Active RIS 반사 행렬 \mathbf{Q} , 그리고 MA의 위치 벡터 $\tilde{\mathbf{p}}$ 를 단계적으로 최적화한다. 본 절에서는 BS 범포밍 행렬 \mathbf{W} 와 MA 위치 $\tilde{\mathbf{p}}$ 가 고정된 상태에서 Active RIS 행렬 \mathbf{Q} 를 최적화한다. 본 절의 목적은 Radar SINR을 최대화하면서 통신 사용자 QoS 제약과 RIS 송신 전력 제약을 동시에 만족하는 \mathbf{Q} 를 구하는 것이다. 하지만, 이 문제는 \mathbf{Q} 에 대해 4차(quartic) 항을 포함하므로 비볼록(non-convex) 형태를 가지며, 직접적인 최적화가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 단조 수렴이 보장되는 근사화(MM) 및 준볼록화(SDR) 변환 절차를 적용한다. 또한 다음 과정으로 MA의 위치 벡터 $\tilde{\mathbf{p}}$ 에 대하여 레이더 SINR을 최적화 하는 방법을 다룬다. Radar SINR을 MA에 의한 식으로 다시 표현하면 다음과 같아 같다.

$$f(\tilde{\mathbf{p}}) = Tr(B(\tilde{\mathbf{p}})R_iB(\tilde{\mathbf{p}})^H\mathcal{J}(\tilde{\mathbf{p}})^{-1}) \quad (6)$$

수식(6)에서 볼 수 있듯이 $f(\tilde{\mathbf{p}})$ 는 $B(\tilde{\mathbf{p}})$ 와 $\mathcal{J}(\tilde{\mathbf{p}})$ 가 모두 안테나의 위치 $\tilde{\mathbf{p}}$ 에 비선형적으로 의존하므로 비볼록 함수 형태를 갖는다. 이를 직접적으로 최적화하는 것은 어렵기 때문에 본 연구에서는 MM 하한 근사와 SCA 기법을 결합하여 문제를 반복적으로 풀 수 있는 강오목 형태로 완화한다. 먼저, MM 하한을 적용하기 위해 현재 반복 1번에서의 목적함수를 다음

수식(7)과 같은 형태로 근사한다.

$$\begin{aligned} \tilde{f}(\tilde{\mathbf{p}}|\tilde{\mathbf{p}}^i) &= 2\Re Tr(X_i^H\mathcal{J}_i^{-1}X(\tilde{\mathbf{p}})) - Tr(\mathcal{J}_i^{-1}X_iX_i^H\mathcal{J}_i^{-1}\mathcal{J}(\tilde{\mathbf{p}})) \end{aligned} \quad (7)$$

수식(7)은 $f(\tilde{\mathbf{p}})$ 의 현재점에서 값과 기울기를 동일하게 유지하면서 단조 수렴을 보장하는 하한으로 작용한다. $B(\tilde{\mathbf{p}}) = H((\tilde{\mathbf{p}})^HSH(\tilde{\mathbf{p}}))$ 라 두면, MA 위치의 변화 $\Delta\tilde{\mathbf{p}}$ 에 따른 $B(\tilde{\mathbf{p}})$ 의 1차 근사는 다음 수식 (8)과 같다.

$$dB = (dH)^H SH_i + H_i^H S(dH) \quad (8)$$

여기서 $S = Q^H AQ$ 는 Active RIS 반사 행렬 Q 타겟 응답 행렬 A 를 포함하는 복합 계수 행렬이다. 이를 식 (7)에 대입하면 다음 수식(9)과 같은 1차 선형화식을 얻을 수 있다.

$$2\Re \{ Tr(X_i^H\mathcal{J}_i^{-1}X(\tilde{\mathbf{p}})) \} \approx 2\Re \{ Tr((G_i^{(i)})^H \Delta H) \} \quad (9)$$

여기서 $G_i^{(i)} = SH_i(WK^H + KW^H)$ 이며, $K = \mathcal{J}_i^{-1}X_i$ 로 정의된다. 체인 룰을 이용하면, MA 위치 변화에 따른 채널 변화는 $\Delta H = F^H \Sigma \Delta G$ 로 표현되며, MA의 m 번째 안테나가 이동하는 경우 수식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta G = [0, \dots, J_m^{(i)} \Delta p_m, \dots, 0] \quad (10)$$

따라서 식 (11)은 각 MA 위치 변화 Δp_m 에 대해 수식(12)과 같이 전개된다.

$$\Re \{ Tr((G_i^{(i)})^H \Delta H) \} = \sum_{m=1}^M (g_{I,m}^{(i)})^T \Delta p_m \quad (11)$$

$$g_{I,m}^{(i)} = Re(J_m^{(i)})^H (\Sigma^H F G_i^{(i)})(:,m) \quad (12)$$

여기서 $J_m^{(i)}$ 은 m 번째 MA 위치에 대한 채널 행렬의 편미분으로, 해당 안테나의 공간 감도를 나타낸다.

한편, 간접 및 잡음 항의 선형화에서도 유사한 과정이 적용된다. 이를 통해 도출 되는 보조 항의 기울기를 $G_{II}^{(i)}$ 로 정의하면, 전체 기울기 벡터는 수식 (13)과 같이 표현된다.

$$h_m^{(i)} = 2(g_{I,m}^{(i)} - g_{II,m}^{(i)}) \quad (13)$$

$G_{II}^{(i)}$ 는 간접 공분산 행렬 $\mathcal{J}(\tilde{\mathbf{p}})$ 의 변화율에 해당하며, 잔류 자기 간섭과 열 잡음 항의 위치 민감도를 보정하는 역할을 한다. 이러한 전개를 바탕으로 surrogate 함수의 강오목 하한은 다음 수식 (14)와 같이 표현된다.

$$f_{SCA}(\tilde{\mathbf{p}}|\tilde{\mathbf{p}}^i) = \sum_{m=1}^M (h_m^{(i)})^T \Delta p_m - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \delta_m^{(i)} \|\Delta p_m\|_2^2, \quad (14)$$

여기서 $\delta_m^{(i)} = 2(G_{I,m}^{(i)} - G_{II,m}^{(i)})$ 은 각 블록의 Lipschitz 상수로, 반복 안정성을 보장하기 위한 각종 파라미터이며, 위 문제는 블록 QP 형태로 정리되므로 CVX 등의 최적화 도구를 통해 안정적으로 해를 구할 수 있다.

3. 모의실험 성능 분석

이 절에서는 제안된 MA 및 RIS 기반 ISAC 시스템의 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션 결과를 제시한다.

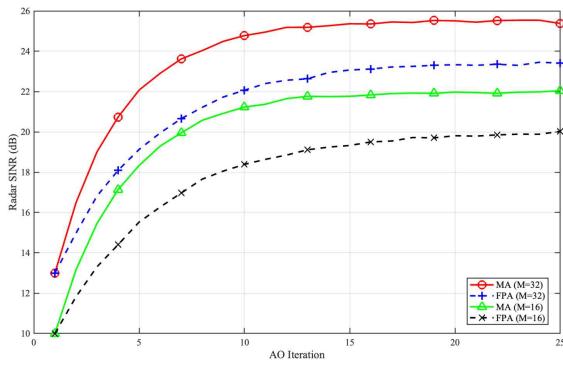


그림 2. MA와 FPA 방식의 수렴 특성 비교

Fig. 2. Convergence behavior comparison between MA and FPA schemes.

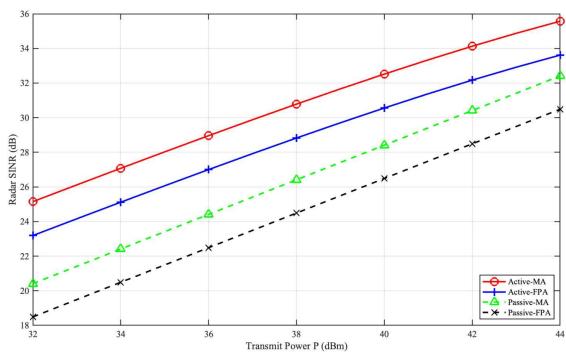


그림 3. 능동과 수동 RIS 조합에 따른 MA 와 FPA의 Radar SINR 성능 비교

Fig. 3. Radar SINR performance comparison among MA and FPA with active and passive RIS configurations.

그림 2는 제안한 MA 기반 최적화와 FPA 방식의 수렴 특성을 안테나 개수별로 비교한 결과를 보여준다. MA 방식은 초기 반복(iteration) 단계부터 FPA보다 높은 Radar SINR을 유지하며 약 15회 이내에 안정적인 수렴값에 도달한다. 특히 $M = 16$ 환경에서도 MA는 수렴 과정 전반에서 FPA를 지속적으로 상회하며, 최종적으로 $M = 32$ 의 FPA와 유사한 수렴값을 달성한다. 이는 MA가 안테나 개수의 한계를 보완할 수 있는 효과적인 수단임을 의미하며, 수렴 속도 측면에서도 우수한 특성을 보인다. 이러한 결과는 실시간 ISAC 환경에서 빠른 최적화가 요구되는 경우 큰 장점이 될 수 있다.

그림 3은 송신 전력 변화에 따른 Active-MA, Active-FPA, Passive-MA, Passive-FPA 네 가지 조합의 Radar SINR 성능을 비교한 결과이다. 모든 경우에서 송신 전력 증가에 따라 SINR이 선형적으로 증가하며, 이는 전력과 SINR 간의 로그 스케일 관계를 반영한 것이다. 네 가지 조합 중 Active-MA 구조가 전력 전 구간에서 가장 우수한 성능을 보였으며, Active-FPA, Passive-MA, Passive-FPA 순으로 성능이 결정되는 뚜렷한 계층 구조가 나타났다. Active RIS는 Passive RIS 대비 약 $4 \sim 5 dB$ 의 이득을 제공하며, MA는 이와 별개로 약 $2 dB$ 추가 이득을 제공한다. 따라서 Active-MA 구조는 높은 SINR이 요구되는 ISAC 환경에서 특히 강력한 성능을 기대할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 비지상 네트워크 환경에서 레이더 센싱 성능 향상을 위해 능동 RIS와 이동형 안테나(MA)를 결합한 ISAC 시스템을 분석하였다. 이동형 안테나의 위치를 적응적으로 조정하기 위해 SCA 기반 최적화 프레

임워크를 설계하였으며, 이를 통해 통신 제약 조건을 만족하면서 레이더 SINR을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 보였다. 시뮬레이션 결과, 이동형 안테나를 적용한 시스템은 고정형 안테나 배열 대비 일관되게 우수한 성능을 보였으며, 더 적은 안테나 요소 수로도 유사한 센싱 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 능동 RIS 기반 ISAC 시스템에서 이동형 안테나가 핵심적인 자유도로서 중요한 역할을 수행함을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENT

"이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2026-RS-2022-00156287)." "본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 학석사연계ICT핵심인재양성사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2026-RS-2022-00156385)." "이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00220985), (RS-2023-00246381) 및 (RS-2024-00333826)."

참 고 문 헌

- [1] F. Liu, Y. Cui, C. Masouros, J. Xu, T. X. Han, Y. C. Eldar, and S. Buzzi, "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] S. Moon, C.-G. Lee, and I. Hwang, "Secrecy rate maximization for RIS-assisted UAV-ISAC systems," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 61, no. 11, pp. 3~10, Nov. 2024, doi: 10.5573/ieie.2024.61.11.3
- [3] X. Ma, Z. Gao, F. Gao, and M.-S. Alouini, "Model-driven deep learning based channel estimation and feedback for millimeter-wave massive hybrid MIMO systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 8, pp. 2388–2406, Aug. 2021.
- [4] H. Lu, Y. Zeng, S. Jin, and R. Zhang, "Enabling movable antenna enhanced wireless communications: Basic modeling and beamforming," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 5, pp. 3030–3044, May 2023.
- [5] H. Lu, Y. Zeng, S. Jin, and R. Zhang, "Movable antenna-enhanced wireless communication systems: Joint optimization and prototype development," *IEEE Trans. Commun.*, early access, 2024. doi: 10.1109/TCOMM.2024.3402817.
- [6] Y. Zhang, H. Lu, Y. Zeng, and S. Jin, "Three-dimensional movable antenna for millimeter wave communications: System modeling and performance analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 4, pp. 3091–3105, Apr. 2024.
- [7] L. Zhu, W. Ma, and R. Zhang, "Modeling and performance analysis for movable antenna enabled wireless communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, pp. 6234–6250, Jun. 2024.