

RIS 기반 다중 사용자 환경에서 채널 추정 오차를 고려한 교대 최적화 기법에 대한 연구

^{1,3}최민혁, ²이지우, ²한조은, ²윤영환, ^{1,3}송형규*

¹세종대학교 정보통신공학과, ²세종대학교 전자정보통신공학과, ³세종대학교 지능형드론융합전공

alsgurkk@sju.ac.kr, ezu414@sju.ac.kr, hjeun001@sju.ac.kr, rh1flf1fk1@sju.ac.kr,
*songhk@sejong.ac.kr

A Study on Alternating Optimization Scheme Considering Channel Estimation Error in RIS-based Multi-User Environment

^{1,3}Min-Hyeok Choi, ²Ji-Woo Lee, ²Jo-Eun Han, ²Young-Hwan Youn, ^{1,3}Hyoung-Kyu Song*

¹Department of Information and Communication Engineering, ²Electronic Information and Communication Engineering and ³Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University, Seoul, 209 Neungdong-ro, 05006, Korea

요약

지능형 반사 표면(RIS: Reconfigurable Intelligent Surface)은 전자기파의 위상을 제어하여 무선 채널 환경을 능동적으로 조절할 수 있는 기술이다. 그러나 RIS는 수동 소자로 동작하므로 기지국이나 단말에서 정확한 채널 상태 정보(CSI)를 획득하는 데 어려움이 따르며, 이는 범포밍 이득 감소와 심각한 성능 저하를 초래한다. 본 논문에서는 RIS 기반 다중 사용자 환경에서 채널 추정 오차가 존재하는 상황을 가정하고, 이를 극복하기 위한 교대 최적화(Alternating Optimization) 기법을 제안한다. 제안 기법은 송신 범포밍과 RIS 위상 제어를 반복적으로 수행하여 불완전한 CSI 하에서도 시스템의 합 전송률을 최대화한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 오차 환경($\rho = 0.96$)에서도 안정적인 BER 및 Sum Rate 성능을 유지하여 강인함을 입증하였다.

I. 서 론

차세대 무선 통신 시스템에서는 폭증하는 데이터 트래픽을 수용하고 에너지 효율을 높이기 위해 RIS 기술이 활발히 연구되고 있다.[1] RIS는 다수의 저전력 수동 소자로 구성되어 입사된 신호의 위상을 조절함으로써 가상적인 Line-of-Sight(LoS) 경로를 형성하고 수신 신호 강도를 극대화 한다. RIS의 이득을 얻기 위해서는 기지국과 RIS 간의 능동 범포밍 및 RIS의 수동 범포밍을 결합한 최적화가 필수적이다.[3] 그러나 실제 환경에서는 정확한 채널 상태 정보(CSI)를 획득하기 어려우며, 특히 RIS와 사용자 간의 채널 추정 오차(Imperfect CSI)는 사용자 간 간섭을 유발하여 시스템 성능을 제한하는 주요 요인인 된다.[2] 따라서 본 논문에서는 채널 추정 오차가 존재하는 RIS 기반 다중 사용자 시스템을 모델링하고, 이에 강인한 교대 최적화(AO) 기법의 성능을 분석한다.

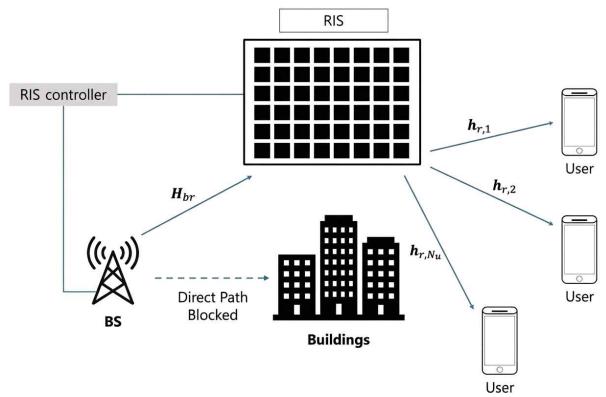
II. 본론

A. 시스템 모델

본 논문은 $N_t = 8$ 개의 안테나를 갖춘 기지국, $N_r = 64$ 개의 반사 소자를 가진 RIS, $N_u = 4$ 명의 단일 안테나 사용자로 구성된 하향링크 시스템을 고려한다. 기지국에서 RIS를 거쳐 k 번째 사용자로 전송되는 신호는 다음과 같다.

$$y_k = \mathbf{h}_{r,k}^H \Phi \mathbf{H}_{br} w_k s_k + \sum_{j \neq k} \mathbf{h}_{r,k}^H \Phi \mathbf{H}_{br} w_j s_j + n_k \quad (1)$$

여기서 \mathbf{H}_{br} 은 기지국-RIS 채널, $\mathbf{h}_{r,k}$ 는 RIS-사용자 k 채널, Φ 는 RIS 위상 행렬, w_k 는 범포밍 벡터이다. 본 시스템은 ZF(Zero-Forcing) 프리코딩을 사용하여 범포밍 벡터 w_k 를 설계한다. 만약 기지국이 완벽한 채널 정보(Perfect CSI)를 가지고 있다면 ZF 프리코딩을 통해 사용자 간 직교성이 보장되므로, 위 식의 두 번째 항인 사용자 간 간섭(Inter-User Interference)은 제거된다. 그러나 본 논문과 같이 채널 추정 오차가 존재하는 불완전한 CSI(Imperfect CSI) 환경에서는 프리코더가 실제 채널과 완벽히 일치하지 않는다. 따라서 시스템 모델 식과 같이 사용자 간 간섭 항이 여전히 존재하게 되며, 이는 전체적인 시스템 성능 저하의 원인이 된다.



[그림 1] RIS 기반 다중 사용자 시스템 모델

B. 불완전한 CSI 모델

실제 환경에서 발생하는 추정 오차를 반영하기 위해, 실제 채널 $h_{r,k}$ 를 추정 채널 $\hat{h}_{r,k}$ 와 오차 항의 선형 결합으로 모델링한다.[2]

$$h_{r,k} = \rho \hat{h}_{r,k} + \sqrt{1 - \rho^2} e_k, \forall k \in \mathcal{K} \quad (2)$$

여기서 $\rho (0 \leq \rho \leq 1)$ 는 채널 신뢰도를 나타내는 상관계수이며, e_k 는 추정 오차 벡터이다. 본 연구에서는 $\rho = 0.96$ 인 불완전한 CSI 환경을 가정한다.

C. 교대 최적화(AO) 기법

본 논문에서는 추정된 채널 \hat{H}_{ru} 를 기반으로 시스템의 Sum Rate를 최대화하기 위해 송신 프리코딩 행렬 W 와 RIS 위상 행렬 ϕ 를 교대로 최적화하는 기법을 사용한다. 먼저, RIS 위상 ϕ 를 고정한 상태에서 유효 채널 \hat{H}_{eff} 에 대해 ZF 기법을 적용하여 송신 빔포밍 벡터 W 를 결정한다.

$$\tilde{W} = \hat{H}_{eff}^H (\hat{H}_{eff} \hat{H}_{eff}^H)^{-1}, W^{(i+1)} = \sqrt{P_{total}} \frac{\tilde{W}}{\|\tilde{W}\|_F} \quad (3)$$

이때 프리코더는 불완전한 추정 채널을 기반으로 설계되므로, 사용자 간 간섭이 완전히 제거되지 않고 잔여 간섭이 존재하게 된다. 이어서 생성된 W 를 고정한 채, 수신 신호의 전력 합이 최대가 되도록 RIS의 각 반사 소자 위상을 제어한다.

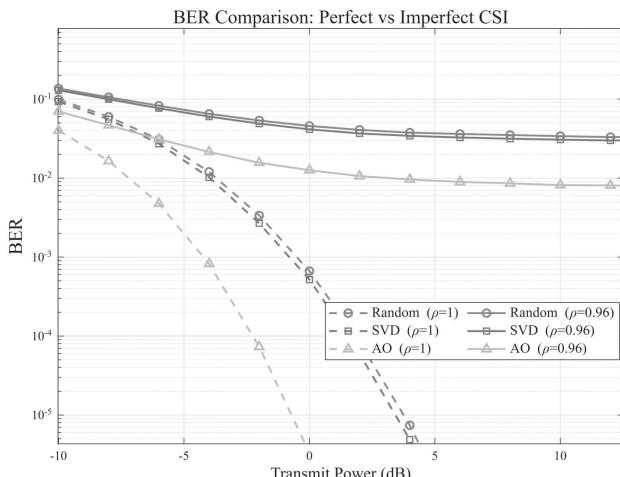
$$\phi_n^{(i+1)} = \exp \left(j \angle \left(\sum_{k=1}^{N_r} \hat{h}_{r,k,n} h_{b,n}^T w_k^{(i+1)} \right) \right) \quad (4)$$

여기서 $\hat{h}_{r,k,n}$ 은 n 번째 RIS 소자와 사용자 k 간의 추정 채널 계수이다.

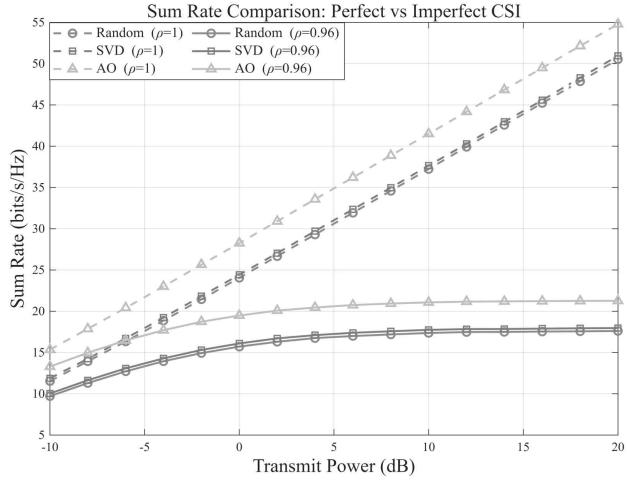
이러한 송신 빔포밍 생성과 위상 최적화 과정은 총 5번 수행되어 해를 도출한다.

D. 시뮬레이션 결과

그림 [2], [3]은 각각 전송 전력에 따른 BER, Sum Rate 성능을 보여준다. 불완전한 CSI 환경에서 SVD 및 Random 기법은 채널 오차로 인한 잔여 간섭 때문에 높은 전력에서도 성능 개선이 제한적이다. 반면, 제안된 AO 기법은 반복적인 최적화를 통해 SVD 및 Random 기법에 비해 우수한 BER 및 Sum Rate 성능을 달성한다.



[그림 2] 전송 전력에 따른 BER 그래프



[그림 3] 전송 전력에 따른 Sum Rate 그래프

III. 결론

본 논문에서는 RIS 기반 다중 사용자 시스템에서 필연적으로 발생하는 채널 추정 오차 문제를 해결하기 위해 교대 최적화 기반의 빔포밍 기법을 연구하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 불완전한 채널 정보 하에서도 빔포밍을 최적화하여 시스템의 신뢰성과 용량을 향상시킴을 확인하였다. 결론적으로, 불완전한 CSI 환경일수록 단순한 채널 정렬보다는 빔포밍의 결합적 최적화가 시스템 성능 유지에 필수적임을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다 (No. 2020R1A6A1A03038540). This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2020R1A6A1A03038540). 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송혁신인재양성(메타버스융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었습니다 (IITP-2025-RS-2023-00254529). This work was supported by Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) under the metaverse support program to nurture the best talents (IITP-2025-RS-2023-00254529) grant funded by the Korea government(MSIT). 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (IITP-2025-RS-2024-00438007). This work was supported by the IITP (Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation)-ITRC (Information Technology Research Center) grant funded by the Korea government(Ministry of Science and ICT) (IITP-2025-RS-2024-00438007).

참고 문헌

- [1] E. Basar, et al., "Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces," IEEE Access, vol. 7, pp. 116753–116773, 2019.
- [2] G. Zhou, et al., "Framework of Robust Transmission Design for IRS-Aided MISO Communications With Imperfect Cascaded Channels," IEEE Trans. Signal Process., vol. 68, 2020.
- [3] Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming," IEEE Trans. Wireless Commun., 2019.