

Intelligent Reflecting Surface 요소 할당을 통한 교번 빔포밍

조혜상, 최준일*

한국과학기술원, *한국과학기술원

nanjohn96@kaist.ac.kr, *junil@kaist.ac.kr

Alternating Beamforming with Intelligent Reflecting Surface Element Allocation

Cho Hye Sang, Choi Jun Il*

KAIST, *KAIST

요약

본 논문은 Intelligent Reflecting Surface (IRS) 요소 할당이라는 새로운 개념을 이용하여 IRS가 있는 다운링크 다중 송수신 안테나 환경에서, 단일 기지국이 다수의 단일 안테나 유저를 지원하는 교번 빔포밍 기술을 제안하였다. 제안하는 기술은 다중 유저의 최소 정보 전달율을 굉장히 낮은 복잡도로 최대화하며, 복잡도에 비해 상한선과 작은 편차를 보였다.

I. 서론

Intelligent Reflecting Surface (IRS)는 미래 무선 통신의 주요한 신기술 후보군 중 하나이다 [1]. IRS란 수동 소자 요소를 여러 개 갖춘 평면 표면이며, 각각의 요소는 충돌하는 전자기파의 위상을 독립적으로 변화시킬 수 있다 [2]. IRS의 핵심 장점 중 하나는 제어가 가능하여, 실시간으로 각각 요소의 위상 변화율을 조절할 수 있다는 점이다. 이를 이용하여 정보 전달율을 높이거나, 신호를 받지 못하는 유저를 돕는 등, 무선 통신 채널을 원하는 대로 실시간으로 바꿀 수 있다. 또한, 수동 소자들을 이용하는 만큼 낮은 가격과 소모 전력을 기대할 수 있다.

현재 IRS에 관하여 수많은 연구가 진행되고 있다. 대부분의 논문은 IRS의 위상변화율을 고정된 채로 기지국의 빔포밍을 설계하고, 빔포머를 고정된 채로 위상변화를 시키는 교번 최적화 기술을 사용하며, 이를 이용하여 목표 최소 정보 전달율이 있는 상황에서 소모 전력을 최소화하거나 최소 정보 전달율을 최대화하는 등의 목적을 달성하였다 [3], [4]. 하지만 성능이 뛰어난 것에 비해 교번 최적화 기술은 복잡도가 높은 최적화 기술을 사용하여 굉장히 높은 연산량을 필요로 한다. 낮은 가격과 소모 전력으로 인해 IRS는 많은 개수의 요소를 지닐 것으로 예상되며, 이로 인해 현실적인 빔포밍 기술은 더 낮은 복잡도를 필요로 한다.

본 논문에서는, IRS의 주요 목적 중 하나인 열악한 채널을 가진 유저를 돕는 것을 낮은 복잡도로 달성하는 빔포밍 기술을 제안하였다 [5]. 복잡도를 낮추기 위하여 IRS 요소 할당이라는 새로운 개념을 제안한다. IRS 요소 할당이란 각 IRS 요소를 한 명의 유저에게 할당하여 IRS 요소가 모든 유저를 동시에 고려할 필요성을 없애는 방식이다. 이를 이용하여 복잡도를 크게 낮출 수 있었으며, 높은 복잡도를 가진 비교군에 비하여 성능 열화는 적은 것을 확인할 수 있었다.

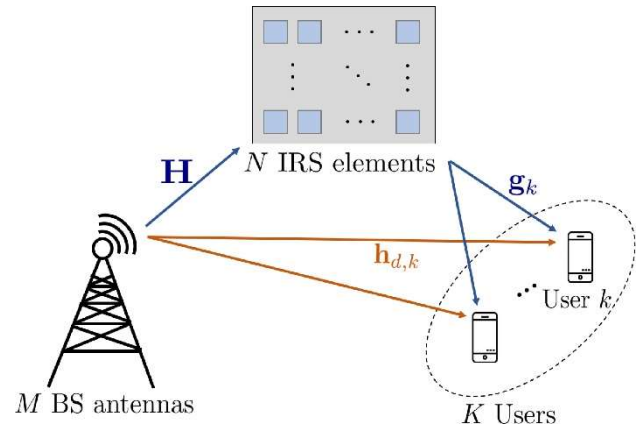


그림 1. M 개의 기지국 안테나, N 개의 IRS 요소, K 명의 유저를 가정한 다운링크 MU-MIMO 시스템이다.

II. 본론

본 논문에서는 그림. 1과 같이 하나의 IRS를 가진 다운링크 다중 유저 다중 송수신 안테나 (MU-MIMO) 환경을 가정한다. M 개의 안테나를 가진 단일 기지국과 K 명의 단일 안테나 유저, N 개의 IRS 요소를 가정하였을 때, 유저 k 에게 가는 무선 통신 채널은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_k = (H\Phi g_k + h_{d,k})^H \sum_{i=1}^K w_i s_i + z_k.$$

여기서 $h_{d,k}$ 는 기지국과 유저 k 사이의 채널, g_k 는 IRS와 유저 k 사이의 채널, H 는 기지국과 IRS 사이의 채널이다. 빔포머 w_i 는 수신 신호 s_i 를 위한 빔포머이며, z_k 는 백색 가우스 잡음이다. IRS 위상 변화율은

$$\Phi = \text{diag}(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N), \\ \phi_n = e^{j\theta_n}, \theta_n \in [0, 2\pi],$$

과 같이 나타낼 수 있으며, 이 때 ϕ_n 은 n 번째 IRS 요소의 위상 변화율이다. 또한 정보전달율과 신호-대비-간섭잡음비 (SINR)은

$$R_k = B \log(1 + \gamma_k)$$

$$\gamma_k = \frac{|(\mathbf{H}\Phi\mathbf{g}_k + \mathbf{h}_{d,k})^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \neq k} |(\mathbf{H}\Phi\mathbf{g}_i + \mathbf{h}_{d,k})^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma^2 B}$$

과 같이 나타낼 수 있으며, σ^2 과 B 는 각각 잡음의 전력밀도와 유저당 할당된 대역폭이다.

IRS 요소를 유저에게 할당하기 위해서는 두가지를 결정해야 한다. 첫 번째로는 한 유저에게 몇 개의 IRS 요소를 할당할지 정해야 하며, 두 번째로는 어느 특정 IRS 요소들을 할당할지 정해야 한다. 유저 별 IRS 요소 할당 개수는 최소 정보 전달율을 높이는 취지에 맞춰 열악한 채널을 가진 유저들에게 많은 개수를 할당한다.

$$\alpha_k = \frac{1}{|\mathbf{h}_{d,k}^H \mathbf{w}_k|}, \quad l_k = \left\lfloor N \frac{\alpha_k}{\sum_{i=1}^K \alpha_i} \right\rfloor.$$

여기서 l_k 는 k 번째 유저에게 할당하는 IRS 요소의 개수이다. 그 이후 IRS 요소 할당은 최소 정보 전달율을 높이기 위해 열악한 유저들에게 우선순위를 주어 열악한 유저들이 좋은 IRS 요소를 할당 받을 수 있도록 한다.

IRS 요소들을 할당한 이후에, 송신 빔포머와 IRS 요소들의 위상 변화율을 결정해야 한다. 첫 번째로 IRS 요소들의 위상 변화율이 고정된 상황에서, 유효 채널은 IRS 가 없는 기존의 다운링크 통신 채널과 동일하다. 따라서 기존의 zero forcing (ZF), maximal ratio transmitter (MRT), linear-minimum-mean-squared-error (LMMSE) 빔포머를 사용할 수 있다. 두 번째로 송신 빔포머가 고정된 상황에서는, IRS 의 위상 변화율은 다음과 같이 고정한다.

$$\angle \theta_n = -\angle(\mathbf{h}_{d,k}^H \mathbf{w}_k) - \angle g_{n,k} + \angle(\mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_k), \quad n \in \mathcal{N}_k.$$

여기서 $g_{n,k}$ 는 n 번째 IRS 요소와 k 번째 유저와의 채널, \mathbf{h}_n 은 기지국과 IRS 채널의 n 번째 열 벡터, \mathcal{N}_k 는 k 번째 유저에게 할당된 IRS 요소의 집합이다. 위와 같은 위상변화를 통해 기지국- n 번째 IRS 요소-유저 사이의 신호와 기지국-유저 사이의 신호가 보강간섭이 되며, 이를 통해 각 유저에게 강화된 신호를 보낼 수 있게 된다. 이 때 각각의 IRS 요소의 위상변화는 할당된 유저의 정보만을 필요로 하며, 이를 통해 연산 복잡도를 현저히 낮추는 방식을 만들 수 있게 된다.

따라서 위와 같은 송신 빔포밍 기법과 IRS 위상변화 기법을 사용하면 각각 정보 전달율의 상승 확률이 높으며, 이 과정을 반복하여 최소 정보 전달율을 상승시킬 수 있다. 그림. 2 를 보면 송신 전력을 증가시키기에 따라 어느 빔포머를 사용해도 최소 정보 전달율이 증가함을 보일 수 있다. 제안 기법은 복잡도가 굉장히 높은 상한선 [4]에 반해, 성능 열화는 굉장히 적은 것을 확인할 수 있다. 또한 IRS 를 사용하지 않은 것과 위상 변화율이 랜덤인 것에 비하여 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 IRS 를 사용하는 다운링크 MU-MIMO 상황에서 새로운 교번 빔포밍 기술을 제안하였다. IRS 요소 할당 기술이라는 새로운 개념을 통해 굉장히 낮은 복잡도를 가졌음에도 상한선과 비교하여 성능열화가 적은 것을 확인할 수 있었다.

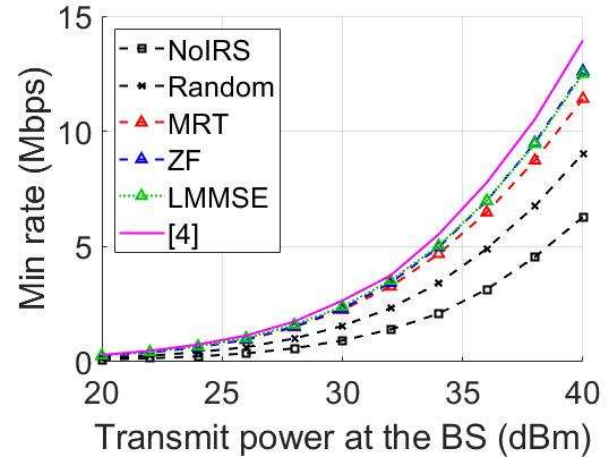


그림 2. 기지국에서의 송신 전력에 따른 최소 정보 전달율.

ACKNOWLEDGMENT

"본 연구는 과학기술정보통신부 및

정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의

연구결과로 수행되었음" (IITP-2020-0-01787)

참 고 문 헌

- [1] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems," *IEEE Network*, vol.34, no. 3, pp. 134-142, Oct 2020.
- [2] M. Renzo, M. Debbah, and D. Phan-Huy, "Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable AI Meta-Surfaces: An idea whose time has come," *EURASIP Journal on Wireless Com Network*, no. 129, May 2019.
- [3] Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 11, pp.5394-5409, Aug 2019.
- [4] Q. Nadeem, H. Alwazani, A. Kammoun, A. Chaaban, M. Debbah, and M. Alouini, "Intelligent Reflecting Surface-Assisted Multi-User MISO Communication: Channel Estimation and Beamforming Design," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 661-680, May 2020.
- [5] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You, and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Communications: A Tutorial," *arXiv:2007.02759*, Jul 2020.