

이동 통신 환경에서 그룹화된 RIS 요소를 활용한

저복잡도 이중 시간 스케일 추정 기법

김채영, 안지훈, 이종학, 배석현, 장현빈, 정수민*

금오공과대학교

cyo0421000@naver.com, sumin.jeong@kumoh.ac.kr

Low-complexity Two-time Scale Channel Estimation Method

Using RIS Elements Grouping in Mobile Communications

Chaeyoung Kim, Jihun An, Jonghak Lee, Seokhyeon Bae, Hyunbin Jang, Sumin Jeong*

Kumoh National Institute of Technology.

요약

본 논문에서는 재구성 가능한 지능형 표면(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)을 활용하는 무선 통신 시스템에서의 RIS 그룹화 및 DFT 기반 보간법 기반 이중 시간 스케일 기반 채널 추정 기법을 제안한다. RIS 하위 그룹 크기별 채널 추정 정확도를 NMSE 성능지표로 정량 분석하였으며, 계산 복잡도와 성능 간의 상충 관계를 실험적으로 규명하였다.

I. 서론

차세대 무선 통신 환경에서는 에너지 효율성과 스펙트럼 효율성 모두를 극대화할 수 있는 기술이 요구된다. 이러한 요구를 충족하기 위한 기술로 재구성 가능한 반사 표면(RIS)이 주목받고 있다 [1],[2],[3]. RIS는 저전력의 메타 물질로 구성된 수동 소자들을 배열하며, 반사 신호를 능동적으로 조절하는 새로운 개념의 기술이다 [1],[2]. 무선 통신 시스템에서는 RIS가 기지국(BS)과 사용자(UE) 사이의 채널을 인위적으로 제어함으로써 통신 품질을 향상시킬 수 있다 [1],[2],[3]. 하지만, RIS의 반사 패턴 최적화를 위해서는 모든 RIS 반사 채널에 대한 정확한 추정이 필요하며, 이는 많은 수의 RIS 소자와 UE 수로 인해 계산 복잡도가 급격히 증가하는 문제가 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 이중 시간 스케일 기반 채널 추정 기법 [1]이 제안되었으나 여전히 높은 계산 복잡도가 요구된다. 본 논문에서는 RIS 소자들을 일정 단위로 그룹화하여 계산 복잡도를 줄이는 방식을 제안한다. 최종적으로 DFT 보간법을 통해 그룹화된 채널에서 전체 채널을 추정한다.

II. 제안하는 논문

II-1. 시스템 모델

본 논문에서는 M 개의 안테나를 가지는 BS가 N 개의 반사요소를 가지는 RIS를 활용하여 K UE와 통신하는 무선 시스템을 고려한다. t 번째 시간 슬롯에서 BS에 수신되는 신호는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K [\mathbf{G}(\Phi_t \odot \mathbf{f}_k) + \mathbf{h}_k] \mathbf{x}_k + \mathbf{n} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 는 BS와 RIS 간 채널, $\mathbf{f}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 RIS와 UE k 간 채널, $\Phi_t \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 RIS의 전체 반사 벡터, \odot 는 아다마르 곱, $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 BS와 UE k 간 직접 채널, $\mathbf{x}_k \in \mathbb{C}$ 는 UE k 가 전송하는 업링크 심볼, $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ 는 AWGN을 나타낸다.

II-2. 채널 추정 알고리즘

본 논문에서는 RIS의 전체 반사 벡터 $\Phi_t \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 소수의 그룹 기반 반사 계수를 DFT 보간 행렬 $\mathbf{F}_{\text{DFT}} \in \mathbb{C}^{N \times G}$ 를 통해 생성한다:

$$\Phi_t = \mathbf{F}_{\text{DFT}} \tilde{\Phi}_t \quad (2)$$

이를 통해 차원을 크게 줄이면서도 공간적으로 구조적인 반사 특성을 유지할 수 있다.

각 RIS 그룹 g 에 대해, BS 안테나 쌍 간 상관 측정값 $a_{m_1, m_2, g}$ 을 기반으로 좌표 강하 방식으로 $g_{m, g}$ 를 반복 최적화한다:

$$\min_{\{g_{m, g}\}} \sum_{(m_1, m_2)} |a_{m_1, m_2, g} - g_{m_1, g} g_{m_2, g}|^2 \quad (3)$$

그룹 단위로 추정된 $\hat{\mathbf{G}}^{(\text{Group})}$ 을 DFT 행렬의 전치와 곱하여 전체 RIS 크기에 맞는 고차원 채널 $\hat{\mathbf{G}} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 로 확장한다:

$$\hat{\mathbf{G}} = \hat{\mathbf{G}}^{(\text{Group})} \mathbf{F}_{\text{DFT}}^T \quad (4)$$

여기서 $(\cdot)^T$ 는 벡터/행렬의 전치를 의미한다. RIS 반사 벡터가 DFT 기반 보간 형태일 때, 수신 신호는 \mathbf{f}_k , \mathbf{h}_k 에 대해 선형 구조를 갖는다

$$\tilde{\mathbf{y}}_{k, t} = [\hat{\mathbf{G}} \text{diag}(\mathbf{F}_{\text{DFT}} \tilde{\Phi}_t) \mathbf{I}_M] [\mathbf{f}_k, \mathbf{h}_k]^T + \tilde{\mathbf{n}}_{k, t} \quad (5)$$

이를 바탕으로 최소자승 기반 추정이 가능하다. 최소자승 방법을 기반으로 RIS-UE 채널 \mathbf{h}_k 를 동시에 추정한다:

$$[\hat{\mathbf{f}}_k, \hat{\mathbf{h}}_k]^T = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \tilde{\mathbf{y}}_k \quad (6)$$

여기서 $(\cdot)^{-1}$ 과 $(\cdot)^T$ 는 각각 역행렬 연산자와 켈레 전치 연산자를 의미한다.

전체 cascade 채널은 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{\mathbf{C}}_k = \mathbf{G} \text{diag}\{\mathbf{f}_k\} \quad (7)$$

추정된 채널은 위상 및 크기 차이를 포함할 수 있으므로, 보정 계수를 통해 방향성만 맞추어 스케일 보정을 수행한다:

$$\hat{\mathbf{C}}_k = \beta_k \hat{\mathbf{C}}_k = \frac{(\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)}{\|\mathbf{C}_k\|_F^2} \quad (8)$$

여기서 $\|\cdot\|_F$ 는 유클리디안 놈 연산자를 의미한다.

III. 시뮬레이션 성능 분석

제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 실험적 성능평가를 수행하였다. BS의 안테나 수 $M = 32$, RIS의 총 소자 수 $N = 256$, 사용자 수 $K = 8$, 그리고 시간 슬롯 당 파일럿 수는 $T = 16$ 로 설정하였다.

그림 1은 하나의 하위 그룹 내에 포함된 RIS 반사 요소 수의 수에 따른 채널 추정 성능을 나타낸다. G-

Known 구조는 달성 가능한 최상의 성능을 보여주고 Group-256 은 가장 낮은 성능을 나타낸다. 그룹 내에 포함된 반사 요소의 수가 적을수록 그룹 수가 많아져 보다 정밀한 추정이 가능하므로 G-Known 에 근접한 성능을 보인다. 그룹 내 요소 수가 많아질수록 필요한 파일럿 수가 줄어들기 때문에 성능과 파일럿 오버헤드 간의 상충 관계가 존재함을 확인할 수 있다.

그림 2 는 사용자와 RIS 간 거리 변화에 따른 채널 추정 성능을 보여준다. 모든 방식에서 거리 증가에 따라 NMSE 가 상승하며 전체적인 성능이 저하된다. Group-4 는 전 구간에서 G-known 과 유사한 성능을 유지한다. Group-256 과 DFT 보간법은 거리 변화에 따라 성능 열화가 크게 나타난다. Group-16 과 Group-64 는 복잡도를 줄이면서도 일정 수준의 성능을 유지한다.

그림 3 은 그룹 크기에 따른 DFT 보간 연산량을 비교한 결과이다. 그룹 크기가 작을수록 많아지며 그에 따라 보간에 필요한 연산량이 증가한다. Group-4 는 가장 많은 연산량을 요구하고 Group-256 은 가장 적은 연산량을 보인다. 이는 그룹 크기에 따라 계산 복잡도가 크게 달라짐을 보여준다.

IV. 결론 및 미래계획

본 논문에서는 RIS 그룹화 및 DFT 보간법을 활용한 이중 시간 스케일 기반 채널 추정 기법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 RIS 반사 요소를 일정 단위로 그룹화하는 방식이 계산 복잡도를 효과적으로 절감하면서도 이상적인 성능에 근접한 채널 추정 성능을 유지함을 확인하였다. 또한 DFT 보간법을 적용함으로써 그룹화로 인한 성능 열화를 개선할 수 있음을 보였다. 이러한 결과는 대규모 RIS 시스템에서 성능과 연산량 사이의 균형을 고려한 채널 추정 구조 설계에 유의미한 기준을 제공한다. 향후 연구에서는 사용자 이동성과 RIS 배치 최적화, 하드웨어 제약 조건을 반영한 실환경 기반 적용 가능성에 대한 추가적인 확장을 계획하고 있다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] C. Hu, L. Dai, S. Han, and X. Wang, "Two-Timescale Channel Estimation for Reconfigurable Intelligent Surface Aided Wireless Communications," IEEE Trans. Commun., vol. 69, no. 11, pp. 7736-7747, Nov. 2021.
- [2] B. Zheng et al., "A Survey on Channel Estimation and Practical Passive Beamforming Design for RIS-Aided Wireless Communications," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 24, no. 2, 2022.
- [3] X. Hu, R. Zhang, C. Zhong, "Semi-Passive Elements Assisted Channel Estimation for Intelligent Reflecting Surface-Aided

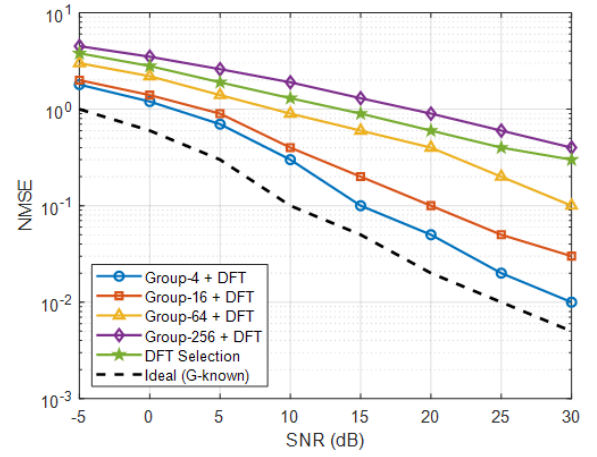


그림 1. SNR 에 따른 그룹화 별 채널 추정 성능 비교

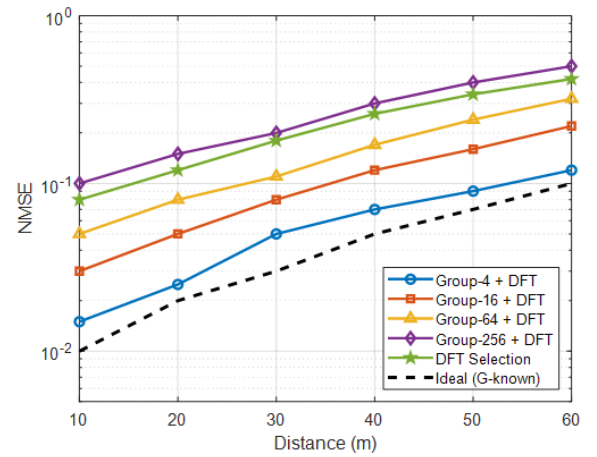


그림 2. 거리변화에 따른 성능비교

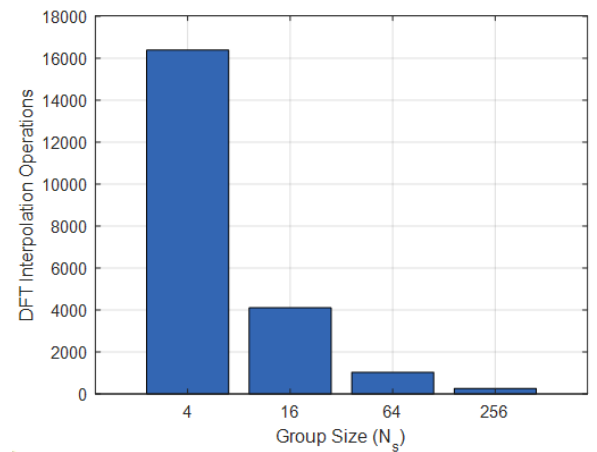


그림 3. 그룹내 RIS 반사 요소 수에 따른 계산 복잡도

- Communications," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 21, no. 2, pp. 1132-1142, Feb. 2022.
- [4] Y. Chen et al., "Angular-Distance Based Channel Estimation for Holographic MIMO," IEEE J. Sel. Areas Commun. (Early Access), Nov. 2023.
- [5] J. Lee, S. Hong, "Two-Timescale Channel Estimation for RIS-Aided Near-Field Communications," Proc, IEEE ICC Workshops, 2022