

다중 IRS 기반 통신 시스템에서의 빔포밍 설계 및 사용자 선택 기법 연구

윤석현, 임병주*, 고영채
고려대학교, *터프츠대학교

{daniel419, koyc}@korea.ac.kr, *Byungju.Lim@tufts.edu

User Selection and Beamforming Design for Multi-IRS aided Communication Systems

Seok-Hyun Yoon, Byungju Lim*, Young-Chai Ko
Korea Univ, *Tufts Univ.

요 약

지능형 반사 표면 (IRS)는 차세대 통신 시스템에서 넓은 커버리지와 향상된 다중 접속을 제공하는 유망한 기술로 떠오르고 있다. 본 논문에서는 다중 IRS 기반 통신 시스템에서 빔포밍 설계 및 사용자 선택 기법을 제안한다. 해당 기법은 weighted l_1 -norm approximation, Fractional Programming, Complex Circle Manifold (CCM) 방법을 통해 선택된 사용자의 sum rate 를 최대화하는 기지국의 빔포밍, IRS 의 위상 그리고 사용자 선택을 최적화한다. 시뮬레이션 결과 제안한 기법을 통해 기존 대비 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

I. 서 론

IRS 는 MEMS 와 메타물질의 지원을 받는 많은 수의 수동 요소로 구성된 2 차원의 평면 표면으로 각 요소의 위상과 세기를 조절하여 입사파의 위상과 세기를 조절하여 무선 채널 환경을 재구성할 수 있다. 이를 통해 사용자의 data rate 를 향상시키며 가상의 line-of-sight (LoS) 링크를 생성하여 장애물을 우회해 셀의 커버리지를 향상시킬 수 있다. 또한 IRS 는 건물의 천장 및 벽에 쉽게 설치할 수 있고 기존 통신 시스템에 쉽게 통합이 가능하다. 이러한 장점들 덕분에 IRS 는 6G 통신에서 낮은 비용과 에너지 소모로 높은 data rate 를 달성할 수 있는 유망한 기술로 떠올라 학계 및 산업체에서 많은 연구가 진행되고 있다 [1].

기존의 IRS 연구에서는 기지국이 셀에 위치한 모든 사용자들을 지원한다고 가정하였다. 하지만 많은 수의 사용자들이 있는 IoT networks 의 경우 기지국은 하나의 시간 및 주파수 자원 블록에서 기지국의 안테나 숫자보다 더 많은 숫자를 지원할 수 없다. IRS 가 없는 시스템에서 기지국의 빔포밍과 사용자 선택을 동시 설계하는 많은 연구들이 진행되어왔지만 채널을 재구성할 수 있는 IRS 기반 시스템에 이를 적용할 수 없다. 이를 위해 본 논문에서는 다중 IRS 기반 통신 시스템에서 기지국의 빔포밍, IRS 의 위상 설계 및 사용자 선택 기법을 제안한다.

II. 본론

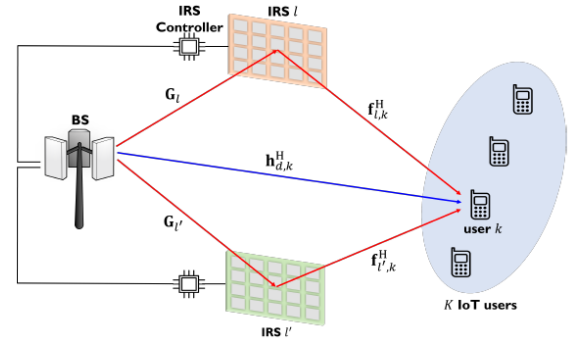


그림 1. 시스템 모델

그림 1 에서와 같이 N 개의 요소를 가지는 L 개의 IRS 가 셀에 분포되어 M 개의 안테나를 가지는 기지국으로부터 단일 안테나를 가지는 K 명의 사용자로의 하향링크 통신을 지원한다고 가정한다. 이때 사용자의 숫자가 기지국의 안테나 숫자보다 훨씬 많은 상황을 고려한다. 또한 IRS 는 기지국에 연결된 IRS 컨트롤러를 통해 수동 요소를 조절하며 수동 요소의 세기는 항상 1 이라고 가정한다. 이때 k 번째 사용자의 수신 SINR 과 data rate 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_k = \frac{a_k |(\mathbf{h}_{d,k}^H + \sum_{l=1}^L \mathbf{f}_{l,k}^H \boldsymbol{\theta}_l \mathbf{G}_l) \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K a_i |(\mathbf{h}_{d,k}^H + \sum_{l=1}^L \mathbf{f}_{l,k}^H \boldsymbol{\theta}_l \mathbf{G}_l) \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \quad (1)$$

$$R_k = \log_2(1 + \gamma_k) \quad (2)$$

식 (1), (2)를 바탕으로 사용자의 sum rate 를 최대화하는 기지국의 빔포밍, IRS 의 위상 그리고 사용자 선택 최적화 문제를 아래와 같이 구성한다.

$$\max_{\mathbf{w}_k, \boldsymbol{\theta}_l, a_k} \sum_{k=1}^K R_k \quad (3a)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 a_k \leq P, k \in \mathcal{K} \quad (3b)$$

$$\sum_{k=1}^K a_k \leq M, k \in \mathcal{K} \quad (3c)$$

$$a_k \in \{0,1\} \quad (3d)$$

$$|\theta_{l,n}| = 1, l \in \mathcal{L}, n \in \mathcal{N} \quad (3e)$$

문제 (3)은 non-convex mixed integer non-linear programming (MINLP)이며 일반적으로 NP-hard 이며 풀기 어렵다. 이를 해결하기 위해 빔포밍 벡터와 사용자 선택 변수 간의 성질을 이용하여 문제 (3)을 아래와 같이 재구성한다.

$$\max_{\mathbf{w}_k, \theta_{l,n}, a_k} \sum_{k=1}^K R_k \quad (4a)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 \leq P, k \in \mathcal{K} \quad (4b)$$

$$\sum_{k=1}^K \mathbb{I}_{\{\|\mathbf{w}_k\|^2\}} \leq M, k \in \mathcal{K} \quad (4c)$$

$$|\theta_{l,n}| = 1, l \in \mathcal{L}, n \in \mathcal{N} \quad (4d)$$

위 문제에서 indicator function $\mathbb{I}_{\{\|\mathbf{w}_k\|^2\}}$ 를 weighted l_1 -norm approximation 을 통해 다루기 쉬운 형태로 우선 바꾼다 [2]. 그 후 Fractional Programming [3]과 Complex Circle Manifold (CCM) [3] 방법을 통해 기지국 빔포밍과 IRS 의 위상을 목적 함수 (4a)가 수렴할 때까지 차례대로 업데이트한다.

III. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위해 반경이 200m 인 셀 내에 L 개의 IRS 를 기지국으로부터 150m 거리에 원형으로 배치하였다. 또한 K 명의 사용자는 기지국으로부터 130m~170m 거리의 링 형태에 임의로 배치하였다. 또한 IRS 을 통한 반사 채널은 Rician, 기지국과 사용자 간의 채널은 Rayleigh 로 가정하였다.

그림 2 는 제안한 기법의 수렴 성능을 보여준다. 그림에서 확인할 수 있듯이 선택되지 않은 사용자의 spectral efficiency 는 감소하다가 0 으로 수렴하는 반면 선택된 사용자의 spectral efficiency 는 특정한 값으로 수렴하게 된다. 즉, weighted l_1 -norm approximation 을 통한 사용자 선택 기법의 효과를 확인할 수 있다.

그림 2 는 IRS 수동 요소의 숫자에 따른 sum rate 의 그래프이다. 성능 평가 그래프에서 임의로 사용자를 선택하고 빔포밍은 제안한 기법을 사용한 경우를 “Random User Selection (RUS)”, IRS 가 없을 때 제안한 기법을 사용한 경우를 “w/o IRS”라고 명시한다. 그림 3 에서 제안한 기법은 IRS 수동 요소의 숫자가 증가할수록 sum rate 가 증가함을 확인할 수 있다. 이는 IRS 수동 요소의 숫자가 증가할수록 사용자들의 수신 신호를 증가하고 사용자간 간섭을 줄이는데 더욱 효과적이기 때문이다. 또한 제안한 기법을 통해 다른 기법 대비 성능 이득이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 다중 IRS 기반 통신 시스템에서 weighted l_1 -norm approximation, Fractional Programming, Complex Circle Manifold (CCM) 방법을 통한 기지국의 빔포밍, IRS 의 위상 그리고 사용자 선택을 최적화하였으며 기존 benchmark 기법 대비 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

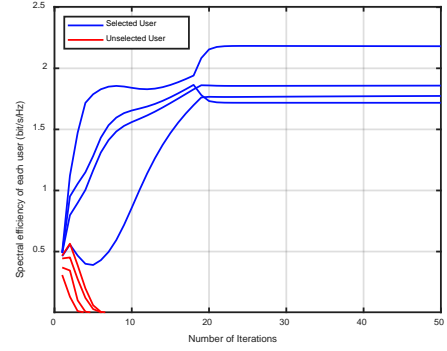


그림 2. 각 사용자의 spectral efficiency ($M = 4, L = 3, N = 40, K = 8, P = 30\text{dBm}$)

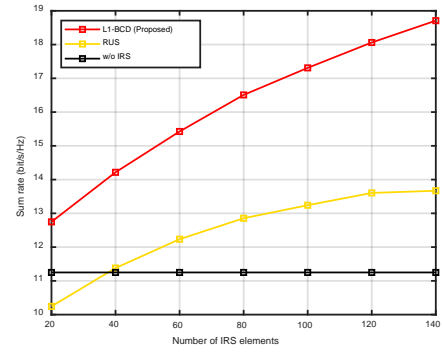


그림 3. Sum rate vs Number of IRS elements ($M = 8, L = 3, K = 40, P = 30\text{dBm}$)

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2023-2021-0-01810)

참 고 문 헌

- [1] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You, and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 5, pp. 3313-3361, May. 2021.
- [2] B. Dai, and W. Yu, "Sparse beamforming and user-centric clustering for downlink cloud radio access network," *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1326-1339, 2014.
- [3] K. Shen, and W. Yu, "Fractional programming for communication systems-Part 1: Power control and beamforming," *IEEE Trans. Signal. Process.*, vol. 66, no. 10, pp. 2616-2630, May. 2018.
- [4] K. Alhujaili, V. Monga, and M. Rangaswamy, "Transmit MIMO radar beampattern design via optimization on the complex circle manifold," *IEEE Trans. Signal. Process.*, vol. 67, no. 13, pp. 3561-3575, Jul. 2019.