

RIS 지원 단말 자가 위치추정을 위한 채널 파라미터 추정

최은애, 김효원
충남대학교 전자공학과

eunae.choi@o.cnu.ac.kr, hyowon.kim@cnu.ac.kr

Channel Parameter Estimation for RIS-Enabled UE Self-Localization

Eunae Choi and Hyowon Kim
Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

요약

본 논문은 모노스태틱(monostatic) 단말(UE: user equipment)이 수신 신호로부터 스스로 위치 및 상태 정보를 추정하기 위한 채널 파라미터 추정 기법을 제안한다. 무선 통신 환경에서 송신기-수신기 사이의 채널 상태를 파악하는 것은 통신의 성능을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 단말은 RIS(reconfigurable intelligent surface)의 반사 경로를 활용한 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 신호를 수신하며, 이로부터 채널 상태를 나타내는 주요 파라미터 성분인 각도, 시간 지연, 그리고 도플러 주파수의 추정을 수행한다. 제안하는 기법의 성능은 신호의 총 전송 횟수에 따른 추정 오차로 평가한다.

I. 서 론

차세대 이동통신은 mmWave 대역의 사용을 목표하고 있지만, 주파수 대역이 높아짐에 따른 동기화 오차 증가로 인해 위치 추정 정확도가 감소하는 문제점이 발생한다[1]. 이에 송신기-수신기 사이의 동기화 문제를 완화할 수 있는 모노스태틱(monostatic) 구조가 주목받고 있다[2]. 또한, 신호의 전송 커버리지 확장 및 가시선(LOS: line of sight) 차단 문제를 극복하기 위한 RIS(reconfigurable intelligent surface)의 활용이 주목받고 있다[3].

이에 따라 RIS와 모노스태틱 구조를 활용한 연구가 활발히 이루어지고 있다. RIS 반사 신호를 활용한 단말의 위치 및 상태 추정 연구[4], OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 신호를 활용한 모노스태틱 기지국 및 단말의 채널 추정 연구[5], [6] 등을 다루고 있다.

본 논문에서는 모노스태틱 단말의 RIS를 활용한 채널 파라미터 추정 기법을 제안한다. 반사 신호를 활용해 단말 스스로 채널 파라미터를 추정함으로써 자가 위치 추정이 가능해지며, 송신기-수신기 사이의 동기화 오차를 완화할 수 있다. 제안하는 기법의 성능은 신호의 총 전송 횟수에 따른 채널 파라미터 추정 오차로 평가한다.

II. 본 론

다중 안테나 단말과 다중 안테나 RIS 환경을 고려하며 단말의 OFDM 수신 신호로부터 주요 채널 파라미터인 각도, 시간 지연, 그리고 도플러 주파수를 추정한다.

단말이 수신한 t 번째 전송에서 s 번째 부반송파에 대한 OFDM 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_{t,s} = \kappa \mathbf{a}_{\text{UE}}(\boldsymbol{\theta}) \gamma_{\text{RIS},t} \mathbf{a}_{\text{UE}}^T(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{f}_t [\mathbf{c}(\tau)]_s [\mathbf{d}(f^D)]_s^* + \mathbf{n}_{t,s}, \quad (1)$$

여기서 $\kappa = \sqrt{E_s} \beta$, E_s 는 심볼에너지, β 는 복소 경로 이득, \mathbf{f}_t 는 프리코딩 벡터이다. 단말의 각도와 RIS의 각도는 각각 $\boldsymbol{\theta} = [\theta^{\text{az}}, \theta^{\text{el}}]^T$, $\boldsymbol{\phi} = [\phi^{\text{az}}, \phi^{\text{el}}]^T$ 로 출발각과 도착각은 서로 동일하며, 시간 지연과 도플러 주파수는 각각 τ , f^D 이다. 수식에서 $\gamma_{\text{RIS},t} = \mathbf{a}_{\text{RIS}}^T(\boldsymbol{\phi}) \boldsymbol{\omega}_{\text{RIS},t} \mathbf{a}_{\text{RIS}}(\boldsymbol{\phi})$ 이고, $\mathbf{a}_*(\boldsymbol{\theta})$ 는 안테나 응답 벡터, $\boldsymbol{\omega}_{\text{RIS},t}$ 는 RIS의 위상 개요이다. 여기서 \star 는 디바이스의 종류(단말 또는 RIS)를 의미한다. 신호의 잡음은 $\mathbf{n}_{t,s} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}_{N_{\text{UE}} \times 1}, \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_{\text{UE}}})$ 이며, $N_* = N_*^{\text{az}} \times N_*^{\text{el}}$ 는 안테나 배열의 총 요소 개수, N_*^{az} 와 N_*^{el} 은 각각 방위각, 고각 방향의 안테나 요소 개수이다. 그리고 $\mathbf{c}(\tau)$ 와 $\mathbf{d}(f^D)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{c}(\tau) = [1, e^{-j2\pi\tau\Delta f}, \dots, e^{-j2\pi\tau(S-1)\Delta f}]^T \in \mathbb{C}^{S \times 1}, \quad (2)$$

$$\mathbf{d}(f^D) = [e^{-j2\pi f^D T_0}, \dots, e^{-j2\pi f^D T T_0}]^T \in \mathbb{C}^{T \times 1}, \quad (3)$$

여기서 Δf 는 부반송파 간격, S 는 총 부반송파 개수, T_0 는 시간 간격, 그리고 T 는 신호의 총 전송 횟수이다. 추정한 파라미터는 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 와 같이 표기하며, 수신 신호를 활용하여 단말의 각도를 추정하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \underset{\boldsymbol{\theta}}{\operatorname{argmax}} \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S |\mathbf{a}_{\text{UE}}^H(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{y}_{t,s}|^2, \quad (4)$$

단말의 각도는 공간 표현 수신 신호의 2차원 FFT(fast Fourier transform)로 추정하며, 그 과정은 다음과 같다.

$$(\hat{p}, \hat{q}) = \max_{(p,q)} \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S [\mathbf{Z} \odot \mathbf{Z}^*]_{(t,s)}, \quad (5)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \left[\arctan \left(\frac{N_{\text{UE}}^{\text{az}}(\hat{q}-1)}{N_{\text{UE}}^{\text{el}}(\hat{p}-1)} \right), \arcsin \left(\frac{2(\hat{p}-1)}{N_{\text{UE}}^{\text{az}} \cos(\hat{\theta}^{\text{az}})} \right) \right]^T, \quad (6)$$

표 1. 시뮬레이션 매개변수

Parameter	Value
Carrier frequency	$f_c = 30 \text{ GHz}$
Bandwidth	$B = 200 \text{ MHz}$
The number of subcarriers	$S = 1600$
Subcarrier spacing	$\Delta f = B/S$
Signal duration	$T_o = 8.56 \text{ ns}$
Tx power	$P_T = E_s S \Delta f = 20 \text{ dBm}$
Signal noise variance	$\sigma_n^2 = -166 \text{ dBm/Hz}$

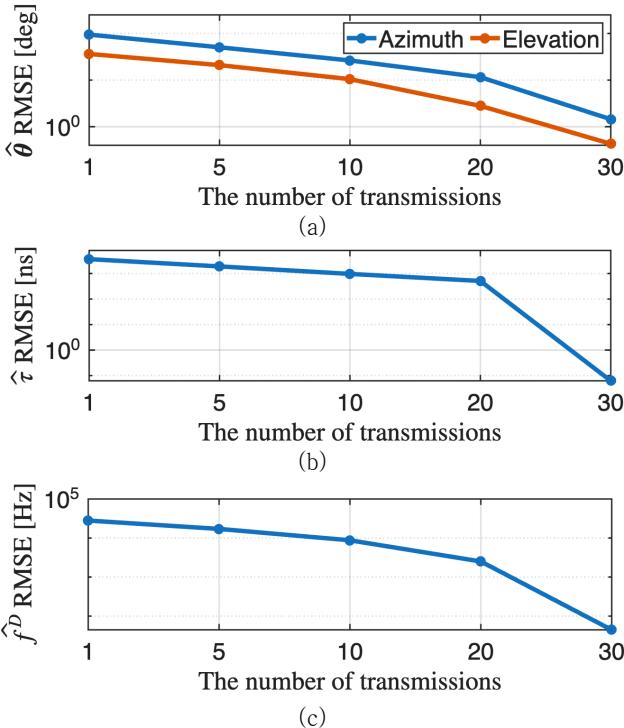


그림 1. 채널 파라미터 추정 RMSEs: (a) 단말 각도, (b) 시간 지연 (c) 도플러 주파수

여기서 $[\cdot]_{(n,m)}$ 는 $[\cdot]$ 의 (n, m) 번째 성분을 나타내며, \mathbf{z} 는 공간 표현 수신 신호의 2차원 FFT 결과를 모든 전송과 부반송파에 대해 정의한 것이다. 단말의 각도 추정 결과를 기반으로 한 시간 지연 추정 수식은 다음과 같다.

$$\hat{\tau} = \operatorname{argmax}_{\tau} \sum_{t=1}^T |\mathbf{a}_{\text{UE}}^H(\hat{\theta}) \bar{\mathbf{Y}}_t \mathbf{c}^*(\tau)|^2, \quad (7)$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_t = [\mathbf{y}_{t,1}, \mathbf{y}_{t,2}, \dots, \mathbf{y}_{t,S}] \in \mathbb{C}^{N_{\text{UE}} \times S}, \quad (8)$$

여기서 $\bar{\mathbf{Y}}_t \in \mathbb{C}^{N_{\text{UE}} \times S}$ 는 공간-주파수 도메인 신호이다. 시간 지연은 주파수 도메인 신호의 1차원 FFT로부터 추정한다.

$$\hat{d} = \max_d \sum_{t=1}^T [\mathbf{z} \odot \mathbf{z}^*]_t, \quad \hat{\tau} = \frac{\hat{d} - 1}{\Delta f S}, \quad (9)$$

주파수 도메인 신호의 모든 전송에 대한 FFT 결과는 \mathbf{z} 로 정의하였다. 마지막으로 도플러 주파수를 추정하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$\hat{f}^D = \operatorname{argmin}_{f^D} \|\bar{\mathbf{y}} - \mathbf{g}(f^D)\|, \quad (10)$$

$$\bar{\mathbf{y}} = [\mathbf{a}_{\text{UE}}^H(\hat{\theta}) \bar{\mathbf{Y}}_1 \mathbf{c}^*(\hat{\tau}), \dots, \mathbf{a}_{\text{UE}}^H(\hat{\theta}) \bar{\mathbf{Y}}_T \mathbf{c}^*(\hat{\tau})]^T \in \mathbb{C}^{T \times 1}, \quad (11)$$

도플러 주파수 추정은 grid-search를 활용하였으며, $\bar{\mathbf{y}}$ 는 시간 도메인 신호, $\mathbf{g}(f^D)$ 는 도플러 주파수 추정을 위한 비용 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{g}(f^D) = \kappa \gamma_{\text{RIS},t} \mathbf{a}_{\text{UE}}^T(\hat{\theta}) \mathbf{f}_t \mathbf{d}(f^D). \quad (12)$$

III. 성능 평가

성능 평가에서는 OFDM 신호의 총 전송 횟수에 따른 채널 파라미터 추정 성능을 확인한다. 단말의 위치와 속도는 $\mathbf{x}_{\text{UE}} = [0, 0, 0]^T \text{ m}$, $v_{\text{UE}} = 10 \text{ m/s}$ 이며, RIS의 위치는 $\mathbf{x}_{\text{RIS}} = [5, 30, 10]^T \text{ m}$ 이다. 단말과 RIS의 총 안테나 개수는 각각 $N_{\text{UE}} = 4 \times 4$, $N_{\text{RIS}} = 50 \times 50$ 이고, 안테나 요소 간격은 모두 $\lambda/2$, $\lambda = c/f_c$ 는 파장, c 는 빛의 속도, 그리고 f_c 는 반송 주파수이다. 신호의 전송 횟수는 $T = 1, 5, 10, 20, 30$ 개로 설정하였다. RIS의 위상 개요는 방향 위상 개요로 설정하였고, 단말의 위치는 $\hat{\mathbf{x}}_{\text{UE}} \sim \mathcal{N}(\mathbf{x}_{\text{UE}}, \sigma_{\text{err}}^2 \mathbf{I}_3)$, $\sigma_{\text{err}} = 1 \text{ m}$ 이다[4].

그림 1.(a)는 공간 도메인의 2차원 FFT로부터 추정한 단말의 각도 RMSE(root mean squared error)이다. 신호의 총 전송 수가 증가함에 따라 고각과 높위각의 RMSE가 감소함으로써 추정이 정확해지는 것을 확인하였다. 그림 1.(b), (c)는 1차원 FFT로부터 추정한 시간 지연, grid-search를 활용해 추정한 도플러 주파수 RMSE이며, 마찬가지로 추정 정확도가 신호의 총 전송 수에 비례하게 증가하는 것을 확인하였다. 이를 통해 OFDM 신호의 총 전송 수와 채널 파라미터 추정 정확도는 비례하는 것을 확인하였으며, 신호의 전송이 충분히 이루어지지 않으면 RIS 위상 개요 설정에서 $\sigma_{\text{err}} = 1 \text{ m}$ 임에도 채널 파라미터의 추정 정확도가 감소하는 결과를 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 모노스태틱 단말의 채널 파라미터 추정 기법을 소개하였다. 단말은 RIS의 반사 경로를 활용하여 신호를 수신하며, FFT와 grid-search 기법으로부터 각도, 시간 지연, 도플러 주파수를 추정한다. 성능 평가에서 OFDM 신호의 총 전송 수에 따른 채널 파라미터 추정 성능을 확인하였다. 신호의 전송 횟수가 증가할수록 채널 파라미터의 추정 정확도를 높일 수 있었다. 또한 RIS의 위상 개요 설정에서 단말 위치 오차 표준편차가 1 m임에도 신호의 전송이 충분하게 이루어지지 않으면 채널 파라미터의 추정 성능이 감소하는 점으로부터 신호의 전송 수는 채널 파라미터 추정 성능을 결정하는데 중요한 요소임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 한국연구재단 기초연구사업(No. RS-2025-25415939), 한국연구재단 대학기초연구소지원사업(G-LAMP)(No. RS-2025-25442707), 그리고 한국연구재단(No. NRF-2023R1A2C3002890)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- H. Chen *et al.*, "Modeling and analysis of OFDM-based 5G/6G localization under hardware impairments," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 7, pp. 7319–7333, Jul. 2024.
- M. F. Keskin *et al.*, "Fundamental trade-offs in monostatic ISAC: A holistic investigation toward 6G," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 24, no. 9, pp. 7856–7873, Sep. 2025.
- C. Pan *et al.*, "Reconfigurable intelligent surface for 6G systems: Principles, applications, and research directions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 6, pp. 14–20, Jun. 2021.
- H. Kim *et al.*, "RIS-enabled and access-point-free simultaneous radio localization and mapping," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 4, pp. 3344–3360, Apr. 2024.
- L. Pucci *et al.*, "System-level analysis of joint sensing and communication based on 5G new radio," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 7, pp. 2043–2055, Jul. 2022.
- M. Ammous *et al.*, "3D cooperative positioning via RIS and sidelink communications with zero access points," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 24, no. 7, pp. 6119–6136, Jul. 2025.