

RIS 지원 SISO 기반 3차원 UAV 위치 추정 알고리즘

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

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

SISO-Based 3D UAV Localization with RIS Assistance

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

요약

본 논문에서는 균일 평면 배열(UPA)을 갖춘 재구성 가능한 지능형 표면(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)이 존재하는 단일 입력 단일 출력(SISO) 다중 반송파 시스템에서의 3차원 위치 추정 및 동기화 문제를 다룬다. 먼저, 채널 파라미터, 즉 사용자 장비(UAV)까지의 RIS로부터의 출발각(Angle of Departure, AOD)과 기지국(BS)에서 UAV까지의 직접 경로 및 BS-RIS-UAV 반사 경로의 도달 시간(TOA)에 대한 추정 오차의 Cramér-Rao Bound(CRB)를 유도한다.

또한, 고차원의 파라미터 공간에 대한 탐색을 피하기 위해, 우리는 TOA에 대해 두 번의 1차원 탐색과 AOD에 대해 한 번의 2차원 탐색을 수행하는 저복잡도 추정 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션 결과는 RIS가 지원하는 무선 시스템이 미터 이하 수준의 위치 및 동기화 정확도를 제공할 수 있음을 보여주며, 단일 안테나를 갖춘 BS 및 UE만으로도 Beyond 5G 네트워크에서의 위치 추정 기능을 실현할 수 있음을 확인할 수 있다.

I. 서론

기존 셀룰러 시스템에서의 3D 위치 추정은 여러 개의 기지국과 UE 간의 동기화를 필요로 하며, 복잡한 인프라와 높은 비용이 요구된다 [1-3]. 이에 대해 본 논문에서는 단일 안테나를 갖춘 BS와 UAV, 그리고 하나의 Reconfigurable Intelligent Surface(RIS)만으로도 3차원 위치 추정 및 동기화가 가능함을 제안한다. RIS는 강한 반사 경로를 생성함으로써, 출발각(AOD)과 도달시간(TOA) 정보를 활용한 위치 추정을 가능하게 한다. 이를 기반으로 채널 파라미터 및 위치 오차에 대한 Cramér-Rao 하한(CRB)을 도출하였고, CRB를 달성할 수 있는 저복잡도 추정 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 본 기법은 sub-meter 수준의 위치 정확도와 시간 오차 추정을 실현할 수 있음을 보여준다. 특히, 다중 RIS 위상 프로파일을 사용할 경우, 단일 RIS만으로도 비동기 환경에서 정확한 동기화가 가능함을 보여준다.

II. 본론

1. 시스템 모델 및 채널 모델

본 논문에서는 단일 안테나를 가진 기지국(BS), 단일 안테나를 가진 사용자 단말(UE), 그리고 RIS로 구성된 무선 시스템을 고려한다. 그림 1은 시스템 구성을 보여주며, UAV는 기지국(BS)으로부터 직접 전송된 LOS 경로의 신호와 RIS를 통해 반사된 경로의 신호를 모두 수신한다. 또한, 무선통신 경로는 RIS의 경우 고도가 높아질수록, LOS 확률이 높아지기 때문에 모든 개체 사이의 경로는 LOS가 성립한다고 가정한다[4-5].

본 논문에서는 하나의 위치 추정 과정을 위해 T개의 OFDM 심볼과 N개의 서브캐리어로 구성된 신호 전송을 고려한다. 단순화를 위해, 모든 전송 파일럿 심볼이 동일하게 $\sqrt{E_s}$ 라고 가정한다. 이에 따라 수신 신호는 $N \times T$ 행렬로 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 본 논문에서의 목표는 RIS의 위상 프로파일, 전송된 신호, 그리고 BS 및 RIS의 위치와 방향이 주어졌을 때, 관측된 수신 신호 Y로부터 UAV의 위치 p를 추정하는 것이다.

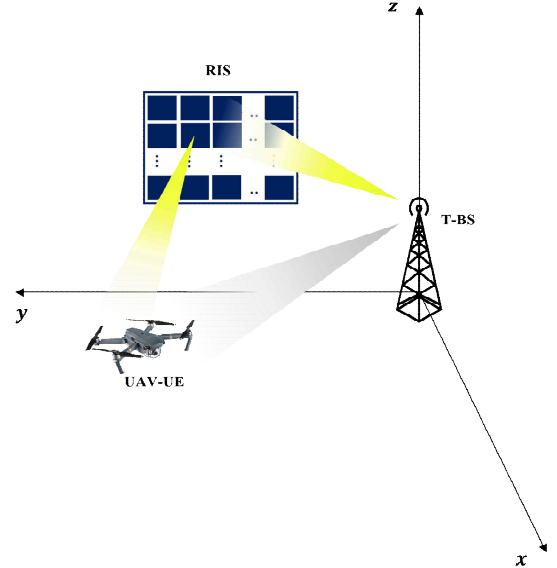


그림 1. 시스템 모델

Fig. 1. System model.

2. 저복잡도 채널 파라미터 추정 및 위치 추정

$$\mathbf{Y} = g_{b\sqrt{E_s}} \mathbf{d}(\tau_b) \mathbf{1}_T^T + g_{r\sqrt{E_s}} \mathbf{d}(\tau_r) \mathbf{u}(\phi)^T + \mathbf{N} \quad (1)$$

본 절에서는 수신 신호 Y를 기반으로 채널 파라미터 ζ_{ch} 를 추정하기 위한 추정기를 제안한다. 그리고 이 채널 파라미터를 바탕으로 기하학적 위치 계산을 적용하여 UAV의 위치를 추정한다. 채널 파라미터 추정 과정은 다음과 같다. 먼저 수신 신호에 대해 역 고속 푸리에 변환 (IFFT)을 수행하여 τ_b 와 τ_r 를 추정하고, 이후 RIS 위상 프로파일 행렬에 대해 2D-IFFT를 적용하여 ϕ 를 추정한다. 각 단계의 마지막에는 quasi-Newton 알고리즘을 사용하여 추정값을 정교화한다.

3. 모의실험 성능 분석

이 절에서는 앞절에서 제안한 추정기의 평균 제곱근 오차(RMSE)를 평가한다. 또한, RIS 소자 수가 미치는 영향도 분석한다. 추정기의 성능을 평가하기 위해 1,000개의 노이즈 실현값에 대해 평균을 취하였다. RIS와 BS는 동일한 높이에 있다고 가정하고, UAV는 이들보다 10미터 높게 위치한다.

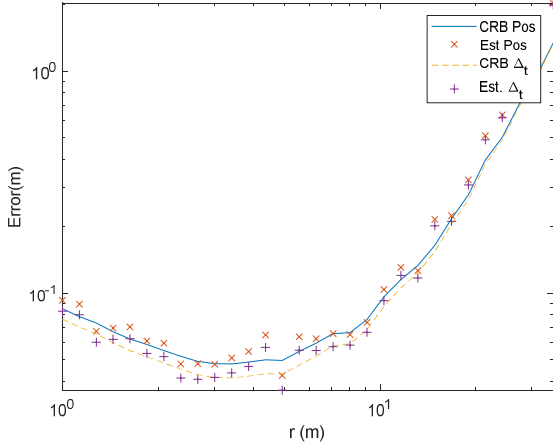


그림 2. UAV 위치와 시간 바이어스에 대한 추정 오차
Fig. 2. Estimation error (markers) and the CRB bounds (lines) for user position, time bias

그림 2는 CRB와 위치, 클럭 바이어스를 거리에 따라 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, $r < 30\text{m}$ 인 경우 서브미터 수준의 정확도가 가능한 것을 확인할 수 있다. 제안된 추정기는 이론적인 하한 근처에서 동작함을 확인할 수 있다.

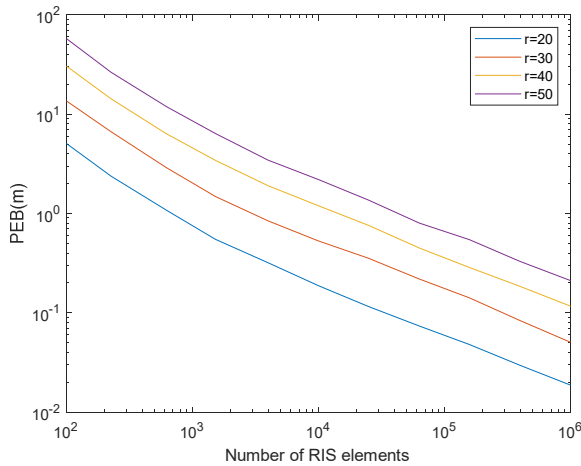


그림 3. RIS 소자 수에 따른 PEB (위치 오차 하한)

Fig. 3. PEB for different numbers of RIS elements.

그림 3은 RIS 크기가 PEB에 미치는 영향을 다섯 개의 서로 다른 위치에서 보여준다. RIS는 행과 열 수가 같은 정사각형 배열을 가정한다. 모든 위치에서 공통적으로, RIS 소자 수가 증가할수록 PEB는 그 제곱근에 반 비례하여 감소함을 확인할 수 있다. 이는 반사 경로의 SNR이 RIS 소자 수에 비례해 증가하기 때문이며, 위상이 무작위이므로 빔포밍 이득은 크지 않음을 의미한다.

III. 결론

본 논문에서는 단일 안테나 UAV, 단일 안테나 BS, 그리고 하나의 RIS로 구성된 무선 시스템에서의 위치 추정과 동기화 문제를 연구하였다. CRB를 계산하고, RIS로부터의 AOD와 직·반사 경로 지연을 추정하기 위한 저복잡도 추정기를 제안하였다. 이 파라미터들을 바탕으로 사용자의 위치와 클럭 바이어스를 추정하였다. 추정기의 오차를 CRB와 비교한 결과, 제안된 추정기의 효율성을 입증하였으며, 본 시스템에서 3차원 위치 추정 및 동기화가 가능함을 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

"이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업임 (IITP-2024-00156287)." "본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 학석사연계ICT핵심인재양성사업의 연구결과로 수행되었음 (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] J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo, and G. Seco-Granados, "Survey of cellular mobile radio localization methods: From 1G to 5G," *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1124 - 1148, 2018.
- [2] "Feasibility of positioning enhancements for E-UTRA, release 13, V13.0.0," 3GPP TR 36.855, Jan. 2015.
- [3] A. Shahmansoori, G. E. Garcia, G. Destino, G. Seco-Granados, and H. Wymeersch, "Position and orientation estimation through millimeter-wave MIMO in 5G systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 1822 - 1835, Mar. 2018.
- [4] T. M. Hoang, C. Xu, A. Vahid, H. D. Tuan, T. Q. Duong and L. Hanzo, "Secrecy-Rate Optimization of Double RIS-Aided Space - Ground Networks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 15, pp. 13221-13234, 1 Aug.1, 2023.
- [5] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Rayleigh Fading Modeling and Channel Hardening for Reconfigurable Intelligent Surfaces," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 830-834, April 2021.