

RIS 기반 채널 추정 및 보정 기술의 최근 연구 동향

정수민*

금오공과대학교

sumin.jeong@kumoh.ac.kr

Recent Research Trends in Channel Estimation and Compensation Techniques for Reconfigurable Intelligent Surface assisted communications

Sumin Jeong*

Kumoh National Institute of Technology

요약

본 논문은 6G 핵심 기술로 부상한 재구성 지능형 표면(RIS)의 채널 모델/추정/보정에 대한 최근 동향을 정리한다. 연쇄 채널 모델과 임피던스(상호 결합) 기반 모델의 장단을 대비하고, 파일럿/압축 센싱/인공지능 기반 채널 추정의 발전 흐름을 요약한다. 또한 위상 오차, 주파수 오프셋, 비선형성에 대한 보상 기법을 정리하여 실제 구현 이슈를 조망한다. 마지막으로 현실성 높은 모델링과 AI 기반 저복잡도 추정/보상의 결합이 향후 핵심 연구 방향임을 제시한다.

I. 서론

재구성 지능형 표면(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)은 차세대 6G 이동통신의 핵심 기술로 주목받고 있다. RIS는 다수의 반사 소자를 통해 무선 전파 환경을 능동적으로 제어함으로써, 주파수 효율/에너지 효율/커버리지 개선 등 다양한 이점을 제공할 수 있다 [1]. 그러나 이러한 잠재력을 실현하기 위해서는 정밀한 채널 추정(channel estimation)과 효과적인 채널 보정(channel compensation)이 필수적이다 [2].

기존 다중 안테나 시스템과 달리, RIS 기반 채널은 송신기 - RIS - 수신기로 이어지는 연쇄 채널 구조를 가지며, 이로 인해 추정 오버헤드와 계산 복잡도가 크게 증가한다. 더 나아가 RIS 소자의 위상 잡음 및 하드웨어 불완전성으로 인해 시스템 성능이 저하되므로, 이를 보완하기 위한 보정 기법의 필요성이 커지고 있다. 이러한 이유로 최근 수년간 파일럿 기반 추정, 압축 센싱, 인공지능(AI) 활용 기법 등 다양한 접근 방법이 활발히 연구되고 있다 [3].

본 논문에서는 RIS 기반 채널 추정 및 보정과 관련된 최신 연구 동향을 간략히 정리한다. 먼저 채널 추정 기법을 주요 범주별로 소개하고, 이어서 보정 기법의 대표적 접근 방법을 살펴본다. 마지막으로 아직 해결되지 않은 연구 과제와 향후 발전 방향을 제시한다.

II. 본론

A. 채널 추정 알고리즘 연구 동향

RIS 기반 통신의 성능 분석을 위해서는 적절한 채널 모델이 선행되어야 하며, 최근 연구는 크게 두 가지 방향으로 구분된다.

- **연쇄(cascaded) 채널 모델:** 송신기 - RIS - 수신기로 이어지는 연쇄 구조를 기반으로, RIS 채널을 두 구간(송신기 - RIS, RIS - 수신기)으로 분리하여 행렬 곱 형태로 모델링하는 방식이다. 이 접근은 수학적으로 단순하며 시스템 레벨 분석 및 알고리즘 설계에 널리 활용되고 있다. 특히 빔포밍 최적화나 채널 추정 알고리즘의 이론적 성능을 도출하는 데 적합하다. 그러나 이상적인 반사 계수와 독립적인 RIS 소자를 가정하는 경우가 많아, 실제 하드웨어 구현에서 발생하는 상호

결합 효과나 손실을 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다 [4].

- **임피던스 기반 모델:** 전자기학적 관점에서 RIS를 임피던스 행렬로 모델링하고, 각 소자 간의 상호 결합(mutual coupling)을 고려하는 방식이다. 이 접근은 RIS 반사 특성을 현실적으로 묘사할 수 있으며, 반사 소자의 위상 - 진폭 연동 효과나 재방사 손실과 같은 하드웨어적 제약을 반영할 수 있다. 대표적으로 Di Renzo 교수 연구진은 mutual impedance 기반 EM-compliant 모델을 제안하여, 실제 RIS 하드웨어에서 발생하는 효과를 고려한 성능 분석 방법론을 제시하였다. 이러한 모델은 시스템 차원의 분석보다는 하드웨어 - 채널 공동 설계를 위한 기반으로 주목받고 있다 [5].

이처럼 연쇄 채널 모델은 단순성과 분석 용이성 측면에서 강점이 있으며, 임피던스 기반 모델은 물리적 타당성과 현실성을 제공한다. 최근 연구에서는 두 모델의 장점을 결합하여, 시스템 수준 분석과 하드웨어 현실성을 동시에 고려하려는 시도가 증가하고 있다.

B. 채널 추정 알고리즘 연구 동향

RIS 채널 추정은 고차원 특성과 연쇄 구조로 인해 파일럿 신호 overhead가 크고 연산 복잡도가 높다. 이를 해결하기 위해 최근 다음과 같은 방향의 연구가 활발하다.

- **파일럿 기반 추정(Pilot-based estimation):** RIS 반사 패턴을 순차적으로 변경하면서 연쇄 채널을 간접적으로 추정하는 방식이다. 단순 구현이 가능하다는 장점으로 초기 연구에서 주로 활용되었으나, 반사 소자 수가 많아질수록 파일럿 길이가 선형적으로 증가한다는 한계가 지적되었다. 일부 연구에서는 최소 패턴 설계나 최적화된 파일럿 배치를 통해 오버헤드를 줄이는 방안이 제시되었다 [6].
- **압축 센싱(Compressed Sensing, CS):** RIS 채널이 주파수 및 공간 영역에서 희소(sparse) 구조를 가진다는 점에 착안하여, 필요한 측정 횟수를 줄이고 효율적으로 추정하는 방법이다. Orthogonal Matching Pursuit(OMP), Basis Pursuit(BP) 등의 희소 복원 기법이 적용되었으며, mmWave 대역과 같은 대규모 RIS 환경에서 효율성이 입증되고 있다. 다만 채널이 희소하지 않은 환경에서는 성능 저하가 발생할

수 있다는 제한이 존재한다 [7].

- **인공지능 기반 추정(AI/ML-based):** 최근에는 딥러닝 모델을 활용해 고차원 연쇄 채널을 저복잡도로 추정하거나, 파일럿 기반·압축 센싱 기반 추정을 보완하는 하이브리드 접근이 제안되고 있다. 예를 들어, CNN·RNN 기반 구조를 이용해 채널의 공간적·시간적 상관성을 학습하거나, 사전 정보(prior knowledge)를 반영해 일반화 성능을 향상시키는 방법이 연구되고 있다. 특히 AI 기반 기법은 비선형 하드웨어 효과나 모델링 불완전성을 학습 기반으로 보완할 수 있다는 점에서 큰 잠재력을 가진다 [8].

이러한 연구들은 공통적으로 추정 정확도와 오버헤드/복잡도 간의 균형을 맞추는 데 초점을 두고 있으며, 최근에는 하이브리드 방식과 AI 기반 접근이 새로운 흐름으로 자리잡고 있다.

C. 채널 보정 알고리즘 연구 동향

RIS의 이상적인 반사 특성과 달리, 실제 하드웨어에서는 위상 오차, 주파수 오프셋, 비선형성 등이 발생한다. 이를 보상하기 위한 다양한 기법이 연구되고 있다.

- **위상 오차 보정:** RIS 소자의 위상 양자화/위상 잡음/온도/공정 편차로 인한 위상 편이를 캘리브레이션(사전/자체), 차등 파일럿, 순환 패턴 탐색, 그리고 모델 기반(EM-compliant) 또는 학습 기반 보정으로 추정/보상한다. 느리게 변하는 소자 편차는 저주파(느린 타임스케일)로, 빠른 채널 변화는 고주파(빠른 타임스케일)로 분리 추정하여 오버헤드를 줄이는 방향 등이 연구되고 있다 [9].
- **주파수 오프셋 보정:** 송수신기 간 CFO와 RIS 제어/동기 불일치로 생기는 순환 위상 회전을 연쇄 채널 모델에 통합해 공동 추정 - 보상한다. 파일럿-보강 EKF/PLL류 추적, 블록-순환 최소자승, 및 AI 보조(딥러닝 기반 CFO 추정)로 빠른 타임스케일에서 CFO를 추적하고, 느린 타임스케일에서는 RIS 패턴(반사행렬)을 재최적화하여 잔여 오차에 강건하게 만드는 연구 등이 진행되고 있다 [10].
- **비선형성 보정:** 소자 반사계수의 진폭 - 위상 결합(APC), 바랙터/바이어스 비선형, 재방사 손실 및 클리핑 등 하드웨어 비선형성을 임피던스/상호결합 모델로 파라미터화하고, 디지털 프리디스토션(DPD)·록업 보정표·저차 근사(폴리노미얼/스플라인) 또는 학습 기반 역모델(신경망)로 보상한다. 시스템 레벨에서는 스펙트럴 효율/BER 저하를 최소화하도록 RIS-패턴과 활성 빔포밍을 공동 재설계해 복잡도 대비 성능을 균형화하는 논문들이 발표되고 있다 [11].

최근에는 AI 기반 보정 기법이 제안되어, 불완전한 하드웨어 환경에서도 성능을 안정적으로 유지하는 연구가 주목받고 있다.

III. 결론

본 논문에서는 RIS 기반 채널 모델, 채널 추정, 그리고 채널 보정 기술에 대한 최근 연구 동향을 간략히 정리하였다. 연쇄 채널 모델과 임피던스 기반 모델은 각각 분석 용이성과 현실성을 제공하며, 다양한 연구에서 상호 보완적으로 활용되고 있다. 채널 추정 기법은 파일럿 기반, 압축 센싱, 인공지능 기반 접근으로 발전하며, 오버헤드와 정확도 간의 균형을 맞추려는 노력이 두드러진다. 또한 위상 오차, 주파수 오프셋, 하드웨어 비선형성 등 실제 환경에서 발생하는 불완전성을 보상하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 향후에는 모델링의 현실성 확보와 AI 기반 저복잡도 추정/보상 기법을 결합한 연구가 핵심 방향이 될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신 기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2020-II201612).

참 고 문 헌

- [1] E. Basar, M. Di Renzo et. al., "Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces," in IEEE Access, vol. 7, pp. 116753-116773, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935192..
- [2] Y. Liu et. al, "Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 3, pp. 1546-1577, thirdquarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3077737.
- [3] M. A. ElMossallamy et. al, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Principles, Challenges, and Opportunities," in IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, vol. 6, no. 3, pp. 990-1002, Sept. 2020, doi: 10.1109/TCCN.2020.2992604.
- [4] J. Zhanget. al, "Cascaded channel modeling and experimental validation for RIS assisted communication system," 2024 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Cape Town, South Africa, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/GCWkshp64532.2024.11101558.
- [5] G. Gradoni and M. Di Renzo, "End-to-End Mutual Coupling Aware Communication Model for Reconfigurable Intelligent Surfaces: An Electromagnetic-Compliant Approach Based on Mutual Impedances," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 5, pp. 938-942, May 2021, doi: 10.1109/LWC.2021.3050826.
- [6] Y. Yang, B. Zheng, S. Zhang and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface Meets OFDM: Protocol Design and Rate Maximization," in IEEE Transactions on Communications, vol. 68, no. 7, pp. 4522-4535, July 2020, doi: 10.1109/TCOMM.2020.2981458.
- [7] X. Shi, J. Wang and J. Song, "Triple-Structured Compressive Sensing-Based Channel Estimation for RIS-Aided MU-MIMO Systems," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 21, no. 12, pp. 11095-11109, Dec. 2022, doi: 10.1109/TWC.2022.3189686.
- [8] M. Liu, X. Li, B. Ning, C. Huang, S. Sun and C. Yuen, "Deep Learning-Based Channel Estimation for Double-RIS Aided Massive MIMO System," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 12, no. 1, pp. 70-74, Jan. 2023, doi: 10.1109/LWC.2022.3217294.
- [9] I. Trigui et. al., "Performance Evaluation and Diversity Analysis of RIS-Assisted Communications Over Generalized Fading Channels in the Presence of Phase Noise," in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 3, pp. 593-607, 2022, doi: 10.1109/OJCOMS.2022.3160722.
- [10] S. Jeong, A. Farhang, N. S. Perović and M. F. Flanagan, "Joint CFO and Channel Estimation for RIS-Aided Multi-User Massive MIMO Systems," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no. 9, pp. 11800-11813, Sept. 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3268247.
- [11] C. Qing, L. Wang, L. Dong and J. Wang, "Enhanced ELM Based Channel Estimation for RIS-Assisted OFDM Systems With Insufficient CP and Imperfect Hardware," in IEEE Communications Letters, vol. 26, no. 1, pp. 153-157, Jan. 2022, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3123736.