

LEO-다중 RIS 시스템에서 2D-DFT 기반 신호 경로 분리를 활용한 측위 알고리즘

양두희, 정홍석, 강정완, 김선우

한양대학교 융합전자공학부

{yangdh95, hssjung, rkdwjddhks77, remero}@hanyang.ac.kr

Localization with 2D-DFT based signal path classification in LEO-Multi RIS systems

Duhui Yang, Hongseok Jung, Jeongwan Kang, Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문에서는 LEO (Low Earth Orbit)-다중 RIS (reconfigurable intelligent surfaces) 시스템에서 2D-DFT (discrete Fourier transform) 기반 신호 경로 분리를 활용한 측위 기법을 제안한다. LEO 위성은 도심 환경에서 LoS (line of sight) 보장이 어렵기 때문에 측위 활용 시 제한이 있다. 따라서 제안 기법은 DFT 기반 위상 프로파일로 직교성이 보장된 다중 RIS를 사용하여 효율적 신호 경로 분리를 위한 2D-DFT를 적용한다. 이때 LEO 위성의 빠른 속도에 따른 도플러 천이로 인해 경로 오분류 문제가 발생하기 때문에 기준 RIS 위치를 활용하여 이를 보상한다. 시뮬레이션을 통해 제안 알고리즘의 유효성을 검증하였으며, 센티미터 수준 측위 성능 달성이 가능함을 확인하였다.

I. 서 론

LEO (Low earth orbit)-다중 RIS (reconfigurable intelligent surfaces) 기반 측위 시스템은 LoS (line of sight) 보장이 어려운 도심 환경에서 degree of freedom을 높여 정밀 측위가 가능하다는 장점이 있다 [1]. 이를 위해 각 반사 경로 간의 직교성이 보장된 위상 프로파일 및 LEO의 강한 도플러 천이를 고려한 신호 경로 분리 기법이 필요하다 [2]. 따라서 본 논문은 기준 RIS 위치를 통한 도플러 천이 보상 후 2D-DFT (discrete Fourier transform) 기반 신호 경로 분리 기법을 통해 DFT 기반 위상 프로파일이 적용된 RIS를 측위에 활용한다. 시뮬레이션을 통해 제안 기법의 유효성을 검증한다.

II. 시스템 모델

본 논문은 GCS(global coordinate systems)을 따르며, 측위 시나리오는 그림 1과 같다. $\mathbf{v}_{\text{sat}} \in \mathbb{R}^3$ 의 속도로 이동하는 $\mathbf{p}_{\text{sat}} \in \mathbb{R}^3$ 에 위치한 단일 LEO 위성이 L 개의 심볼과 K 개의 부반송파로 구성된 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) reference 신호를 하향 링크로 송신한다. M 개의 다중 RIS $\mathbf{p}_m \in \mathbb{R}^3$, ($m \in 1, \dots, M$)은 N 개 요소를 가지는 URA(uniform rectangular arrays)로 구성되며, $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ 에 위치한 단말이 RIS들로 부터 반사된 신호를 수신한다. 행렬 형태의 수신 신호 $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{K \times L}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{Y} = \sum_{m=1}^M \mathbf{A}_m \odot \mathbf{F}_K^\dagger (\mathbf{H}_m \odot \mathbf{X}) + \mathbf{N} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{A}_m \in \mathbb{C}^{K \times L}$ 는 m 번째 RIS의 반사 경로에 대한 fast-time 도플러 천이 효과를 나타내는 행렬이다 [1]. $\mathbf{F}_m \in \mathbb{C}^{K \times K}$ 는 OFDM modulation을 위한 K 차원의 DFT 행렬, $\mathbf{X}_m \in \mathbb{C}^{K \times L}$ 는 $[\mathbf{X}_m]_{k,\ell} = 1$ 을 만족하는 reference 신호이다. $\mathbf{N}_m \in \mathbb{C}^{K \times L}$ 은 신호 측정 잡음으로 $\mathbf{N} \sim CN(\mathbf{0}_{K \times L}, \sigma^2 \mathbf{I}_{K \times L})$ 인 복소 가우시안 분포를 따른다. $\mathbf{H}_m \in \mathbb{C}^{K \times L}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{H}_m = \mathbf{B}(\tau_m, \nu_m) \odot \mathbf{C}(\nu_m) \odot \mathbf{G}_m(\theta_m) \quad (2)$$

여기서, m 번째 RIS의 시간 지연 τ_m , 도플러 천이 ν_m 로 모델링 되는 반송파 위상 천이 행렬 $\mathbf{B}(\tau_m, \nu_m) \in \mathbb{C}^{K \times L}$ 는 다음과 같다.

$$[\mathbf{B}(\tau_m, \nu_m)]_{k,\ell} = e^{-j2\pi k \Delta_f (\tau_m - \nu_m \ell T_{\text{sym}})}, \quad (3)$$

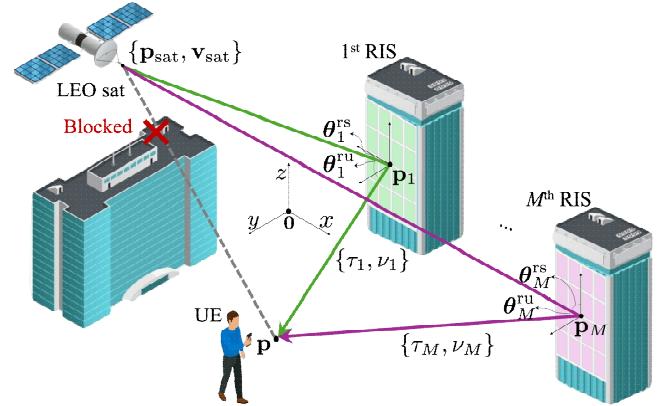


그림 1. 도심 환경에서 LEO-다중 RIS 시스템 기반 단말 측위 시나리오

이때, Δ_f 는 부반송파 간 간격, T_{sym} 은 시간 차원에서 OFDM 심볼 길이, f_c 는 중심 주파수이다. $\mathbf{C}(\nu_m) = \mathbf{1}_K \mathbf{c}(\nu_m)^\top \in \mathbb{C}^{K \times L}$ 는 slow-time 도플러 천이 행렬로 $[\mathbf{c}(\nu)]_\ell = e^{-j2\pi f_c \nu_m (\ell-1) T_{\text{sym}}}$ 와 같다.

m 번째 RIS response 행렬 $\mathbf{G}_m(\theta_m) \in \mathbb{C}^{K \times L}$ 는 위성-RIS의 AoA(angle of arrival)와 RIS-단말의 angle of departure(AoD)로 구성된 angle tuple $\theta_m = \{\theta_m^{\text{ru}}, \theta_m^{\text{rs}}\}$ 로 모델링 되며, 각 성분은 다음과 같이 정의된다.

$$[\mathbf{G}_m]_{k,\ell} = \mathbf{1}_K \mathbf{g}_m^\top = (\mathbf{s}(\theta_m^{\text{rs}}) \odot \mathbf{s}(\theta_m^{\text{ru}}))^\top \mathbf{w}_{m,\ell}, \quad (4)$$

여기서, $\mathbf{s}_m(\theta) \in \mathbb{C}^N$ 는 m 번째 RIS의 angle steering 벡터, $\mathbf{w}_{m,\ell} \in \mathbb{C}^N$ 는 ℓ 번째 심볼에 적용된 RIS configuration 벡터이며, $[\mathbf{s}_m]_n = e^{-j2\pi f_c \tau_{m,n}(\theta)}$, $[\mathbf{w}_{m,\ell}]_n = e^{j\phi_{m,\ell}^n}$ 이다. 이때 $\tau_{m,n}(\theta)$ 는 m 번째 RIS의 중심과 n 번째 요소 간 시간 지연이며, $\phi_{m,\ell}^n$ 은 n 번째 요소의 ℓ 심볼에 가해진 위상 천이다. RIS response의 심볼 차원 벡터 $\mathbf{g}_m \in \mathbb{C}^L$ 은 RIS의 위상 프로파일 벡터 β_m 와 범합성 이득 $\omega_m(\theta_m) \in \mathbb{C}$ 로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{g}_m = \omega_m(\theta_m) \beta_m, \quad (5)$$

여기서, DFT 기반 위상 프로파일링이 적용되므로 $\beta_m = [\mathbf{F}_L]_{:,m}$ 로 설정한다.

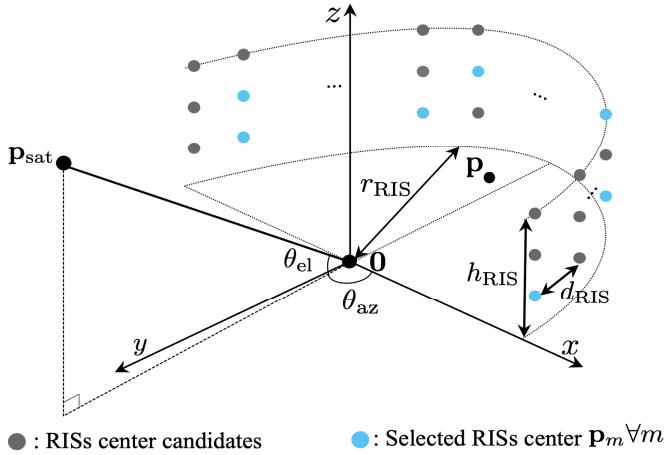


그림 2. 시뮬레이션을 위한 LEO 위성, RIS, 단말 위치 설정

III. 2D-DFT 기반 신호 경로 분리 활용 단말 측위 알고리즘

수신 신호는 LEO의 이동성으로 인한 도플러 천이를 포함하므로, 기준 RIS의 위치를 통해 도플러 천이를 계산 후 이를 보상한다 [1]. 도플러 천이가 보상된 수신 신호 행렬 $\bar{\mathbf{Y}} \in \mathbb{C}^{K \times L}$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{Y}} &= \hat{\mathbf{C}}_m^* \odot \hat{\mathbf{B}}_m^* \odot \mathbf{F}_K (\hat{\mathbf{A}}_m^* \odot \mathbf{Y}) \\ &= \sum_{m=1}^M \omega(\theta_m) \mathbf{b}_{\text{res}}(\tau_m) (\mathbf{c}(\nu_m^{\text{res}}) \odot \boldsymbol{\beta}_m)^{\top} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\hat{\mathbf{A}}_m, \hat{\mathbf{B}}_m, \hat{\mathbf{C}}_m$ 는 기준 RIS 위치를 통해 추정한 도플러 천이를 통해 계산한 slow time, 부반송파, fast time 도플러 천이 행렬이다. 신호 경로 분리는 다음과 같이 진행된다. 먼저, 2D-FFT가 적용된 도플러 보상 신호 $\bar{\mathbf{Y}}$ 에서 전력값이 큰 순서로 총 M 개의 peak를 검출한다. $i-1$ 번째 peak 성분이 제거된 2D-FFT 결과에 대하여 이는 다음과 같다.

$$\tilde{\tau}_i, \tilde{\nu}_i = \arg \max_{\tau, \nu} \mathbf{S}_i(\tau, \nu), \quad (7)$$

이때 $\mathbf{S}_i(\tau, \nu)$ 는 2D-FFT 전력값 $\mathbf{S}(\tau, \nu) = |\mathbf{F}_K \bar{\mathbf{Y}} \mathbf{F}_L^\dagger|$ 에서 $i-1$ 번째 peak 성분이 제거된 행렬이다. 이후, 위상 차원에서 추정 위상과 인접한 위상 프로파일에 해당하는 RIS에 추정 시간 천이를 분류한 뒤 총 M 개의 분류된 시간 천이 $\hat{\tau}_m$ 을 통하여 단말의 위치를 추정한다. 이때 단말과 LEO 위성 간 시각 오프셋 및 시간 지연 추정 시 발생하는 정수 모호성을 고려하여 TDoA (time difference of arrival) 기반 측위를 진행한다 [1].

IV. 시뮬레이션 결과

알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 MATLAB을 통한 Monte-Carlo 실험으로 운용 RIS의 수와 LEO 위성의 elevation angle θ_{el} 별 측위 성능을 비교하였으며 그림 2는 시뮬레이션에서 고려한 LEO, RIS, 단말의 위치를 보여준다. LEO 위성의 고도는 600 km, θ_{el} 은 GCS 중심 $\mathbf{0} = [0, 0, 0]^\top$ m 기준 40, 60, 80°를 고려하였으며 azimuth angle θ_{az} 는 90°으로 고정하였다. 단말의 위치는 $\mathbf{p} = [20, -150, 1.5]^\top$ m로 하였으며, 운용 RIS의 수는 6 ~ 24로 설정하였다. 중심 주파수는 $f_c = 20$ GHz, 부반송파 간격 $\Delta_f = 120$ KHz, 반송파 수는 $K = 3 \times 10^3$ 로 설정하였다. 인접 RIS 중심 간 간격 d_{RIS} 은 25 m로 설정하였으며, GCS 기준 $r_{\text{RIS}} = 200$ m를 반지름으로 하는 반원에 따라 RIS를 균일 배치하였다. 이때 RIS 중심의 최대 고도는 h_{RIS} 는 모든 RIS의 element 수는 $N = 4$ 로 설정하였다. 사전 정의된 RIS 위치 후보 중 M 개를 시행마다 무작위로 선택하였으며, 이에 따른 측위 RMSE(root mean squared error)와 RIS 반사 경로의 검출 확률은 각 그림 3, 그림 4과 같다. 모든 elevation angle에서 RMSE는 $M = 8$ 까지 감소하는 경향을

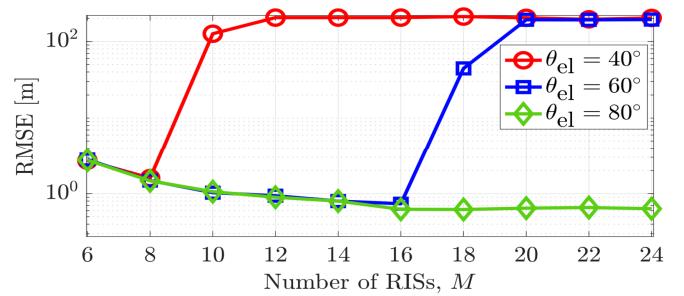


그림 3. RIS 수와 elevation angle에 따른 측위 RMSE

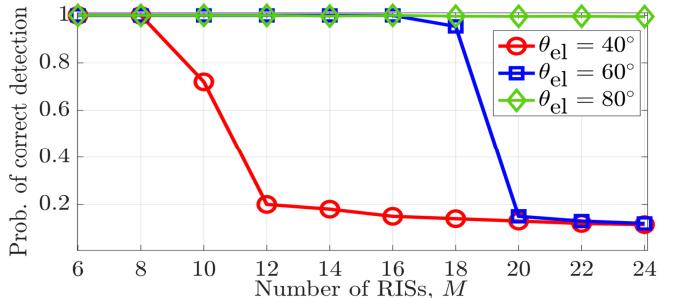


그림 4. RIS 수와 elevation angle에 따른 RIS 반사 경로 검출 확률

보였으며, 모든 경우에서 RMSE는 1.47 m로 유사한 값을 보였다. $\theta_{\text{el}} = 40, 60^\circ$ 에서 각 $M = 8, 16$ 이후 RMSE가 20 m 이상 급격히 증가하였으며, 두 경우 모두 약 204.8 m로 수렴하였다. 검출 확률 결과를 볼 때, 이는 반사 경로의 검출 확률이 낮아질수록 RMSE가 급격히 증가하는 것으로 해석할 수 있다. $\theta_{\text{el}} = 90^\circ$ 의 경우, 유일하게 전체 구간에서 지속적으로 수렴하여 약 0.62 m의 RMSE를 보였다. 이는 elevation angle 증가로 인해 RIS간 도플러 천이 차이가 감소하기 때문으로 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문은 2D-DFT 기반 신호 경로 분리 기법을 활용한 LEO-다중 RIS 시스템 기반 측위 기법을 제안하였다. 기준 RIS 위치 활용 도플러 보상과 함께 2D-DFT 기반 신호 경로 분리를 적용하였으며, 시뮬레이션 결과, 센터미터 수준의 정밀 측위가 가능함을 확인하였다. 향후, RIS의 수가 증가할 때 RIS 별 도플러 천이 차이로 발생하는 경로 간 직교성 해손 문제 해결이 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00337857, 5G 및 다중 GNSS 기반 긴급구조용 복합측위 기술 개발)

참고 문헌

- [1] S. Saleh, M. F. Keskin, B. Priyanto, M. Beale, P. Zheng, T. Y. Al-Naffouri, G. Seco-Granados, and H. Wymeersch, "6G RIS-aided Single-LEO Localization with Slow and Fast Doppler Effects," in Proc. 2024 IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM Workshop), Dec. 2024.
- [2] K. Keykhosravi, M. F. Keskin, G. Seco-Granados, P. Popovski, and H. Wymeersch, "RIS-enabled SISO localization under user mobility and spatial-wideband effects," IEEE J. Sel. Top. Signal Process., Aug. 2022.