

IRS 도움 다중사용자 시스템을 위한 CSI 프리 블라인드 범포밍 및 사용자 스케줄링

박재현, 김준수, 김수민*

한국공학대학교

{ntop3, junsukim, *suminkim}@tukorea.ac.kr

CSI-Free Blind Beamforming and User Scheduling for IRS-Aided Multiuser Systems

Jae Hyun Park, Junsu Kim, Su Min Kim*

Tech University of Korea

요약

본 논문에서는 IRS 도움 다중 사용자 시스템을 위한 CSI-free 블라인드 범포밍 및 사용자 스케줄링 기법을 제안한다. 제안 기법은 기존 적응형 CSM (conditional sample mean) 블라인드 범포밍 기법을 다중 사용자 환경으로 확장하고, 수신 전력 기반 분산 사용자 스케줄링을 통해 채널 정보 없이도 높은 전송률을 달성한다. 제안 Scheme 1은 모든 사용자에 대해 전체 최적화를 수행한 후 최고 수신 전력 사용자를 선택하며, 제안 Scheme 2는 조기 사용자 선택을 통해 오버헤드를 크게 감소시킨다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 CSI-free로 perfect CSI에 근접한 성능으로 낮은 피드백 오버헤드, 높은 연산 효율성을 달성함을 보인다.

I. 서론

지능반사표면 (intelligent reflecting surface, IRS)은 무선 환경을 능동적으로 제어하여 통신 성능을 향상시킬 수 있는 차세대 핵심 기술로 주목받고 있다 [1]. 특히, 비가시선 (non-line-of-sight, NLoS) 환경에서 IRS는 반사 경로를 통해 음영지역 문제를 해결할 수 있다. 그러나 최적 성능 IRS 범포밍을 위해서는 채널상태정보 (channel state information, CSI) 획득이 필수적이며, 이는 IRS 반사 요소 수의 증가에 따라 상당한 오버헤드를 발생시킨다. 이를 해결하기 위해 CSI 없이 수신 신호의 통계적 특성만을 이용하는 블라인드 범포밍 기법들이 제안되었다 [2]. 그러나 기존 연구는 단일 사용자에 국한되어 있으며, 다중 사용자 환경에서의 적용 연구는 부족한 실정이다. 본 논문에서는 IRS 도움 다중 사용자 시스템을 위한 CSI-free 블라인드 범포밍 및 사용자 스케줄링 기법을 제안한다. 제안 기법은 적응형 CSM (adaptive conditional sample mean) [2]을 다중 사용자 환경으로 확장하여 두 가지 기법 (Scheme 1: 전체 위상 최적화 후 사용자 선택, Scheme 2: 조기 사용자 선택 후 위상 최적화)을 제안하고, 전송률, 오버헤드 및 복잡도 성능을 비교 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템은 그림 1과 같이 기지국 (BS), N개의 반사소자를 가진 IRS, K명의 사용자 (UE)로 구성된다. 각 사용자는 비가시성 (NLoS) 채널을 겪는다고 가정하여 직접 경로는 차단되어 있으며, 모든 통신은 IRS를 통한 반사 경로로만 이루어진다. n번째 반사 소자를 통한 사용자 k의 cascaded 채널 $h_{n,k}$ 는 BS-IRS 채널 h 와 IRS-UE_k 채널 g_k 의 곱으로 표현된다.

$$h_{n,k} = hg_{n,k}, \quad (1)$$

여기서 h 는 모든 사용자에게 공통이며, $g_{n,k}$ 는 사용자별로 독립적이다. 각 채널은 Rayleigh 페이딩을 따른다. 사용자 k의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_k = \left(\sum_{n=1}^N h_{n,k} e^{j\theta_n} \right) x + n_k, \quad (2)$$

여기서 $\theta_n \in \{0, \omega, \dots, (D-1)\omega\}$ 는 n번째 반사 소자의 이산 위상값이며,

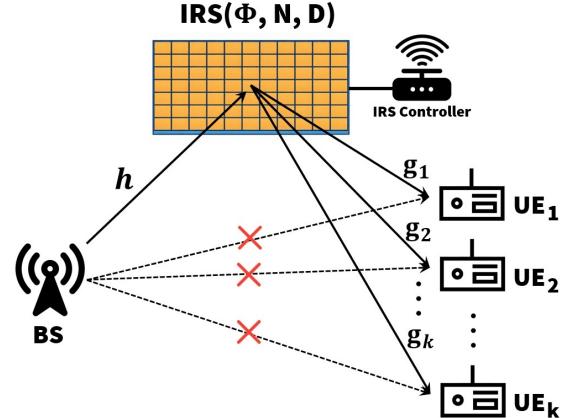


그림 1. IRS 도움 다중 사용자 시스템

$\omega = 2\pi/D$, D 은 이산 위상의 개수이다. x 는 송신 신호, $n_k \sim CN(0, \sigma_n^2)$ 는 복소 가우시안 잡음이다.

III. 제안 CSI 프리 블라인드 범포밍 및 사용자 스케줄링 기법

A. 적응형 CSM 기반의 CSI-free 블라인드 범포밍

적응형 CSM [2]은 IRS 반사 요소를 서로소인 두 그룹 S_I 와 S_I^C 로 분할하여 수신 샘플 기반으로 2단계로 위상 최적화를 수행한다. 1단계에서는 S_I 를 고정하고 S_I^C 에 대해 CSM을 수행하여 가상 직접 채널 h_I 를 형성한다. 이후 h_I 를 기준으로 S_I^C 에 포함된 반사 요소를 위상에 따라 다시 S_{II} 와 S_{III} 로 분류한다. 2단계에서는 S_{II} 를 레퍼런스로 고정하고 $S_I \cup S_{III}$ 에 대해 CSM을 재수행하여 각 반사 요소에 대한 최종 위상 값을 결정한다. 적응형 CSM은 NLoS 환경에서 채널 추정 없이 CSI-free로 랜덤 위상값 송수신 샘플 기반으로 IRS의 최적 위상값을 결정할 수 있다.

B. CSI-free 분산 다중 사용자 스케줄링

다중 사용자 환경에서는 모든 사용자가 1단계 CSM에서 동일한 랜덤 위상 패턴을 공유하며, 각 사용자 k는 개별적인 $S_{II,k}$ 와 $S_{III,k}$ 를 갖게 된다.

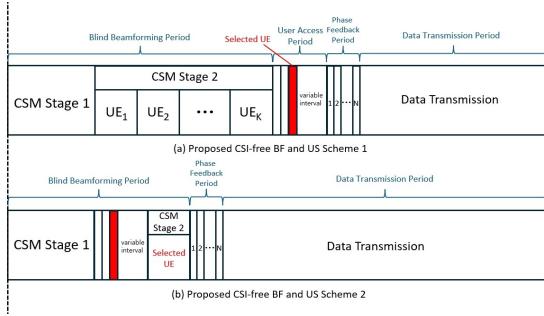


그림 2. 프레임 구조: (a) 제안 Scheme 1 - 전체 위상 최적화 후 사용자 선택, (b) 제안 Scheme 2 - 조기 사용자 선택 후 위상 최적화

그림 2는 제안하는 두 가지 CSI 프리 블라인드 베포밍 및 사용자 스케줄링 기법의 프레임 구조를 나타낸다. 프레임은 블라인드 베포밍 구간 (CSM Stage 1, 2), 사용자 접속 구간 (K개의 가변 미니슬롯), 위상 피드백 구간, 데이터 전송 구간으로 구성된다. 그림 2(a)은 제안 Scheme 1의 프레임 구조이다. 모든 사용자에 대해 2단계의 CSM 과정을 모두 완료한 후, 각 사용자는 사용자 접속 구간에서 분산적으로 채널 접속을 수행한다. 이 때, 각 사용자는 타이머 기반으로 접속 대기 시간 τ_k 를 수신 전력 $P_{R,k}$ 의 역수 ($\tau_k \propto 1/P_{R,k}$)로 설정하고 IRS 제어기에 무선 접속하도록 하여 최고 수신전력 사용자가 분산적으로 선택되도록 한다 [3]. 이어서 선택된 사용자가 자신의 최적 위상값을 피드백하여 IRS 위상을 설정하고, BS가 데이터 전송을 시작하도록 한다. 그림 2(b)는 제안 Scheme 2의 프레임 구조이다. 1단계 CSM 후, 사용자 접속 구간에서 최적 사용자가 먼저 선택되도록 하고, 선택된 사용자만 2단계 CSM 과정을 수행하여 제안 Scheme 1 대비 2단계 CSM 과정에서 샘플 전송 오버헤드를 $1/K$ 로 감소 시킬 수 있다.

IV. 성능 평가

본 장에서는 시뮬레이션을 통한 성능을 비교 분석한다. 시뮬레이션 파라미터는 반사 요소 수 $N \in \{16, 32, 64\}$, 이산 위상의 개수 $D = 4$, CSM 샘플 수 1,000개, 프레임 개수 10,000개로 설정하고, 모든 채널은 i.i.d. Rayleigh 페이딩, 즉, $CN(0,1)$ 을 따른다. 성능 비교 기법으로 Continuous Phase ($D = \infty$)와 Perfect CSI ($D = 4$)를 고려한다. 이 때, 사용자 스케줄링은 제안 기법과 동일하게 수행하였다.

그림 3은 사용자 수 $K = 10$ 일 때, SNR에 따른 전송률 결과를 보여준다. 기본적으로 SNR이 증가함에 따라 전송률은 선형적으로 증가한다. 반사 요소 수가 증가함에 따라 더 높은 전송률을 성취함으로써 IRS 위상이 잘 설정되었음을 확인할 수 있다. Continuous Phase 기법은 최적의 위상값을 설정하기에 가장 좋은 성능을 보이며, Perfect CSI ($D = 4$)는 모든 cascaded 채널 정보를 알고 위상값을 설정하기에 CSI-free 제안 기법들 보다 좋은 성능을 달성한다. 하지만 차이가 극소하여 제안 블라인드 베포밍 및 분산 사용자 스케줄링 기법들이 충분히 높은 전송률을 성취한다고 볼 수 있다. 제안 Scheme 1은 제안 Scheme 2 대비 모든 사용자에 맞춰 2단계 CSM 과정을 수행하기에 더 높은 전송률을 성취하는 반면, 해당 과정에서 K 배의 오버헤드를 갖는다.

그림 4는 SNR = 15 dB 일 때, 사용자 수 (K)에 따른 전송률을 나타낸다. 사용자 수가 증가함에 따라 다중사용자 이득에 따라 성취 전송률은 향상되고, $K \geq 20$ 에서 수렴하는 경향을 나타낸다. 반사 요소 수 (N)가 증가함에 따라 Perfect CSI와 제안 Scheme 1의 차이는 커지는 반면, 제안 Scheme 1과 제안 Scheme 2의 차이는 줄어든다. 제안 Scheme 1이 모든 사용자에 대해 2단계 CSM 과정을 수행 (필요 샘플 수: $T_{S1} = T_1 + KT_2$,

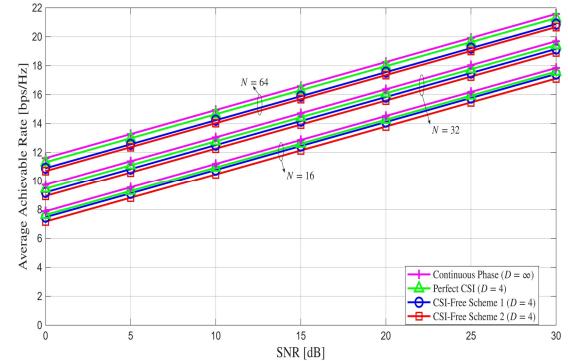


그림 3. SNR에 따른 평균 전송률 ($K = 10$)

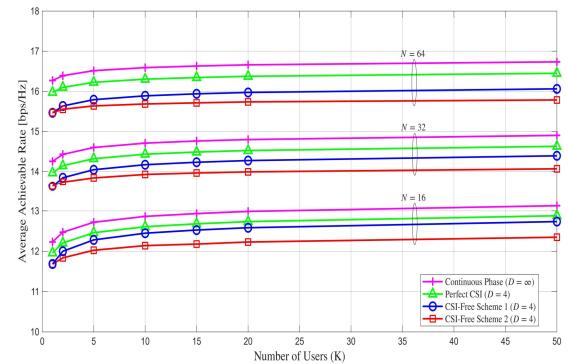


그림 4. 사용자 수에 따른 평균 전송률 (SNR = 15 dB)

= 5,500)하는 반면, 제안 Scheme 2는 1단계 CSM 결과로 사용자 스케줄링을 먼저 수행하고, 선택된 사용자만 2단계 CSM을 수행 (필요 샘플 수: $T_{S2} = T_1 + T_{acc} + T_2 \approx 1,100$)하므로 필요 샘플 수를 약 80% 감소시킨다. 따라서 반사 요소 수가 증가할수록 제안 Scheme 2이 오버헤드를 줄이면서 전송률 성능을 높이는 데 유리하다고 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 IRS 도움 다중사용자 환경에서 CSI 정보 없이 샘플 기반의 블라인드 위상 설정 및 타이머 기반 분산 사용자 스케줄링 기법을 제안하였다. 샘플 기반 위상 설정 2단계 과정의 오버헤드에 따라 두 가지 기법을 제안하였고, 시뮬레이션 결과, 제안 기법들이 연속 위상값, 완전 채널 정보 기법들과 비교하여 충분히 높은 전송률을 달성하였다. 또한, 반사 요소 수가 증가할 때, 저 오버헤드 제안 기법의 효용성을 확인하였다. 향후, 타이머 기반 분산 사용자 스케줄링에서 접속 충돌 효과, 최적 타이머 및 백 오프 값 연구를 추가로 수행하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부의 지원으로 정보통신기획평가원-학·석사 연계 ICT 핵심인재양성(IITP-2026-RS-2022-00156326, 100%)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 5394–5409, Nov. 2019.
- [2] W. Wang, W. Lai, S. Ren, L. Xiang, X. Li, S. Niu, and K. Shen, "Adaptive beamforming for non-line-of-sight IRS-assisted communications without CSI," in Proc. *IEEE PIMRC*, pp. 1–6, Sep. 2023.
- [3] V. Shah, B. B. Mehta, and R. Yim, "Optimal Timer Based Selection Schemes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 6, pp. 1814–1823, June 2010.