

지능형 반사 표면의 소자 할당을 이용한 합산 정보 전달을 최대화

조혜상*, 최준일°

Sum Rate Maximization through Intelligent Reflecting Surface Element Allocation

Hyesang Cho*, Junil Choi°

요약

지능형 반사 표면 (Intelligent reflecting surface, IRS)은 차세대 무선통신을 이끌 신기술의 후보로 각광받고 있다. 본 논문에서는, IRS의 소자 할당이라는 신개념을 이용하여 다중 유저 다운 링크 상황에서 하나의 IRS를 사용한 교대 빔포밍 기법을 제안하였다. 더 구체적으로는, 각 IRS 소자를 한 명의 유저에게 할당하여, 빔포밍 시 각 소자가 하나의 유저만을 고려할 수 있도록 하였고, 이러한 형태로 빔포밍의 복잡도를 현저히 줄일 수 있었다. 본 논문에서는 제안한 기법으로 유저들의 합산 정보 전달을 최대화를 진행하였으며, 여러 비교군에 비하여 높은 성능을 가지는 것을 확인하였다.

Key Words : Alternating beamforming, IRS element allocation, sum rate maximization

ABSTRACT

The consistent need for green communication has led to the novel power- and cost-efficient technology called intelligent reflecting surface (IRS). Using the concept of IRS element allocation, we derived a beamforming technique for a multi-user multiple-input multiple-output scenario with a single IRS to perform sum rate maximization. In result to this concept, we successfully derived a low-complexity beamforming technique, which outstands the performance of several benchmark schemes.

1. 서론

현시대에는 막대한 양의 데이터가 발생하고 있으며, 이에 따라 무선통신 시스템의 정보 요구량 또한 증가하고 있다. 이러한 요구량을 만족하기 위해 거대배열 다중-안테나 (Massive multiple-input-multiple-output) 기술이나, 밀리

미터파 (Millimeter wave) 통신과 같은 새로운 방향성의 연구를 끊임없이 모색하고 있지만¹⁻³, 많은 노력에도 불구하고 높은 전력 소모량과 장비 가격은 여전히 큰 문제로 대두되고 있다⁴⁻⁶.

지능형 반사 표면 (Intelligent reflecting surface, IRS)은 미래 무선통신의 주요한 신기술 후보군 중 하나이다⁷. IRS란 수동 소자를 여러

* 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학CT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음. (IITP-2020-0-01787)

※ 이 논문은 2019년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2019R1C1C1003638).

• First Author : Korean Advanced Institute of Science and Technology, nanjohn96@kaist.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Korean Advanced Institute of Science and Technology, junil@kaist.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202012-312-A-RE, Received December 1, 2020; Revised January 12, 2021; Accepted January 14, 2021

개 갖춘 평면 표면이며, 각각의 소자는 충돌하는 전자기파의 위상을 독립적으로 변화시킬 수 있다⁸⁾. IRS의 핵심 장점 중 하나는 제어가 가능하며, 실시간으로 각각 소자의 위상변화율을 조절할 수 있다는 점이다. 이를 이용하여 정보 전달율을 높이거나, 신호를 받지 못하는 유저를 돕는 등, 무선통신 채널을 원하는 대로 실시간으로 바꿀 수 있다. 이는 기존의 무선통신 시스템에 무선 채널의 자유도가 생긴 것으로 해석할 수 있다. 또한, IRS는 수동 소자들을 이용하는 만큼 낮은 가격과 적은 소모 전력을 기대할 수 있다.

현재 IRS에 관하여 빔포밍과 채널 추정과 같이 여러 방향으로 초기 연구가 진행되고 있다⁹⁾. 대부분의 빔포밍 연구는 IRS의 위상변화율을 고정한 채로 기지국의 빔포밍을 설계하고, 빔포머를 고정한 채로 위상 변화를 시키는 교대 최적화 기술을 사용하며, 이를 이용하여 목표 최소 정보 전달율이 있는 상황에서 소모 전력을 최소화하거나 최소 정보 전달율을 최대화하는 등의 목적을 달성하였다¹⁰⁻¹¹⁾. 하지만 성능이 뛰어난 것에 비해 교대 최적화 기술은 복잡도가 높은 최적화 기술을 사용하여 굉장히 높은 연산량을 필요로 한다¹²⁾. 낮은 가격과 적은 소모 전력으로 인해 IRS는 많은 개수의 소자를 지닐 것으로 예상되며, 이로 인해 현실적인 빔포밍 기술 또한 매우 낮은 복잡도를 필요로 할 것이다.

본 논문에서는, IRS가 존재하는 상황에서 무선통신의 중요 요소 중 하나인 합산 정보 전달율을 낮은 복잡도로 최대화하는 빔포밍 기법을 제안하였다. 또한, 복잡도를 낮추기 위하여 IRS 소자 할당이라는 개념을 제안한다. IRS 소자 할당이란 각 IRS 소자를 한 명의 유저에게 할당하여 각 IRS 소자 운용 시 모든 유저를 동시에 고려할 필요성을 없애는 방식이다. 이 방식을 이용한 최소 정보 전달을 최대화 방식은 이미 제안되었지만¹³⁾, 본 논문에서는 합산 정보 전달을 최대화와 관해서는 최초로 빔포밍 기법을 제안하였다. 또한, 새로운 빔포밍 기법이 비교군들에 비하여 높은 성능을 내는 것을 확인하였다.

II. 본 론

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 그림. 1과 같이 하나의 IRS를 가진 다운 링크 다중 유저 다중 송수신 안테나 (Multi-user multiple-input multiple-output, MU-MIMO) 환경을 가정한다. M 개의 안테나를 가진 단일 기지국과 K 명의 단일 안테나 유저, N 개의 IRS 소자를 가정하며, 기지국에서는 모든 채널 정보를 알고 있다고 가정한다. 그리고 타 논문들과 같이¹⁰⁻¹¹⁾, 기지국과 IRS는 IRS 제어장치 (IRS controller)로 이어져 있어, 기지국이 IRS에게 정보를 여러 없이 전달할 수 있다고 가정한다. 이때, 유저 k 에게 가는 무선통신 채널은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_k = (\mathbf{H}\Phi\mathbf{g}_k + \mathbf{h}_{d,k})^H \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_i s_i + z_k. \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{h}_{d,k} \in C^{M \times 1}$ 는 기지국과 유저 k 사이의 채널, $\mathbf{g}_k = [g_{1,k}, g_{2,k}, \dots, g_{N,k}]^T \in C^{N \times 1}$ 는 IRS와 유저 k 사이의 채널이며, $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_N] \in C^{M \times N}$ 는 기지국과 IRS 사이의 채널이다.

빔포머 \mathbf{w}_i 는 수신 신호 s_i 를 위한 빔포머이며, z_k 는 백색 가우스 잡음이다. IRS 위상변화율은

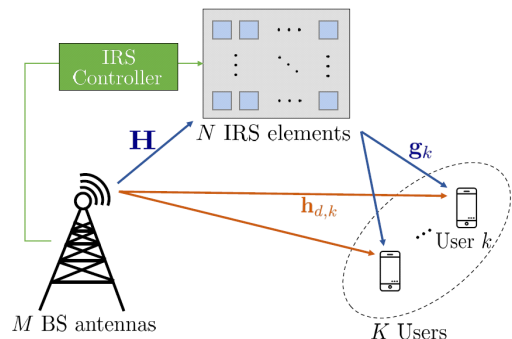


그림 1. M 개의 기지국 안테나, N 개의 IRS 소자, K 명의 유저를 가정한 다운 링크 MU-MIMO 시스템이다.
Fig. 1. MU-MIMO downlink system of BS with M antennas, K UEs, and IRS with N elements.

$$\Phi = \text{diag}(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N), \quad (2)$$

$$\phi_n = e^{j\theta_n}, \theta_n \in [0, 2\pi], \quad (3)$$

과 같이 나타낼 수 있으며, 이때 ϕ_n 은 n 번째 IRS 소자의 위상변화율이다. 또한, k 번째 유저의 정보전달율과 신호-대비-간섭잡음비 (Signal-to-interference and noise ratio, SINR)는

$$R_k = B \log(1 + \gamma_k), \quad (4)$$

$$\gamma_k = \frac{|(\mathbf{H}\Phi\mathbf{g}_k + \mathbf{h}_{d,k})^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \neq k} |(\mathbf{H}\Phi\mathbf{g}_k + \mathbf{h}_{d,k})^H \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2 B}, \quad (5)$$

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

2.2 제안하는 기법

2.2.1 제안 기법 설명

제안하는 IRS 소자 할당 기법은 각각의 IRS 소자를 한 명의 유저와 매칭하는 것을 기반으로 진행한다. 이때, 원하는 목표인 합산 정보 전달을 최대화를 위하여 각각의 IRS 소자에 대하여 기지국-IRS소자-유저의 채널 이득이 가장 큰 유저에게 소자를 할당한다. 즉, n 번째 IRS 소자에 대한 할당은

$$k_0 = \text{argmax}_k |g_{n,k}^* \mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_k|,$$

$$N_{k_0} = N_{k_0} + \{n\}, \quad N_0 = N_0 - \{n\}, \quad (6)$$

과 같이 나타낸다. 이때 N_k 은 k 번째 유저에게 할당된 IRS 소자의 집합이며, N_0 은 할당되지 않은 IRS 소자의 집합이다. 이를 모든 n 에 대하여 진행하면서 모든 IRS 소자는 유저들에게 할당하게 된다. 이때 (6)과 같은 판단 기준을 세운 이유는 제안하는 교대 빔포밍 기법과 연관되어있기

때문에 후술하도록 한다. 여기서 유의할 점으로 합산 정보 전달을 최대화를 진행할 시, 각 유저 개개인의 상태는 고려하지 않는다는 점이다. 즉, 유저 간의 공평함은 전혀 고려되지 않는다.

이후, 송신 빔포머와 IRS 소자들의 위상변화율 결정 방식을 서술하도록 한다. 첫 번째로 IRS 소자들의 위상변화율이 고정된 상황에서, 유효 채널은 IRS가 없는 기존의 다운 링크 통신 채널과 동일하다. 따라서 기존의 zero forcing (ZF), maximal ratio transmitter (MRT), regularized ZF (RZF) 빔포머를 사용할 수 있다.

두 번째로 송신 빔포머가 고정된 상황에서는, IRS 소자의 위상변화율을 결정해야 한다. k 번째 유저의 SINR 값을 확장하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma_k = \frac{|h_{d,k}^H \mathbf{w}_k + \sum_{n=1}^N g_{n,k} \phi_n^* \mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \neq k} |h_{d,k}^H \mathbf{w}_i + \sum_{n=1}^N g_{n,k} \phi_n^* \mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2 B}. \quad (7)$$

이때 신호 값인 SINR 값의 분자에 대하여 삼각 부등식을 이용하여 상한값을 구하면

$$\begin{aligned} & |h_{d,k}^H \mathbf{w}_k + \sum_{n=1}^N g_{n,k} \phi_n^* \mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_k| \\ & \leq |h_{d,k}^H \mathbf{w}_k| + \sum_{n=1}^N |g_{n,k} \mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_k|, \end{aligned} \quad (8)$$

과 같이 나타낼 수 있으며, 등식이 성립하기 위해서는 모든 IRS 소자가 k 번째 유저의 기지국-유저 채널과 보강간섭이 이루어지도록 설정해야 한다. 이때 한 가지 유의해야 할 점으로는, 각 IRS 소자의 위상변화율은 모든 유저에 대해 동시에 영향을 주기 때문에, 모든 유저에 대하여 위의 등식이 성립하는 것은 불가능 할 수 있다. 따라서 유저별로 할당한 IRS 소자에 한해서만 보강간섭을 일으켜, 모든 유저들이 일부 IRS 소자를 통해 신호 세기를 강화하는 형태로 기법을 진행한다.

IRS 소자 할당을 끝냈다고 가정하였을 때, k 번째 유저에게 할당된 IRS 소자의 위상변화율은 다음과 같이 설정한다.

$$\angle \theta_n = -\angle(\mathbf{h}_{d,k}^H \mathbf{w}_k) - \angle g_{n,k} + \angle(\mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_k), \quad n \in N_k. \quad (9)$$

위와 같은 위상변화를 통해 기지국-IRS 소자-유저 사이의 신호와 기지국-유저 사이의 신호가 보강간섭이 되며, 이를 통해 각 유저에게 강화된 신호를 보낼 수 있게 되며, 이때의 신호는

$$\left(|\mathbf{h}_{d,k}^H \mathbf{w}_k| + \sum_{n \in N_k} |g_{n,k} \mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_k| \right) e^{j\angle(\mathbf{h}_{d,k}^H \mathbf{w}_k)} + o_k, \quad (10)$$

과 같이 표현할 수 있다. 여기서 o_k 는 자신에게 할당되지 않은 IRS 소자들에게서 온 신호들이다. 이때 각각의 IRS 소자의 위상변화는 할당된 유저의 정보만을 필요로 하며, 이를 통해 연산 복잡도를 현저히 낮추는 방식을 만들 수 있게 된다. 이때, 수식 (10)에서 IRS 소자의 영향은 $|g_{n,k} \mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_k|$ 과 같은 형태로 나타나고, 이로 인해 수식 (6)의 기준을 세운 것을 알 수 있다.

IRS 소자의 위상변화율을 업데이트 할 때, 수신자의 신호에만 집중하고, 간섭에 대해서는 고려하지 않은 것을 알 수 있다. 그 이유는 수식 (7)을 통하여 확인할 수 있다. k 번째 유저에게 보강 간섭을 일으키기 위해 위상변화율을 결정할 때, 위상변화율은 빔포머 \mathbf{w}_k 에 따라 결정된다는 것을 알 수 있다. 이때, 같은 IRS 소자에 반사되는 간섭은 \mathbf{w}_i 와 같이 다른 빔포머를 사용하기 때문에, 보강이나 상쇄 간섭이 임의로 발생하여 전체 간섭은 증가할 가능성이 작고, 신호는 강화되면서 전체 SINR은 증가할 가능성이 높다. 간섭을 고려하지 않는 단순한 원리에도, 성능은 충분히 증가한다는 것을 III-장에서 확인할 수 있다.

2.2.2 제안 기법 작동 원리

앞서 말했듯 송신 빔포머를 업데이트 할 때, 유효 채널은 IRS가 보이지 않는 기존의 다운 링크 통신 채널과 동일하다. 이때 송신 빔포머와 IRS 위상변화율이 교대로 업데이트 되면서, IRS 위상변화율이 업데이트 될 때 유효 채널을 바꾸게 된다. 이로 인하여 이전의 송신 빔포머는 새

Algorithm 1 Pseudo-code for sum rate maximization using IRS element allocation through alternating beamforming

```

1: Initialization: Random  $\Phi, \mathbf{W}$ ,  $N_0 = \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $N_k = \emptyset$ ,  $1 \leq k \leq K$ 
2: repeat
3:   for  $n = 1$  to  $N$  do
4:      $k_0 = \operatorname{argmax}_k |g_{n,k}^* \mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_k|$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 
5:      $N_{k_0} = N_{k_0} + \{n\}$ ,  $N_0 = N_0 - \{n\}$ 
6:   for  $k = 1$  to  $K$  do
7:     repeat
8:        $\angle \theta_{n,k} = -\angle(\mathbf{h}_{d,k}^H \mathbf{w}_k) - \angle g_{n,k} + \angle(\mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_k)$ ,
9:        $N_k = N_k - \{n_k\}$ ,  $N_0 = N_0 + \{n_k\}$ 
10:      until  $N_k = \emptyset$ 
11:    Update transmit beamformer  $\mathbf{W}$  using effective channel formed by  $\Phi$ 
12: until Iteration is repeated  $V > 0$  number of times
    
```

로운 유효 채널에는 적합하지 않게 되며, 새로운 송신 빔포머를 설정함으로써 성능을 증가시킬 수 있다.

빔포머를 새로 설정한 이후에는 다시 IRS 소자 할당을 진행하도록 한다. IRS 소자를 다시 할당하면서, 빔포머가 바뀌면서 잘못된 유저에게 IRS 소자를 할당하는 상황을 방지할 수 있다.

마지막으로 IRS 소자 할당이 바뀐 이후에 다시 IRS 소자의 위상변화율을 업데이트하도록 한다. 이는 할당된 IRS 소자가 바뀌어 새로운 유저의 방향으로 위상을 조절해야 하며, 송신 빔포머가 변화하면서 같은 유저에게 할당된 IRS 소자 또한 위상변화율이 변화해야 하기 때문이다. 이로 인해 각 유저에게 알맞은 IRS 소자가 보강 간섭이 이루어지게 되면서 유저들의 성능이 증가하게 된다.

따라서 송신 빔포머 업데이트, IRS 소자 할당, IRS 위상변화율 업데이트를 반복적으로 하는 교대 빔포밍을 제안하였으며, 알고리즘의 복잡도는 반복마다 $O(N(N+1)(M+1))$ 의 값을 가졌다. 이는 블록 최적화 기법을 활용하는 기존의 기법들에 비하여 현저히 낮은 복잡도를 가지고 있다. 기법의 요약은 Algorithm 1에서 확인할 수 있다. 이때, 알고리즘의 반복 횟수는 기지국과 IRS의 정보 교환 횟수와는 별개의 개념이다. 기지국이 모든 채널 정보를 가지고 있을 때, 알고리즘의 반복 횟수는 기지국에서의 이론적 시뮬레이션 반복 횟수이며, IRS에는 최종적인 위상변화율 값만 전달하면 되는 것을 알 수 있다.

즉, 알고리즘의 반복 횟수에 상관없이, 기지국과 IRS의 정보 교환은 한 번만 이루어지면 된다.

참고사항으로, 제안하는 기법은 기존의 MU-MIMO 시스템에 비하여 높은 복잡도를 가질 수 있다. 다만, 기존의 MU-MIMO 시스템은 높은 가격과 전력 소모량의 병목들을 만나 확장이 어려운 것으로 예상하는 반면에, IRS는 위 병목들을 완화할 수 있다는 점에서 장점들이 있어, 둘의 복잡도를 비교하는 것은 동등한 비교가 아닌 것을 알 수 있다.

III. 실험

따로 안내가 없을 시 기지국 안테나의 개수, IRS 소자 개수, 유저의 수는 각각 $M=8, N=100, K=4$ 이며, 기지국-IRS, 기지국-유저, IRS-유저의 거리는 각각 100 m, 105 m, 10m, 이다. 채널 모델은

$$h = \sqrt{d^{-\beta}} \eta, \quad (11)$$

의 형태를 가진다. 여기서 d 는 거리, η 는 Rayleigh fading 모델을 따르며, β 는 경로 손실 지수이다. 경로 손실 지수는 기지국-IRS, 기지국-유저, IRS-유저에 따라 각각 3.6, 4, 4의 값을 가진다. 잡음의 전력 밀도와 할당된 대역폭은 각각 -174 dBm과 10 MHz이다.

성능 분석의 비교군으로는 IRS를 사용하지 않은 경우와 IRS의 위상변화율 값을 임의로 둔 경우로 두며, 각각 No-IRS와 Random으로 표기하였다. 제안한 기법에 각각 RZF, ZF, MRT 송신 빔포머를 사용한 경우를 각각 RZF, ZF, MRT라고 표기하였다.

그림 2는 알고리즘의 반복 횟수에 따른 합산 정보 전달율을 나타낸다. 제안한 기법의 성능은 알고리즘의 반복을 1회만 하여도 크게 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 반복 회수가 4회 이상일 때에는 성능이 수렴하여 더 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이에 모든 경우에 대해 알고리즘의 반복 횟수 $V=5$ 로 설정하였다.

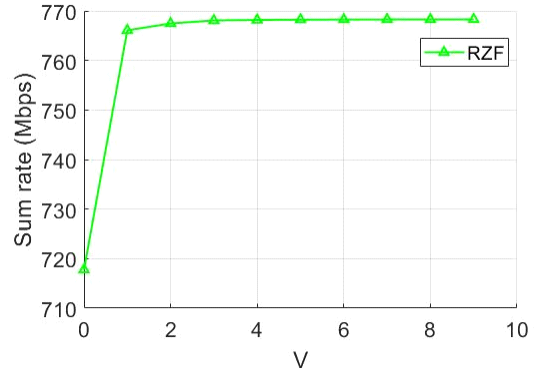


그림 2. 알고리즘의 반복 회수에 따른 합산 정보 전달율
Fig. 2. Sum rate with respect the number of algorithm iterations

그림 3은 기지국에서의 송신 전력에 따른 합산 정보 전달율을 나타낸다. 제안한 기법인 RZF, ZF, MRT 모두 No-IRS와 Random에 비해 월등한 성능을 지닌 것을 확인하였으며, RZF와 ZF은 송신 빔포밍 시 간섭 신호를 고려하였기 때문에 성능이 MRT보다 더 좋은 것을 확인하였다.

그림 4는 IRS 소자의 개수에 따른 합산 정보 전달율을 나타낸다. 이때, 기지국에서의 송신 전력은 30 dBm으로 고정하였다. 이전과 마찬가지로 No-IRS와 Random에 비하여 제안한 기법이 성능이 월등한 것을 확인할 수 있었다. 또한, IRS 소자의 개수가 증가함에 따라 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있어 제안 기법이 IRS 소

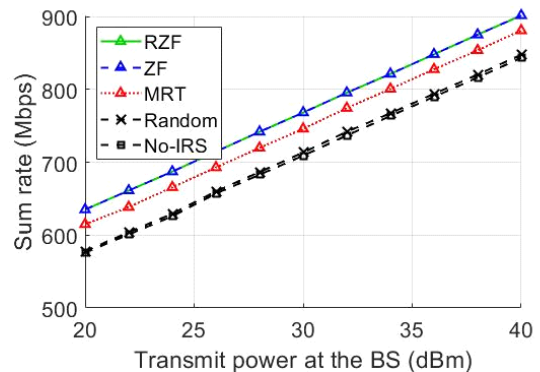


그림 3. 기지국에서의 송신 전력에 따른 합산 정보 전달율
Fig. 3. Sum rate with respect to the transmit power at the BS

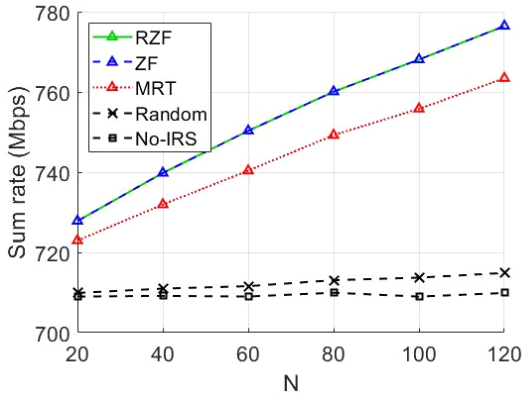


그림 4. IRS 소자 개수에 따른 합산 정보 전달율, 기지국에서의 송신 전력은 30 dBm 이다
 Fig. 4. Sum rate with respect to the number of IRS elements, where the transmit power from the BS is 30 dBm

자들을 올바르게 활용하고 있는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 IRS를 사용하는 다운 링크 MU-MIMO 상황에서 새로운 교대 빔포밍 기술을 제안하였다. IRS 소자 할당 기술이라는 개념을 통해 굉장히 낮은 복잡도를 가졌음에도 비교군들에 비하여 높은 성능을 지니는 것을 확인하였다.

References

[1] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, Feb. 2014.

[2] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, Dec. 2013.

[3] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H.

Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!" *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, May 2013.

[4] Q. Wu, G. Y. Li, W. Chen, D. W. K. Ng, and R. Schober, "An overview of sustainable green 5G networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 4, pp. 72-80, Aug. 2017.

[5] S. Zhang, Q. Wu, S. Xu, and G. Y. Li, "Fundamental green tradeoffs: Progresses, challenges, and impacts on 5G networks," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 19, no. 1, pp. 33-56, Jul. 2017.

[6] T. Kim, "Variance estimation of likelihood probability for MIMO systems using one-bit ADCs," *J. KICS*, vol. 45, no. 7, pp. 1190-1193, Jul. 2020.

[7] 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.

[8] M. Renzo, M. Debbah, and D. Phan-Huy, "Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: An idea whose time has come," *EURASIP J. Wireless Com. Netw.*, no. 129, May 2019.

[9] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You, and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface aided wireless communications: A tutorial," *arXiv:2007.02759*, Jul. 2020.

[10] 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, Aug. 2019.

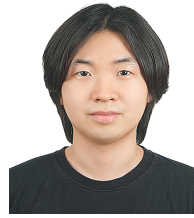
[11] Q. Nadeem, H. Alwazani, A. Kammoun,

A. Chaaban, M. Debbah, and M. Alouini, "Intelligent reflecting surface-assisted multi-user mimo communication: Channel estimation and beamforming design," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 661-680, May 2020.

- [12] Z. Luo, W. Ma, A. M. So, Y. Ye, and S. Zhang, "Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems," *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 27, no. 3, pp. 20-34, Apr. 2010.

- [13] H. Cho and J. Choi, "Alternating beamforming with intelligent reflecting surface element allocation," *arXiv:2009.02875*, Sep. 2020.

조혜상 (Hyesang Cho)



2019년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 학사 졸업
2021년 2월~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사 과정
<관심분야> 통신공학, 무선통신, 신호처리
[ORCID:0000-0003-1470-9611]

최준일 (Junil Choi)



2005년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사 졸업
2007년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사 졸업
2015년 5월 : Purdue University 전기컴퓨터공학부 박사 졸업

2007년~2011년 : 삼성종합기술원 연구원

2011년~2011년 : 삼성전자 연구원

2015년~2016년 : The University of Texas at Austin
Postdoctoral researcher

2016년~2019년 : 포항공과대학교 조교수

2019년~현재 : 한국과학기술원 조교수

<관심분야> 통신공학, 무선통신, 신호처리

[ORCID:0000-0002-9862-9020]