

UAV-RIS 통신 시스템을 위한 채널 추정 기법

변용석, 김현수, 김승년, 심병호

서울대학교

{ysbyun, hskim, snkim, bshim}@islab.snu.ac.kr

Channel Estimation for UAV-RIS Communication Systems

Yongsuk Byun, Hyunsoo Kim, Seungnyun Kim, and Byonghyo Shim

Seoul National University

요약

최근 재구성 가능한 지능형 표면(RIS)은 위상 이동을 의도적으로 조정하여 스펙트럼 효율성과 커버리지를 개선하는데 많은 관심을 받고 있다. 실제로 사용자의 이동성으로 인해 고정 RIS는 지속적인 LoS 링크를 제공하지 않을 수 있다. 이러한 경우 무인항공기에 설치된 RIS (UAV-RIS)는 높은 고도에서 운용되기 때문에 신뢰할 수 있는 LoS 링크를 제공할 수 있다. 본 논문에서는 UAV-RIS 통신 시스템을 위한 2단계 채널 추정 기법을 제안한다. 제안된 기법의 핵심 아이디어는 UAV-RIS 반사 채널을 느린 변동 각도와 빠른 변동 경로 이득의 두 가지 구성 요소로 분해한 다음 이러한 구성 요소를 다른 시간 척도로 추정하는 것이다.

I. 서론

방대한 수의 수동 재연결 요소로 구성된 메타 표면인 재구성 가능한 지능형 표면 (RIS)은 최근 무선 시스템의 스펙트럼 효율성과 커버리지를 향상시키는 기술로 많은 주목을 받고 있다 [1]. 무선 환경을 재구성함으로써, RIS는 사용자(UE)와 기지국(BS) 사이의 가상 가시거리 (LoS) 링크를 제공할 수 있다. 지금까지의 대부분의 RIS 연구는 RIS가 건물이나 타워와 같은 고정된 위치에 장착된다고 가정한다. 그러나 장애물이 조밀하게 분포되어 있는 실제 시나리오 (예: 도시 시나리오)에서 고정 RIS는 사용자의 이동성으로 인해 지속적인 LoS 링크를 제공하지 않을 수 있다. 이러한 경우 무인 항공기에 탑재한 RIS (UAV-RIS)는 고정 RIS의 효율적인 대체제가 될 수 있다. 이는 UAV-RIS가 장애물을 피하도록 위치를 조정할 수 있기 때문에 지상 장애물의 방해 없이 야외에서 신뢰할 수 있는 LoS 링크를 제공할 수 있기 때문이다.

UAV-RIS가 효과적으로 동작하기 위해서는 UAV-RIS의 반사채널의 정확한 추정이 필요하다. 하지만 UAV-RIS의 이동성으로 인하여 반사채널은 빠르게 변화하기 때문에 정확한 채널 추정이 어렵다. 빠르게 변화하는 UAV-RIS의 반사채널을 추정하는 간단한 방법은 채널을 자주 추정하는 것이다 [2]. 하지만 이는 큰 파일럿 오버헤드를 발생시키기 때문에 비효율적이다.

이 논문의 주요 목적은 UAV-RIS 반사 채널에 대한 새로운 채널 추정 기법을 제시하는 것이다. 제안된 기법의 주요 아이디어는 UAV-RIS 반사 채널을 다른 시간 척도, 느린 변동 각도(즉, AoAs (angle of arrivals)) 및 AoDs (angle of departures))와 빠른 변동 경로 이득의 두 가지 주요 구성 요소로 분해하는 것이다. 구체적으로, 각도의 일관성 시간 (100~400ms)이 경로 이득(10~50ms) 보다 훨씬 긴 특성을 사용하여, 우리는 느린 주기로 각도를 추정할 수 있다 [3]. 실제로, 이 두 구성 요소 (각도와 경로 계인)를 서로 다른 시간 척도로 추정함으로써, 추정될 매개 변수의 수를 크게 줄일 수 있으며, 결과적으로 파일럿 오버헤드를 줄일 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 우리는 UAV-RIS가 포함된 TDD (time division duplexing) 기반의 mmWave communication을 고려한다. 우리는 각각

기지국이 N 개, RIS가 M 개, UE가 1개의 안테나 혹은 반사 소자를 가지고 있다고 가정한다. UAV-RIS 시스템의 채널을 추정하기 위해선 BS와 UE사이의 직접 채널 (direct channel) \mathbf{h}_d 와 UAV-RIS를 지나가는 반사 채널 (reflected channel) \mathbf{h}_r 을 모두 고려해야 한다. 장애물이 많은 도심 환경에서는 직접 링크가 막힐 확률이 높으므로 우리는 직접 채널이 막혀 있다고 가정하고 반사 채널만 고려한다. 반사 채널 \mathbf{h}_r 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{h}_r = \mathbf{G} \text{diag}(\phi) \mathbf{g} = \mathbf{H} \phi \quad (1)$$

여기서 \mathbf{G} 는 UAV-RIS와 BS 사이의 채널 행렬을 나타내고, \mathbf{g} 는 UE와 UAV-RIS 사이의 채널 벡터를 나타내며, \mathbf{H} 는 유효 UAV-RIS 반사 채널 행렬이다. BS-UAV 채널은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}_B \mathbf{A}_G \mathbf{A}_{R,G}^H \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{A}_B \in \mathbb{C}^{N \times P_B}$ 와 $\mathbf{A}_{R,G} \in \mathbb{C}^{M \times P_G}$ 는 각각 BS-UAV 채널의 AoA (angle of arrival) 행렬과 AoD (angle of departure) 행렬을 나타내고 \mathbf{A}_G 는 대각행이 $\lambda_{G,i} \sim \text{CN}(0, \rho_G)$ 인 경로 이득 행렬이며, P_G 는 BS-UAV 채널의 경로의 수를 나타낸다. 비슷하게 UAV-UE 채널 \mathbf{g} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{g} = \mathbf{A}_{R,g} \lambda_g \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{A}_{R,g} \in \mathbb{C}^{M \times P_g}$ 는 UAV-UE 채널의 AoA (angle of arrival)을 나타내며, λ_g 는 벡터 요소가 $\lambda_{g,i} \sim \text{CN}(0, \rho_g)$ 경로 이득 벡터를 나타내며, P_g 는 BS-UAV 채널의 경로의 수를 나타낸다. (2)과 (3)을 이용하여 유효 UAV-RIS 반사 채널 행렬은 다음과 같이 벡터라이즈 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{h} &= (\mathbf{A}_{R,r} \cdot \mathbf{A}_{R,g}^*) \otimes (\mathbf{1}_{P_r}^T \otimes \mathbf{A}_B) \text{vec}(\mathbf{A}_G \otimes \text{diag}(\lambda_g)) \\ &= \mathbf{A}_e \lambda \end{aligned} \quad (4)$$

우리는 채널의 각도 정보가 경로 이득보다 천천히 변화한다는 점을 이용하여 경로 이득이 변화하는 중에는 각도 정보는 변하지 않는다고 가정한다. 이때, 시변하는 경로 이득 정보는 가우스 마르코프 프로세스로 다음과 같이 표현할 수 있다 [3].

$$\lambda_{l+1} = \rho \lambda_l + \sqrt{1 - \rho^2} \mathbf{z}_l \quad (5)$$

여기서 l 은 타임 슬롯 인덱스를 나타내고, ρ 는 시간 상관도를 나타내며, $\mathbf{z}_l \sim CN(0, \mathbf{I}_{P_G, P_g})$ 은 시간 상관 되지 않는 경로 이득 성분을 나타낸다.

III. UAV-RIS 채널 추정 기법

제안된 TUCE-PS 체계의 주요 목적은 UAV-RIS 반사 채널 추정의 파일럿 오버헤드를 줄이는 것이다. 이를 위해 UAV-RIS 반사 채널을 1) 느리게 변화하는 각도와 2) 빠르게 변화하는 경로 계인의 두 가지 주요 구성 요소로 분해한다. 각도의 변화가 경로 계인의 변화보다 느리다는 특성을 이용함으로써, 우리는 각도를 산발적으로 추정할 수 있고 경로가 상대적으로 자주 증가한다.

A. 채널의 각도 추정

각도 추정 단계에서 BS는 각 각도 일관성 간격에 대해 UAV-RIS 반사 채널의 각도를 추정한다. 심각한 경로 손실과 높은 지향성으로 인해 전파 경로의 수는 mmWave 대역에 많아야 소수입니다. 경로 수의 희소성을 이용하여 적은 수의 측정으로 각도를 추정할 수 있다.

K 파일럿 심볼을 수집함으로써, 우리는 다음과 같은 선형 측정 벡터를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{y}_l = (\boldsymbol{\Phi}_l^T \otimes \mathbf{I}_N) \mathbf{A}_e \boldsymbol{\lambda}_l + \mathbf{n}_l \quad (6)$$

여기서 $\boldsymbol{\Phi}_l \in C^{M \times K}$ 위상 변이 행렬을 나타내고, \mathbf{n}_l 은 노이즈 벡터를 나타낸다. (6)을 선형 회소 시스템의 형태로 변환하면 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_l = (\boldsymbol{\Phi}_l^T \otimes \mathbf{I}_N) \overline{\mathbf{A}}_e \overline{\boldsymbol{\lambda}}_l + \mathbf{n}_l = \overline{\boldsymbol{\Sigma}}_l \overline{\boldsymbol{\lambda}}_l + \mathbf{n}_l \quad (7)$$

여기서 $\overline{\mathbf{A}}_e$ 는 사전 행렬 (dictionary matrix)를 나타내고, $\overline{\boldsymbol{\lambda}}_l$ 는 회소 경로 이득 벡터를 나타내며, $\overline{\boldsymbol{\Sigma}}_l$ 은 센싱 행렬을 나타낸다. 회소 경로 이득 벡터의 요소가 0이 아닌 위치를 찾기 위해서 OMP (orthogonal matching pursuit)과 같은 compressed sensing 기술을 이용하여 각도를 추정할 수 있다.

B. 경로 이득 추정

각도 추정이 완료되면, BS는 각 타임 슬롯에서 경로 계인을 추정한다. 이 단계에서는 경로 이득의 시간적 상관 관계를 활용하기 위해 현재 및 과거 측정을 사용하여 선형 동적 시스템의 상태(즉, 경로 계인)를 재귀적으로 추정하는 선형 필터인 칼만 필터를 사용한다 [4].

칼만 필터는 1) 예측 단계와 2) 업데이트 단계의 두 가지 주요 단계로 구성된다. 구체적으로, 예측 단계에서 경로 이득 벡터 $\tilde{\boldsymbol{\lambda}}_l$ 와 오차 공분산 행렬 $\tilde{\mathbf{P}}_l$ 을 다음과 같이 예측한다.

$$\tilde{\boldsymbol{\lambda}}_l = \rho \hat{\boldsymbol{\lambda}}_{l-1} \quad (8)$$

$$\tilde{\mathbf{P}}_l = \rho^2 \hat{\mathbf{P}}_{l-1} + (1 - \rho^2) \mathbf{I}_{P_g^2} \quad (9)$$

여기서 $\hat{\boldsymbol{\lambda}}_{l-1}$ 와 $\hat{\mathbf{P}}_{l-1}$ 는 각각 업데이트된 경로 이득 벡터와 오차 공분산 행렬이다. 업데이트 단계에서는 파일럿 측정치를 이용하여 예측 단계에서 예측한 값을 보정하며 보정된 경로 이득 벡터와 오차 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$\hat{\boldsymbol{\lambda}}_l = \tilde{\boldsymbol{\lambda}}_l + \mathbf{K}_l (\mathbf{y}_l - \boldsymbol{\Sigma}_l \tilde{\boldsymbol{\lambda}}_l) \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_l = \tilde{\mathbf{P}}_l - \mathbf{K}_l \boldsymbol{\Sigma}_l \tilde{\mathbf{P}}_l \quad (11)$$

여기서 $\mathbf{K}_l = \tilde{\mathbf{P}}_l \boldsymbol{\Sigma}_l^H (\boldsymbol{\Sigma}_l \tilde{\mathbf{P}}_l \boldsymbol{\Sigma}_l^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_N)^{-1}$ 는 칼만 이득을 나타낸다. 마지막으로 업데이트 단계를 통해 얻은 경로 이득과 미리 추정된 각도 정보를

합쳐 최종 UAV-RIS 반사 채널 정보를 추정할 수 있다.

IV. 실험 결과

그림 1에서는 수신 SNR의 함수로서 NMSE를 도시하였다. 우리는 제안된 TUCE-PS 기법이 기존의 채널 추정 체계를 큰 폭으로 능가한다는 것을 관찰한다. 예를 들어, 10dB일 때, 제안된 기법은 기존의 LS 기반 및 EKF 기반 추정 체계에 비해 각각 상당한 이득(10dB 및 7dB NMSE 이득)을 달성한다. 기존의 CS 기반 채널 추정 방식과 비교하더라도 제안된 방식의 NMSE 이득은 5dB 이상이다. 이는 TUCE-PS가 시간적 및 공간적 상관관계를 모두 사용하여 채널을 추정하는 반면 다른 벤치마크는 공간적 상관관계만 활용하기 때문이다.

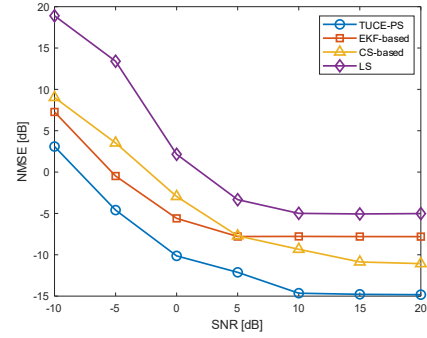


그림 1. 수신 SNR에 따른 NMSE

V. 결론

본 논문에서는 mmWave UAV-RIS 통신 시스템에 대한 효율적인 채널 추정 기법을 제안하였다. 제안된 기법의 핵심 아이디어는 UAV-RIS 반사 채널을 느린 변동 각도 및 빠른 변동 경로 이득으로 분해한 다음 이러한 채널 구성 요소를 다른 시간 척도로 추정하는 것이다. 그렇게 함으로써, 우리는 추정될 매개 변수의 수를 줄일 수 있고, 결과적으로 파일럿 오버헤드를 줄일 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

"본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2021-0-02048)

참고 문헌

- [1] Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming," *IEEE Trans. on Wire. Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 5394-5409, Nov. 2019.
- [2] T. Shafique, H. Tabassum and E. Hossain, "Optimization of Wireless Relaying With Flexible UAV-Borne Reflecting Surfaces," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 69, no. 1, pp. 309-325, Jan. 2021.
- [3] C. Hu, L. Dai, S. Han and X. Wang, "Two-Timescale Channel Estimation for Reconfigurable Intelligent Surface Aided Wireless Communications," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 69, no. 11, pp. 7736-7747, Nov. 2021.
- [4] V. Va, H. Vikalo and R. W. Heath, "Beam tracking for mobile millimeter wave communication systems," in *proc. IEEE GlobalSIP*, Dec. 2016, pp. 743-747.