

6G OFDM-ISAC 시스템을 위한 다중 RIS 기반 사용자 위치 추정 기법

이우진, 이영석, 정방철

아주대학교

dldnws2136@ajou.ac.kr, youngseoklee@ajou.ac.kr, bcjung@ajou.ac.kr

Multiple RIS-Aided User Localization for 6G OFDM-ISAC Systems

Woojin Lee, Young-Seok Lee, and Bang Chul Jung

Ajou University

요약

본 논문에서는 다중 재구성 지능형 표면(reconfigurable intelligent surface: RIS)을 활용한 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반 사용자 장치(user equipment: UE) 위치 추정 기법을 제안한다. 구체적으로, 시간 슬롯별 RIS 반사 패턴을 통해 각 RIS로부터 반사된 신호 성분을 분리하고, 분리된 OFDM 신호에 정합 필터링(matched filtering)을 적용하여 각 RIS 경로의 지연 시간을 추정한다. 이후 추정된 지연 시간과 기지국-RIS 간 사전 거리 정보를 이용하여 RIS-UE 거리를 계산하고, 삼변 측량법을 통해 UE의 2차원 위치를 추정한다. 모의실험을 통해 송신 전력, OFDM 대역폭, RIS 반사 소자 수에 따른 위치 추정 성능을 평균 제곱근 오차(root mean squared error: RMSE) 관점에서 분석한다.

I. 서론

차세대 무선 네트워크에서는 고속 통신뿐만 아니라 사용자 장치(user equipment: UE)의 위치 정보를 활용한 위치 기반 서비스와 통합 센싱 및 통신(integrated sensing and communication: ISAC) 기술의 중요성이 증가하고 있다. 그러나, 실내 및 도심 환경에서는 장애물로 인해 기지국(base station: BS)과 UE 사이의 가시선(line-of-sight: LoS) 경로가 차단될 수 있으며, 이로 인해 기존 위치 추정 기법의 정확도가 저하될 수 있다 [1]. 이러한 문제를 완화하기 위해 전파의 반사, 위상, 전파 경로를 인위적으로 조절함으로써 무선 채널을 재구성할 수 있는 재구성가능한 지능형 표면(reconfigurable intelligent surface: RIS)이 유망 기술로 주목받고 있다. 나아가 RIS는 기존 BS 또는 UE 중심의 센싱 한계를 보완하고, 제어 가능한 반사 경로를 통해 탐지 및 위치 추정 정확도를 향상시킬 수 있어 차세대 무선 네트워크의 핵심 응용 기술로 활발히 연구되고 있다 [2].

직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM)은 넓은 대역폭과 다중 부반송파 구조를 통해 전파 경로 간 시간 지연 차이를 주파수 영역 채널 응답의 위상 변화로 반영할 수 있어, 통신 과정을 그대로 활용한 거리 추정 및 위치 추정에 적합하다. 이에 따라 RIS를 활용한 OFDM 기반 채널 추정 및 사용자 위치 추정 기법 [4]과, RIS 기반 ISAC 환경에서 위치 추정, 채널 추정, 파일럿 최적화를 함께 고려한 기법이 제안되었다 [5]. 그러나 기존 연구들은 RIS를 주로 BS-UE 직접 경로를 보완하기 위한 보조 반사체로 활용하였으며, 다중 RIS 반사 경로를 OFDM 지연 영역에서 분리하여 RIS 경로만으로 거리 기반 위치 추정을 수행하는 구조는 아직 충분히 다루어지지 않았다.

따라서 본 논문에서는 다중 RIS 환경에서 OFDM 신호를 이용한 사용자 위치 추정 기법을 제안한다. 제안 기법은 파일럿 전송 과정에서 시간 슬롯별 RIS 반사 패턴을 제어하여 각 RIS로부터의 반사 신호를 분리하고, 정합 필터링(matched filtering)을 통해 RIS별 반사 경로의 지연 시간을 추정한다. 이후 추정된 지연 시간으로부터 각 RIS와 UE 사이의 거리를 계산하고, 삼변 측량법을 이용하여 UE의 2차원 위치를 추정한다. 모의실험에서는 송신 전력, OFDM 대역폭, RIS 반사 소자 수가 위치 추정 평균 제곱근 오차(root mean squared error: RMSE)에 미치는 영향을 분석한다.

II. 다중 RIS 기반 OFDM 위치 추정 시스템 모델

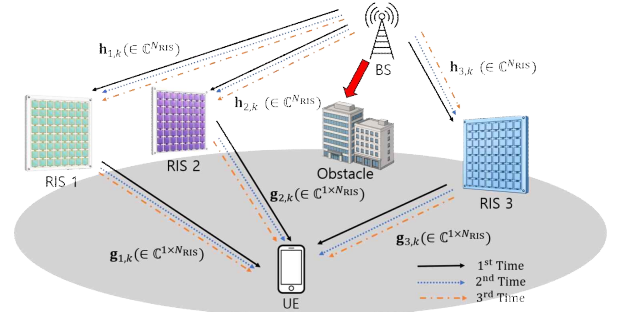


그림 1. 다중 RIS 활용 사용자 위치 추정 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 고정된 위치에서 단일 안테나를 가지는 BS와 UE와 함께 N_{RIS} 개의 소자를 가진 3개의 수동 RIS로 구성된 네트워크를 고려한다. 이때, BS와 모든 RIS의 위치 좌표는 UE에게 알려져 있다고 가정한다. BS는 채널이 거의 변하지 않는 채널 상관 시간(coherence time) 내에서 총 3개의 시간 슬롯에 걸쳐 신호를 송신하며, 각 슬롯은 K 개의 부반송파로 구성된다. 본 논문에서는 $n(\in \{1, 2, 3\})$ 째 RIS와 BS 간 채널 및 n 째 RIS와 UE 간 채널을 각각 $\mathbf{h}_n(\in \mathbb{C}^{N_{\text{RIS}}})$ 및 $\mathbf{g}_n(\in \mathbb{C}^{1 \times N_{\text{RIS}}})$ 로 정의한다. 또한, 무선 채널 $\mathbf{h}_n$ 과 $\mathbf{g}_n$ 의 $i(\in \{1, \dots, N_{\text{RIS}}\})$ 째 원소는 각각 $h_n^i = |h_n^i|e^{j\angle h_n^i}$ 와 $g_n^i = |g_n^i|e^{j\angle g_n^i}$ 로 정의된다.

본 논문에서는 BS와 n 째 RIS 사이의 채널 $\mathbf{h}_n$ 과 n 째 RIS와 UE 사이의 채널 $\mathbf{g}_n$ 모두 LoS 성분만 존재하는 결정론적 채널로 가정한다. 따라서 모든 무선 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{h}_n = \mathbf{a}(\theta_n) \exp(-j2\pi d_{\text{BS-RIS}_n}/\lambda),$$

$$\mathbf{g}_n = \mathbf{a}(\phi_n)^T \exp(-j2\pi d_{\text{RIS}_n-\text{UE}}/\lambda),$$

여기서, λ 는 파장을 나타내며 $d_{\text{BS-RIS}_n}$ 과 $d_{\text{RIS}_n-\text{UE}}$ 는 각각 BS와 n 째 RIS 간 거리와 n 째 RIS와 UE 간 거리를 나타낸다. θ_n 과 ϕ_n 은 각각 BS로부터 방사된 전파가 n 째 RIS의 원소에 도달할 때의 도착각을 나타내고 ϕ_n 은 n 째 RIS의 원소로부터 UE로 방사할 때의 출발각을 나타내며, $\mathbf{a}(\in \mathbb{C}^{N_{\text{RIS}}})$ 는 방향 벡터를 나타낸다 [3].

상관 시간 내 $t(\in \{1, 2, 3\})$ 째 시간 슬롯에서 k 째 부반송파에 대한 n 째 RIS의 위상 천이는 대각 행렬 $\Phi_{n,k}(\in \mathbb{C}^{N_{\text{RIS}} \times N_{\text{RIS}}})$ 로 나타낼 수 있고,

수신 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)를 최대화하면서 각 RIS 신호를 분리해내기 위한 $\Phi_{n,k}^t$ 의 i 째 대각원소는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_{n,k}^t(i,i) = e^{-j(\angle h_{n,k}^i + \angle g_n^i)} e^{j\pi(1-\delta_{n,1})\delta_{n,t}},$$

여기서, $\delta_{i,j}$ 는 크로네크 델타(Kronecker delta)를 나타내며 $i=j$ 일 때만 1을 나타낸다. 따라서, t 째 시간 슬롯에서 k 째 부반송파에 대한 UE의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [1].

$$y_{t,k} = \sum_{n=1}^3 \alpha_n \mathbf{g}_n \Phi_{n,k}^t \mathbf{h}_n e^{j\varphi} e^{-j2\pi k \Delta f \tau_n} x_k + w_{t,k},$$

여기서 $\alpha_n = \frac{\lambda \sqrt{G_{\text{tx}}}}{4\pi(d_{\text{BS-RIS}_n})} \frac{\lambda \sqrt{G_{\text{rx}}}}{4\pi(d_{\text{RIS}_n-\text{UE}})}$ 이며 G_{tx} 과 G_{rx} 는 각각 송신 및 수신 안테나 이득을 나타낸다. x_k 는 k 째 부반송파로 전송하는 송신 신호를 나타내며, Δf 는 부반송파 간격을 의미하고 τ_n 은 n 째 RIS와 UE간의 전송 지연을 나타낸다. 또한, φ 는 초기 위상을 나타내고, $w_{t,k}$ 는 열잡음을 의미하며 $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 의 분포를 따른다고 가정한다.

III. 삼변측량을 이용한 다중 RIS 기반 사용자 위치 추정 기법

본 논문에서는 t 째 시간 슬롯에서 각 RIS의 위상 반전 패턴을 이용하여 중첩 수신 신호로부터 각 RIS 반사 성분을 다음과 같이 분리한다.

$$\begin{aligned} s_{1,k} &= \frac{y_{2,k} + y_{3,k}}{2} = \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{RIS}}} |h_1^i| |g_1^i| \right) x_k + \frac{w_{2,k} + w_{3,k}}{2}, \\ s_{2,k} &= \frac{y_{1,k} - y_{2,k}}{2} = \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{RIS}}} |h_2^i| |g_2^i| \right) x_k + \frac{w_{1,k} - w_{2,k}}{2}, \\ s_{3,k} &= \frac{y_{1,k} - y_{3,k}}{2} = \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{RIS}}} |h_3^i| |g_3^i| \right) x_k + \frac{w_{1,k} - w_{3,k}}{2}. \end{aligned}$$

모든 RIS별 분리 신호에 대해 정합 필터링(matched filtering)을 활용하여 τ_n 을 각각 추정한다. 이를 위한 목적 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$L_n(\tau) = \left| \sum_{k=1}^K s_{n,k} e^{j2\pi k \Delta f \tau} \right|^2.$$

따라서, n 째 RIS 경로의 지연 시간 추정값은 다음과 같이 얻어진다.

$$\hat{\tau}_n = \underset{\tau}{\operatorname{argmax}} L_n(\tau).$$

추정한 지연 시간은 BS로부터 RIS를 거쳐 UE로 도달하는 전체 지연 시간을 나타낸다. 이때, UE는 BS와 모든 RIS의 위치를 알고 있으므로, BS와 n 째 RIS 사이의 거리는 정확히 계산할 수 있다. 그러므로, n 째 RIS와 사용자 사이의 거리는 다음과 같다.

$$\hat{d}_{\text{RIS}_n-\text{UE}} = c \hat{\tau}_n - d_{\text{BS-RIS}_n},$$

여기서 c 는 빛의 속도를 나타낸다.

추정된 거리 $\hat{d}_{\text{RIS}_n-\text{UE}}$ 는 n 째 RIS를 중심으로 하는 원의 반지름으로 해석할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 3개의 RIS를 사용하여 세 원의 공통 교점을 기반으로 사용자의 위치를 추정하는 삼변 측량법을 활용한다. RIS의 위치와 사용자의 위치를 각각 $\mathbf{p}_n = [x_n, y_n]^T$, $\mathbf{p}_{\text{UE}} = [x_{\text{UE}}, y_{\text{UE}}]^T$ 로 정의하면 n 째 RIS에 대한 거리 방정식은 다음과 같다.

$$\hat{d}_{\text{RIS}_n-\text{UE}}^2 = (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2.$$

실제 무선 환경에서는 잡음과 지연 시간 추정 오차로 인해 세 원이 한 교점에서 만나지 않을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 최소자승법을 추가로 사용하여 다음과 같이 추정 거리와 계산 거리 사이의 오차 제곱 합을 최소화하는 위치를 사용자의 추정 위치로 결정한다.

$$\hat{\mathbf{p}}_{\text{UE}} = \underset{\mathbf{p}_{\text{UE}}}{\operatorname{argmin}} \sum_{n=1}^3 \left(\sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} - \hat{d}_{\text{RIS}_n-\text{UE}}(\mathbf{p}_{\text{UE}}) \right)^2.$$

IV. 모의실험 결과 및 결론

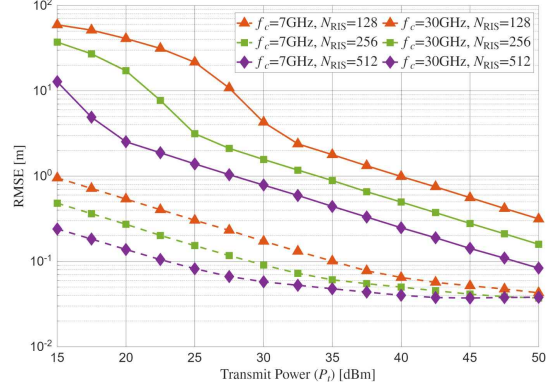


그림 2. 제안하는 다중 RIS 기반 위치 추정 RMSE 성능 비교.

그림 2는 제안하는 다중 RIS를 활용한 OFDM 기반 사용자 위치 추정 기법의 RMSE 성능을 송신 전력에 따라 도시한 결과이다. 본 논문에서는 중심 주파수를 7GHz와 30GHz로 각각 설정하고, 송수신 안테나 이득($G_{\text{tx}}, G_{\text{rx}}$)은 각각 0dBi로 설정하였다. BS의 위치는 원점인 (0, 0), RIS의 위치는 각각 (25, 25)[m], (25, -25)[m], (-25, -25)[m]에 배치하였으며, UE의 좌표는 (50, 0)[m]에 존재한다고 가정하였다. 또한, 256개의 부반송파와 30 kHz의 부반송파 간격으로 구성된 약 7.68 MHz 대역폭 조건에서 성능을 비교하였다. 모의실험 결과, 송신 전력 증가에 따른 수신 SNR 향상과 RIS 반사 소자 수 증가에 따른 반사 경로 이득 향상이 모두 위치 추정 RMSE 감소로 이어짐을 확인하였다. 또한, 중심 주파수가 낮을수록 파장에 따른 자유공간 경로 손실이 감소하므로, 7 GHz에서 더 우수한 성능을 보인다. 본 모의실험 결과, 제안 기법이 시간 슬롯별 RIS 위상 반전 패턴을 통해 다중 RIS 반사 신호를 효과적으로 분리하고, 각 RIS 경로의 지연 정보를 거리 기반 위치 추정에 활용할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 제안 기법은 다중 RIS를 단순한 보조 반사체가 아니라 위치가 알려진 측위 기준점으로 활용할 수 있음을 보이며, 향후 차세대 ISAC 시스템에서 통신 인프라 기반 위치 추정 및 센싱 성능 향상에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. RS-2025-02303435, No. RS-2026-25489627)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] A. Umer, I. Mürsepp, M. M. Alam, and H. Wymeersch, "Reconfigurable intelligent surfaces in 6G radio localization: A survey of recent developments, opportunities, and challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 27, no. 6, pp. 3526–3560, Dec. 2025.
- [2] K. Keykhosravi et al., "Leveraging RIS-enabled smart signal propagation for solving infeasible localization problems: Scenarios, key research directions, and open challenges," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 18, no. 2, pp. 20–28, Jun. 2023.
- [3] H. -E. Lee, Y. -S. Lee, and B. C. Jung, "Off-the-shelf OFDM-ISAC system with clustering algorithm for multipath environments," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, Milan, Italy, Mar. 2025.
- [4] Y. Lin, S. Jin, M. Matthaiou, and X. You, "Channel estimation and user localization for IRS-assisted MIMO-OFDM systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 4, pp. 2320–2335, Apr. 2022.
- [5] L. Zhang, X. Lei, T. Ma, H. Niu, and C. Yuen, "Joint user localization, channel estimation, and pilot optimization for RIS-ISAC," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 12, pp. 19302–19316, Dec. 2024.