

# 다중 사용자 다중 안테나 시스템을 위한 유사 최적 무선 충전 정보 전송 기법

김선영\*, 김훈창\*, 최지훈<sup>o</sup>

## Near-Optimal Wireless Powered Information Transfer Strategy for Multiuser MIMO Systems

Seonyeong Kim\*, Hoonchang Kim\*, Jihoon Choi<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문에서는 다중사용자 다중안테나 (MU-MIMO; Multiuser Multi-Input Multi-Output) 채널에서 유사 최적 무선 충전 정보 전송 기법을 제안한다. 공유기는 하향링크 빔포밍을 통해 다수의 단말에 전력을 전송하고, 단말은 충전된 전력을 이용하여 ZF (Zero-forcing) 기반의 공간 다중화 기법을 이용하여 상향링크로 정보를 전송한다. 이때 최대-최소 전송률을 최적화하기 위해 Gradient 알고리즘 기반 하향링크 에너지 빔포밍 기법을 유도하고, 단말별 데이터 스트림 수 선정 기법을 적용한 상향링크 정보 전송 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안된 기법이 기존 부최적 기법에 비해 성능이 우수하고, 최적 전송 기법과 유사한 성능을 보이면서 복잡도가 현저히 낮음을 보인다.

**Key Words** : Wireless powered communication network, Zero-forcing, Max-min throughput, MIMO (Multi-Input Multi-Output), Gradient method

### ABSTRACT

This paper proposes a near-optimal method for wireless powered information transmission in multiuser multi-input multi-output channels. An access point transfers power to multiple users through downlink beamforming, and using the charged power, users transmit information to the access point in the uplink through zero-forcing-based spatial multiplexing. In order to optimize the max-min throughput, we derive a downlink energy beamforming method using the Gradient algorithm, and propose an uplink information transmission scheme using user-specific number of data streams. Through numerical simulations, it is shown that the proposed method performs better than conventional suboptimal methods and that the proposed scheme performs close to the optimal method while significantly reducing computational complexity.

\* 이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2019R1A2C1 006418).

<sup>•</sup> First Author : Korea Aerospace University, School of Electronics and Information Engineering, kimsy6311@kau.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Korea Aerospace University, School of Electronics and Information Engineering, jihoon@kau.ac.kr, 종신회원

\* Korea Aerospace University, School of Electronics and Information Engineering, rlagnsckd@kau.kr, 학생회원

논문번호 : 201901-410-A-RN, Received January 7, 2019; Revised February 21, 2019; Accepted March 8, 2019

## I. 서 론

최근 센서나 IoT (Internet of Things) 기기의 이동성을 보장하고 배터리 소모를 줄여서 무선 기기의 수명을 연장하기 위한 방법으로 무선 충전 기법이 활발히 연구되고 있다. 특히 전자기파를 이용하여 무선 충전과 무선 정보 전송을 동시에 수행하는 기법이 주목받고 있고, 공유기에서 단말로 전력과 정보를 같이 전송하는 SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) 방식<sup>[1-7]</sup>, 공유기에서 단말로 전력을 전송하여 단말을 충전한 후 이를 이용하여 단말에서 공유기로 정보를 전송하는 WPCN (Wireless Powered Communication Networks) 방식으로 구분된다<sup>[8-12]</sup>. 전력 전송 효율을 높이기 위해서는 전송 대역폭을 최소화해야 하고 정보 전송률을 증가시키기 위해서는 전송 대역폭을 최대화해야 하므로 SWIPT 방식에서는 전송 전력 효율과 정보 전송률을 동시에 높일 수 없는 문제가 있다<sup>[1]</sup>.

WPCN 방식에서는 하향링크에서 RF 신호를 이용하여 다수의 단말을 동시에 충전하고, 상향링크에서 각 단말의 충전 전력을 이용하여 다중 접속을 통해 정보를 전송한다. [8]에서는 다중 사용자 단일 안테나 환경에서 시분할 다중 접속 프로토콜에 기반하여 합산 전송률 (Sum Throughput) 최적화와 공통 전송률 (Common Throughput) 최적화에 대해 연구했고, [9]에서는 다중 사용자 MISO (Multi- Input Single-Output) 채널 환경에서 최대-최소 (Max-Min) 전송률 측면에서 하향링크 에너지 빔포밍 벡터와 상향링크 다중 접속 수신기의 최적화 방안을 연구하였다. [9]의 연구 결과를 다중 사용자 다중 송수신 안테나 (MU-MIMO; Multiuser Multi- Input Multi-Output) 환경으로 확장하여 하향링크에서 다중 안테나 기반 빔포밍을 수행하고, 상향링크에서 공간분할 다중 접속 기법에 기반하여 정보를 전송하는 WPCN 시스템이 제안되었다<sup>[10-12]</sup>. [10]에서는 MU-MIMO WPCN 시스템의 합산 전송률을 최대화하는 전송 기법을 유도했고, [11]에서는 MU-MIMO WPCN 시스템의 상향링크에서 ZF(Zero-forcing) 수신기를 사용하는 경우 최대-최소 전송률 측면에서 하향링크 및 상향링크 최적 전송 기법을 제안하였다. 또한, [12]에서는 [11]에서 제안된 기법의 구현 복잡도를 줄이기 위해 준 최적 (Suboptimal) 에너지 빔포밍 방안 및 상향링크 전력 할당 방안을 제안하였다. [12]에서 제안된 기법의 경우 구현은 간단하지만 [11]에서 제안된 최적 전송 기법 대비 상향링크 데이터 전송률

손실이 큰 단점이 있다.

본 논문에서는 MU-MIMO 채널 환경에서 하향링크 빔포밍을 통해 단말을 충전하고, 이를 이용하여 상향링크에서 ZF에 기반한 공간 다중화 방식으로 데이터를 전송하는 WPCN 시스템을 고려했다. 하향링크 에너지 빔포밍 벡터 (Beamforming Vector), 상향링크 데이터 스트림 수와 데이터 스트림별 전력 할당을 결정하기 위해 유사 최적 (Near-Optimal) 전송 기법을 제안한다. 이를 위해 MIMO 다중 스트림 채널의 기하평균을 이용하여 상향링크 채널을 단일 스트림으로 근사화하고, 상향링크 최대-최소 사용자 전송률이 증가하도록 하향링크 에너지 빔포밍 벡터를 반복적으로 갱신한다. 또한, 상향링크에서 사용자별 데이터 스트림 수를 정하기 위한 방안을 제안하고, 다수의 데이터 스트림에 가용 전력을 할당하는 방식을 제시한다. 복잡도 분석을 통해 기존 MU-MIMO WPCN 방식과 제안된 방식의 복잡도를 비교하고, 모의실험을 통해 제안된 방식이 [11]에서 제안된 최적 전송 기법에 비해 복잡도는 낮으면서 유사한 성능을 나타냄을 보인다.

## II. MU-MIMO WPCN 시스템

그림 1은 WPCN 기반 MU-MIMO 시스템을 나타낸다. 공유기 안테나 수를  $M$ ,  $k$ 번째 단말 안테나 수를  $N_k$ , 단말 수를  $K$ 로 나타낸다. 공유기는 하향링크 구간 동안  $K$ 개의 단말로 전력을 전송하고, 단말은 충전된 전력을 사용하여 상향링크 구간에서 공간다중화를 통해 공유기로 동시에 정보를 전송한다. 하향링크 및 상향링크 시간 할당 비율은 각각  $\tau$ 와  $(1-\tau)$ 로 정의한다 ( $0 \leq \tau \leq 1$ ). 공유기와 단말  $k$ 사이의 하향링크 채널은  $N_k \times M$  행렬  $G_k$ , 상향링크 채널은  $M \times N_k$  행렬  $H_k$

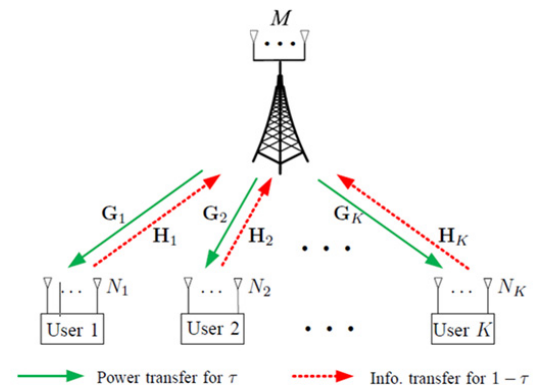


그림 1. WPCN 기반 MU-MIMO 시스템  
Fig. 1. WPCN-based MU-MIMO system

로 표현한다. 공유기가 상방향링크 채널 정보를 안다고 가정하고, 하향링크로 에너지 빔포밍 벡터를 전송한다. 단말은 하향링크에서 충전된 전력을 사용하여 공유기로 정보를 전송할 때 ZF 기반 사전부호화 및 결합을 통해 다중 사용자 간섭을 제거한다. ZF 전송을 위해 공유기 안테나 수가  $M \geq N_t = \sum_{k=1}^{k=K} N_k$ 를 만족한다고 가정한다.

공유기 최대 송신 전력은  $P_t$ 이며, 하향링크 전송 신호는  $\mathbf{x}_d = \mathbf{v}s_d$ 로 표현된다. 이때 심볼  $s_d$ 는 평균 전력 1인 임의의 심볼,  $\mathbf{v}$ 는  $\|\mathbf{v}\|^2 \leq P_t$ 를 만족하는  $M \times 1$  벡터이다. 하향링크 구간에서 각 단말은 공유기로부터 전송된 신호를 사용해서 전력을 충전한다.  $k$ 번째 단말은 충전된 전력을 사용하여 상방향링크 구간에서 정보를 전송하며, 이때 가용한 최대 송신 전력은 다음과 같다.

$$P_{max,k} = \frac{\epsilon T}{1 - T} \mathbf{v}^H \mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_k \mathbf{v} \quad (1)$$

이때  $0 < \epsilon \leq 1$ 은 에너지 충전 효율을 나타낸다.  $k$ 번째 단말에서 전송하는 데이터 스트림 수를  $L_k$ 로 정의하면  $L_k \leq N_k$ 를 만족한다. 상방향링크 정보 전송 구간에서 수신 신호는 다음과 같이 쓰인다.

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^{k=K} \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{n} \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$ 은  $M \times 1$  복소 잡음 벡터를 나타내고,  $\mathbf{x}_k$ 는  $k$ 번째 단말의 송신 신호 벡터를 의미하며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{U}_k \sqrt{\mathbf{P}_k} \mathbf{s}_k \quad (3)$$

이때  $\mathbf{U}_k$ 는  $N_k \times L_k$  사전부호화 행렬(Precoding Matrix)을 나타내고,  $\mathbf{P}_k = \text{diag}(p_{k,1}, \dots, p_{k,L_k})$ 는 각 데이터 스트림에 전력을 할당하는 대각 행렬을 의미하며,  $\mathbf{s}_k$ 는  $L_k \times 1$  송신 정보 벡터이다.

상방향링크에서 정보 전송시 사용자간의 간섭을 제거하기 위해 ZF 기반 블록 대각화를 수행한다. 편의상  $M_k = M - N_t + N_k$ 로 정의한다.  $k$ 번째 단말에서  $M \times L_k$  결합 행렬  $\mathbf{W}_k$ 를 사용하는 경우 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_k^H \mathbf{y} &= \mathbf{W}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{W}_k^H \sum_{m=1, m \neq k}^{m=K} \mathbf{H}_m \mathbf{x}_m + \mathbf{W}_k^H \mathbf{n} \\ &= \mathbf{R}_k^H \mathbf{H}_{e,k} \mathbf{U}_k \sqrt{\mathbf{P}_k} \mathbf{s}_k + \mathbf{W}_k^H \mathbf{n} \end{aligned} \quad (4)$$

$\mathbf{H}_{e,k}$ 는  $k$ 번째 단말의 유효 채널 행렬을 나타내는  $M_k \times N_k$  행렬이고,  $\mathbf{W}_k$ 와  $\mathbf{H}_{e,k}$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_k &\square \tilde{\mathbf{X}}_k^{(0)} \mathbf{R}_k, \\ \mathbf{H}_{e,k} &\square (\tilde{\mathbf{X}}_k^{(0)})^H \mathbf{H}_k \end{aligned} \quad (5)$$

이때  $\mathbf{R}_k$ 는  $M_k \times L_k$  행렬이고,  $\tilde{\mathbf{X}}_k^{(0)}$ 는  $M \times M_k$  행렬로  $\tilde{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{H}_k \dots \mathbf{H}_{k-1} \mathbf{H}_{k+1} \dots \mathbf{H}_K]$ 로 정의된 간접 채널에 다음과 같이 특이값 분해(SVD; Singular Value Decomposition)를 적용하여 구한다.

$$\tilde{\mathbf{H}}_k = [\tilde{\mathbf{X}}_k^{(1)} \tilde{\mathbf{X}}_k^{(0)}] \tilde{\Sigma}_k \tilde{\mathbf{Y}}_k^H \quad (6)$$

여기서 위첨자 (0), (1)은 각각 특이값 0에 대응되는 부행렬(Submatrix), 0이 아닌 특이값에 대응되는 부행렬을 각각 의미한다.

식 (5)에서 행렬  $\mathbf{R}_k$ 는  $\mathbf{H}_{e,k}$ 에 대한 수신 결합 행렬을 나타내며 다음과 같이  $\mathbf{H}_{e,k}$ 에 특이값 분해를 적용하여 구할 수 있다.

$$\mathbf{H}_{e,k} = [\mathbf{X}_k^{(1)} \mathbf{X}_k^{(0)}] \Sigma_k [\mathbf{Y}_k^{(1)} \mathbf{Y}_k^{(0)}]^H \quad (7)$$

식 (4)에 식 (7)을 대입하면 ZF 전송을 위해 필요한 사전부호화 행렬  $\mathbf{U}_k$ 와 결합 행렬  $\mathbf{R}_k$ 는 각각  $\mathbf{R}_k = \mathbf{X}_k^{(1)}$ ,  $\mathbf{U}_k = \mathbf{Y}_k^{(1)}$ 로 표현할 수 있고, 식 (4)는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_k^H \mathbf{y} &= (\mathbf{X}_k^{(1)})^H \mathbf{H}_{e,k} \mathbf{U}_k \sqrt{\mathbf{P}_k} \mathbf{s}_k + \mathbf{W}_k^H \mathbf{n} \\ &= \Lambda_k \sqrt{\mathbf{P}_k} \mathbf{s}_k + \mathbf{W}_k^H \mathbf{n} \end{aligned} \quad (8)$$

이때  $\Lambda_k$ 는 식 (7)에서  $\mathbf{H}_{e,k}$ 의 특이값 분해를 통해 구한  $\Sigma_k$ 의 원소 중에서 가장 큰  $L_k$ 개의 원소로 이루어진  $L_k \times L_k$  대각 행렬을 의미한다.

### III. 제안된 MU-MIMO WPCN 전송 기법

식 (8)로 주어지는 수신 신호 모델을 기준으로 MU-MIMO WPCN 시스템의 상향링크 최대-최소 전송률 최적화 관점에서  $\tau, \mathbf{v}, \{\mathbf{P}_k; k \in \{1, \dots, K\}\}$  를 설계한다. 상향링크에서 ZF 전송 방식을 사용할 때  $k$  번째 단말의 전송률은 다음과 같이 표현된다.

$$R_k = (1 - \tau) \log_2 \left| \mathbf{I}_{L_k} + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{\Lambda}_k^2 \mathbf{P}_k \right| \quad (9)$$

그리고 최대-최소 전송률 최적화 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\max_{\tau, \mathbf{v}, \{\mathbf{P}_k\}} R \quad (10a)$$

$$s.t. R \leq R_k, \forall k \quad (10b)$$

$$\mathbf{P}_k \geq 0, \text{tr}(\mathbf{P}_k) \leq \frac{\varepsilon\tau}{1-\tau} \mathbf{v}^H \mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_k \mathbf{v}, \forall k. \quad (10c)$$

$$\mathbf{v}^H \mathbf{v} \leq P_t \quad (10d)$$

식 (10a)와 (10b)는  $R_k$ 의 최소값을 최대화하기 위한 식이고, 식 (10c)와 (10d)는 각각 단말과 공유기의 송신 전력 제약을 의미한다. 식(10)의 목적식과 제약 식은  $\tau, \mathbf{v}, \mathbf{P}_k$ 에 대한 1차 함수 혹은 2차 함수로 표현되므로 식 (10)은 Convex 최적화 문제로 정의된다. 하지만 식 (10)의 폐쇄형 해 (Closed-form Solution)가 존재하지 않으므로 최적해를 구하기 위해서는 [13]의 Interior-Point 알고리즘 혹은 [11]에서 제안된 유사 뉴턴 (Newton-like) 알고리즘과 같은 반복적 갱신 방법을 사용해야 한다. 따라서 최적해를 구하기 위한 연산 복잡도가 매우 높은 문제가 있다.

본 논문에서는 식 (10)에서 정의된 최적화 문제를 변형하여 기존 최적해에 비해 낮은 복잡도를 요구하면서 최적해와 유사한 성능을 갖는 유사 최적해를 유도한다. 우선 WPCN 시스템의 상향 링크에서 신호대 잡음비가 높은 경우 식 (9)의 행렬식 부분은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left| \mathbf{I} + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{\Lambda}_k^2 \mathbf{P}_k \right| &= \prod_{i=1}^{L_k} (1 + \rho_{k,i} p_{k,i}) \\ &\approx \prod_{i=1}^{L_k} \rho_{k,i} p_{k,i} = \prod_{i=1}^{L_k} \rho_{k,i} \prod_{i=1}^{L_k} p_{k,i} \\ &\approx \prod_{i=1}^{L_k} \rho_{k,i} \left( \frac{p_k}{L_k} \right)^{L_k} = \left( \frac{p_k}{L_k} \rho_k \right)^{L_k} \end{aligned} \quad (11)$$

이때  $\rho_{k,\ell}$ 과  $p_{k,\ell}$ 은 각각  $\frac{\mathbf{\Lambda}_k^2}{\sigma^2}$ 와  $\mathbf{P}_k$ 의  $\ell$ 번째 대각

원소를 나타내고,  $\rho_k = \left( \prod_{\ell=1}^{L_k} \rho_{k,\ell} \right)^{1/L_k}$ 와  $p_k = \sum_{\ell=1}^{L_k} p_{k,\ell}$

는 각각  $\{\rho_{k,\ell}\}$ 의 기하 평균과  $\{p_{k,\ell}\}$ 의 합을 의미한다. 또한, 신호대 잡음비가 높은 경우 데이터 스트림 별 할당되는 전력은 동일하다고 가정하였다 ( $p_{k,1} = p_{k,2} = \dots = p_k/L_k$ ). 식 (11)을 이용하여 최대-최소 전송률 최적화 문제를 변형하면 다음과 같이 써진다.

$$\max_{\tau, \mathbf{v}, \{p_k\}} R$$

$$s.t. R \leq R_k = (1-\tau)L_k \log_2 \left( 1 + \frac{\rho_k p_k}{L_k} \right), \forall k \quad (12)$$

$$p_k \geq 0, p_k \leq \frac{\varepsilon\tau}{1-\tau} \mathbf{v}^H \mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_k \mathbf{v}, \forall k$$

$$\mathbf{v}^H \mathbf{v} \leq P_t$$

#### 3.1 상향링크 시간 비율 최적화

하향링크 최적 빔포밍 벡터  $\mathbf{v}$ 가 정해진 경우 식 (12)로부터  $k$ 번째 단말의 상향링크 송신 전력은 가능한 최대 송신 전력으로 정해지므로 다음과 같이 설정된다.

$$p_k = \frac{\varepsilon\tau}{1-\tau} \mathbf{v}^H \mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_k \mathbf{v} \quad (13)$$

또한, 단말별 상향링크 데이터 스트림 수  $L_k$ 가 고정된 경우 하향링크 시간 할당 비율  $\tau$ 의 최적값은 참고문헌 [5]의 알고리즘 1을 이용해서 구할 수 있다. 우선  $K$ 개의 단말 중 최소 전송률은 다음과 같이 주어진다.

$$R(\tau) = \min (R_1(\tau), R_2(\tau), \dots, R_K(\tau)) \quad (14)$$

예를 들어  $m$ 번째 단말이 최소 전송률을 갖는 경우 경사 하강법(Gradient Descent Algorithm)을 이용해서 다음과 같이  $R_m(\tau)$ 가 증가하는 방향으로  $\tau$ 를 갱신한다.

$$\tau := \tau + \alpha_t \nabla R_m(\tau) \quad (15)$$

이때  $\alpha_t$ 는  $\tau$  갱신을 위한 스텝 크기를 나타내는 파

라미터이다.  $\nabla R_m(\tau)$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$\nabla R_m(\tau) = \frac{R_m(\tau + \delta) - R_m(\tau - \delta)}{2\delta} \quad (16)$$

이때  $\delta$ 는 1보다 매우 작은 상수이다. (13)-(16)의 과정을 반복함으로써 최대-최소 전송률 측면에서 최적  $\tau$  값을 찾을 수 있다.

### 3.2 하향링크 빔포밍 벡터 최적화

하향링크 시간 할당 비율  $\tau$ 와 상향링크 데이터 스트림 수  $L_k$ 가 고정된 경우 (12)에서 상향링크 송신 전력은 가능한 최대 전력으로 설정된다. 따라서 (12)의 최적화 문제는 다음과 같이 단순화된다.

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{v}} \min\{R_1, R_2, \dots, R_K\} \\ & \text{s.t. } R_k = (1-\tau)L_k \log_2 \left( 1 + \frac{\varepsilon\tau\rho_k}{(1-\tau)L_k} \mathbf{v}^H \mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_k \mathbf{v} \right), \forall k \quad (17) \\ & \mathbf{v}^H \mathbf{v} \leq P_t \end{aligned}$$

전체 단말 중  $m$ 번째 단말이 최소 전송률을 갖는다 고 가정하자. 이때 최소 전송률은 다음과 같이 하향링크 에너지 빔포밍 벡터  $\mathbf{v}$ 의 함수로 주어진다.

$$R_m = (1-\tau)L_m \log_2 \left( 1 + \frac{\varepsilon\tau}{1-\tau} \frac{\rho_m}{L_m} \mathbf{v}^H \mathbf{G}_m^H \mathbf{G}_m \mathbf{v} \right) \quad (18)$$

최적 하향링크 에너지 빔포밍 벡터  $\mathbf{v}$ 는 식(10)의 최적화 문제의 해로 주어지지만, 식(10)의 폐쇄형 해가 존재하지 않으므로 계산 복잡도가 매우 높다. 빔포밍 벡터  $\mathbf{v}$ 의 계산 복잡도를 줄이기 위해 [12]에서와 유사하게 하향링크 빔포밍 벡터를 다음과 같이  $K$ 개의 고유벡터의 선형 조합으로 근사화해서 표현한다.

$$\mathbf{v} = x_1 \mathbf{v}_1 + x_2 \mathbf{v}_2 + \dots + x_K \mathbf{v}_K \quad (19)$$

이때  $x_k$ 는  $\mathbf{v}^H \mathbf{v} = P_t$ 를 만족하는 0 이상의 계수이고,  $\mathbf{v}_k$ 는  $\mathbf{Q}_k = \mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_k$ 의 최대 고유값에 대응되는 고유벡터를 나타낸다. 간결한 표현을 위해  $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_K]$ ,  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_K]^T$ 로 정의하면 (19)에서 정의한 하향링크 빔포밍 벡터는

$$\mathbf{v} = \mathbf{V}\mathbf{x} \quad (20)$$

로 표현된다.

식 (20)에서 행렬  $\mathbf{V}$ 는 하향링크 채널에 의해 결정되므로 하향링크 빔포밍 벡터는 계수  $\mathbf{x}$ 에 의해 정해진다. [12]에서는 최소한의 복잡도로 계수 벡터  $\mathbf{x}$ 를 정하기 위해 다음과 같이 근사적인 기법으로  $\mathbf{x}$ 를 정의한다.

$$x_k = \frac{\mu}{\lambda_k \sqrt{\rho_k}}, \forall k \quad (21)$$

이때  $\lambda_k$ 는  $\mathbf{Q}_k$ 의 최대 고유값이고,  $\mu$ 는  $\mathbf{v}^H \mathbf{v} = P_t$ 를 만족하도록 하는 정규화 상수이다. 식(21)로 계수를 고정할 경우 하향링크 빔포밍 벡터의 에너지 전송 손실이 다소 높아지는 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 경사 하강법을 이용하여 낮은 복잡도로 최적의 계수 벡터  $\mathbf{x}$ 를 찾는다.

우선 계수 벡터  $\mathbf{x}$ 의 초기값  $\mathbf{x}(0)$ 은 [12]에서 제안된 근사적인 기법을 이용해서 (21)과 같이 정의한다. 다음으로 상향링크 최소 전송률이 증가하는 방향으로 계수  $\mathbf{x}(n)$ 을 순차적으로 갱신한다. 최소 전송률을 갖는 단말의 인덱스는 다음과 같이 찾는다.

$$m = \arg \min_{1 \leq m \leq K} \{R_1(\tau), R_2(\tau), \dots, R_K(\tau)\} \quad (22)$$

식 (20)을 (18)에 대입하면 최소 전송률은 다음과 같이 표현된다.

$$R_m(\mathbf{x}) = (1-\tau)L_m \log_2 \left( 1 + \frac{\varepsilon\tau P_t}{1-\tau} \frac{\rho_m}{L_m} \mathbf{x}^H(n) \mathbf{S}_m \mathbf{x}(n) \right) \quad (23)$$

이때  $\mathbf{S}_m = \mathbf{V}^H \mathbf{Q}_m \mathbf{V}$ 로 정의된다. 최소 전송률  $R_m(\mathbf{x})$ 를  $\mathbf{x}$ 에 대해 편미분하면 다음식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_m}{\partial \mathbf{x}} &= \varepsilon\tau P_t \rho_m \left( 1 + \frac{\varepsilon\tau P_t}{1-\tau} \frac{\rho_m}{L_m} \mathbf{x}^T \mathbf{S}_m \mathbf{x} \right)^{-1} (\mathbf{S}_m + \mathbf{S}_m^T) \mathbf{x} \\ &= 2\varepsilon\tau P_t \rho_m \left( 1 + \frac{\varepsilon\tau P_t}{1-\tau} \frac{\rho_m}{L_m} \mathbf{x}^T \mathbf{S}_m \mathbf{x} \right)^{-1} \cdot \text{Re}(\mathbf{S}_m) \mathbf{x} \end{aligned} \quad (24)$$

식 (24)를 이용해서 최적 계수 벡터  $\mathbf{x}$ 를 찾기 위한 경사 하강법을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{x}(n) + \alpha \frac{\partial R_m(\mathbf{x}(n))}{\partial \mathbf{x}(n)} \quad (25a)$$

$$\mathbf{x}(n+1) = \frac{\sqrt{P_t}}{\|\mathbf{V}\mathbf{x}(n+1)\|} \mathbf{x}(n+1) \quad (25b)$$

이때  $\alpha$ 는 스텝 크기 파라미터이고, 식 (25a)는 경사 하강법, 식 (25b)는  $\mathbf{v}^H \mathbf{v} = P_t$  를 만족하기 위한 정규화 과정을 나타낸다. 전체적으로 (22),(24),(25)를 반복적으로 수행하여 초기값  $\mathbf{x}(0)$ 로부터 최적 계수 벡터  $\mathbf{x}^o$ 를 찾는다.

### 3.3 단말 데이터 스트림 수 최적화

[12]에서는 모든 단말이 상향링크에서 동일한 수의 데이터 스트림을 전송한다고 가정한다 (즉,  $L_1 = L_2 = \dots = L_K = L$ ). 반면에 본 논문에서는 각 단말의 상향링크 채널 이득을 고려하여 단말의 데이터 스트림 수를 최적화하는 방법을 제안한다.

하향링크 시간 할당 비율  $\tau$ 와 하향링크 에너지 빔포밍 벡터  $\mathbf{v}$ 가 고정된 경우 단말의 최적 데이터 스트림 수를 선정하기 위한 방안을 제안한다. 우선  $k$ 번째 단말의 상향링크 데이터 스트림 수를 단말의 안테나 수와 동일하게 초기화한다 ( $L_k = N_k$ ).  $k$ 번째 단말에서  $L_k$ 개의 데이터 스트림을 전송하는 경우 상향링크 신호대 잡음비의 기하평균은 다음과 같이 계산된다.

$$\rho_k(L_k) = \left( \prod_{\ell=1}^{\ell=L_k} \rho_{k,\ell} \right)^{1/L_k} \quad (26)$$

이때  $\rho_{k,\ell}$ 은  $k$ 번째 단말의  $\ell$ 번째 데이터 스트림의 신호대 잡음비를 나타내고  $\rho_{k,1} \geq \rho_{k,2} \geq \dots \geq \rho_{k,N_k}$ 를 만족한다. 또한,  $L_k$ 개의 데이터 스트림을 전송하는 경우 단말의 전송률은 다음과 같이 주어진다.

$$R_k(L_k) = (1-\tau)L_k \log_2 \left( 1 + \frac{\varepsilon\tau}{1-\tau} \frac{\rho_k(L_k)}{L_k} \mathbf{v}^H \mathbf{Q}_k \mathbf{v} \right) \quad (27)$$

단말의 전송률이 최대가 되도록 하는 데이터 스트림 수를 찾기 위해  $L_k$ 를 변화시키면서 전송률을 비교한다. 이를 위해  $R_k(L_k) < R_k(L_k - 1)$ 인 경우에는 다음과 같이 데이터 스트림 수를 1 감소시키고, (26)와 (27)의 과정을 반복한다.

$$L_k = L_k - 1 \quad (28)$$

그리고  $R_k(L_k) \geq R_k(L_k - 1)$ 이거나  $L_k = 1$ 인 경우 현재  $L_k$  값이 최적 데이터 스트림 수가 된다.

### 3.4 제안된 전송 기법 요약

제안된 MU-MIMO WPCN 전송 기법에서 상향링크 시간 비율  $\tau$ , 하향링크 에너지 빔포밍 벡터  $\mathbf{v}$ , 상향링크 데이터 스트림 수  $\{L_k\}$ 를 동시에 최적화하는 과정을 요약하면 알고리즘 1로 정리된다. 우선  $\tau=0.5$ 으로 초기화하고, 모든 단말에 대해  $L_k = N_k$ 로 초기화하며,  $\mathbf{v}$ 의 초기값은 (20)과 (21)을 이용해서 정의한다. 다음으로 에너지 빔포밍 벡터  $\mathbf{v}$ 와 상향링크 데이터 스트림 수  $\{L_k\}$ 가 고정된 상태에서 1절의 (13)-(16)에서 설명한 경사 하강법을 이용해서  $\tau$ 를 갱신한다. 그리고  $\tau$ 와  $\{L_k\}$ 가 고정된 상태에서 2절의 (22)-(25)에서 설명한 벡터 경사 하강법을 이용해서 에너지 빔포밍 벡터  $\mathbf{v}$ 를 갱신한다. 다음으로  $\tau$ 와  $\mathbf{v}$ 가 고정된 상태에서 3절의 (26)-(28)의 과정을 이용해서 단말 데이터 스트림 수를 최적화한다. 그리고  $\tau$ 와  $\mathbf{v}$ 가 수렴할 때까지 단계2~단계4의 과정을 반복한다. 알고리즘 1을 이용해서 최종적으로  $\tau, \mathbf{v}, \{L_k\}$ 가 결정되면 (9)를 이용해서 최대-최소 전송률을 구한다.

<p>알고리즘 1: 제안된 전송 기법</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 초기화: <math>\tau=0.5, L_k = N_k</math> for all <math>k, \mathbf{v}</math>는 (20)와 (21)에 의해 정의</li> <li>2. <math>\tau</math> 갱신: (13)-(16)</li> <li>3. <math>\mathbf{v}</math> 갱신: (22)-(25)</li> <li>4. <math>\{L_k\}</math> 갱신: (26)-(28)</li> <li>5. <math>\tau, \mathbf{v}</math>가 수렴할 때까지 2~4의 과정 반복</li> </ol>
--

## IV. 제안된 기법 복잡도 분석

이 절에서는 제안된 기법의 복잡도를 분석하고, 기존 기법과 비교한다. 복잡도 차수 분석을 위해 모든 단말의 안테나 수가 동일하고, 단말의 안테나 수와 상향링크 데이터 스트림 수가 같다고 가정한다 ( $N_1 = \dots = N_K = N = L_1 = \dots = L_K$ ). 이때 각 연산 단계별 복잡도 차수는 표 1로 주어진다. 이때  $J_1$ 은 알고리즘 1의 단계2에서  $\tau$  갱신을 위한 경사 하강법의 반복 횟수를 나타내고,  $J_2$ 는 단계3에서  $\mathbf{v}$  갱신을 위한 경사 하강법 반복 횟수를 의미하며,  $J_3$ 은 단계2~단계4를 반복하는 횟수를 나타낸다. 다음 5장의 모의실험

결과에서 보인 바와 같이 일반적인 MU-MIMO WPCN 환경에서  $J_1 < 10$ ,  $J_2 < 100$ ,  $J_3 \leq 5$ 로 주어진다.

[11]에서 제안된 최적 MU-MIMO WPCN 기법의 경우  $O(\sqrt{K}(KMN)^3 \log K)$ 의 연산 복잡도가 요구되고, [12]에서 제안된 부최적 전송 기법의 경우  $O(K^2 M^2 N + K^4 N^3 + M^3)$ 의 복잡도가 필요하다. 비교의 편의를 위해  $M = KN$ 으로 가정하면, [11]의 최적 전송 기법의 복잡도는  $O(K^{6.5} N^6 \log K)$ , [12]의 부최적 전송 기법의 복잡도는  $O(K^4 N^3)$ , 제안된 기법의 복잡도는  $O(K^4 N^3 + KN^2 J_2)$ 로 표현된다. 다음 5장에서는 구체적인 연산 복잡도 비교를 위해 각 전송 방식의 실행시간을 모의실험을 통해 비교한다.

표 1. 제안된 기법의 연산 복잡도  
Table 1. Computation complexity of the proposed method

Step	Complexity
SVD of $\bar{H}_k$ (6)	$O(K^2 M^2 N + K^4 N^3)$
SVD of $H_{e,k}$ (7)	$O(KMN^2 + K^3 N^3)$
Optimization of $\tau$	$O(KNJ_1)$
Optimization of $v$	$O(KN^2 J_2)$
Optimization of $L_k$	$O(KN^2)$
Overall	$O(K^2 M^2 N + K^4 N^3 + KN^2 J_2 J_3)$

### V. 모의실험 결과

모의실험을 통해 제안된 기법과 기존 기법의 최대 최소 전송률을 비교한다. 편의상 모든 단말의 안테나 수를 동일하게 설정한다. MU-MIMO WPCN 시스템의 복잡도와 상향링크 전송률을 비교하기 위해 다음 세가지 전송 방식을 고려한다.

- [11]에서 제안된 최적 전송 기법
- [12]에서 제안된 부최적 전송 기법
- 제안된 전송 기법

[11], [12]의 전송 기법에서 모든 단말의 상향링크 데이터 스트림 수는 동일하다 ( $L_1 = \dots = L_K = L$ ). 공유기 안테나수  $M = 15$ , 단말 안테나수 및 데이터 스트림 수는  $N = L = 3$ 으로 설정한다. 별도로 언급된 경우를 제외하고 사용자 수는  $K = 4$ 로 고정한다.

MU-MIMO 단기 페이딩 (Short-Term Fading) 채널 생성을 위해 Rician 모델을 사용하고, 그림 7을 제외한 모든 모의실험에서 K-factor=0dB로 설정한다. 경로 손실 모델은 다음과 같이 정의하였다.

$$PL_k(\text{dB}) = 20 \log_{10} \frac{f_C}{1\text{MHz}} + 30 \log_{10} \frac{d_k}{1\text{m}} \quad (29)$$

이때 반송파 주파수  $f_c = 2400\text{MHz}$ ,  $d_k$ 는 공유기와  $k$ 번째 단말의 거리이고,  $d_1 = d_0$ ,  $d_2 = d_0 + 0.4$ ,  $d_3 = d_0 + 0.8$ ,  $d_4 = d_0 + 1$ 로 정의하며,  $P_t = 20 \text{ dBm}$ ,  $\epsilon = 0.5$ 로 설정한다.

#### 5.1 실행시간 비교

그림 2에서는 MU-MIMO WPCN 전송 기법의 복잡도 비교를 위해 모의실험을 통해 사용자 수에 따른 실행시간을 비교한다. 모든 단말이 3개의 안테나를 사용하고 ( $N = 3$ ), 각 단말이 최대 세 개의 데이터 스트림을 전송한다 ( $L = 3$ ). 또한, 공유기 안테나 수는  $M = N(K + 1)$ 로 단말 수에 비례해서 증가시킨다. 상향링크 공유기 수신기에서의 잡음 분산  $\sigma^2 = -90\text{dBm}$ ,  $d_0 = 1$ 로 설정한다.

4장에서 이론적으로 분석한 바와 같이 [11]의 최적 전송 기법의 연산 복잡도는  $K^{6.5} \log K$ 에 비례하고, [12]의 부최적 전송 기법의 복잡도는  $K^4$ 에 비례하며, 제안된 전송 기법의 복잡도는  $K^4$ 에 비례한다. 그림 2에서 사용자 수가 증가할 때 [12]의 부최적 전송 기법과 제안된 방식의 실행시간이 [11]의 최적 전송 기법의 실행시간에 비해 완만하게 증가함을 볼 수 있다. 또한, 제안된 기법의 경우 [12]의 전송 기법 대비 하향

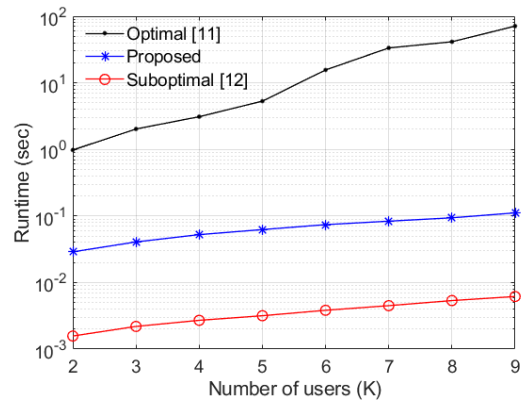


그림 2. 사용자 수에 따른 실행시간 비교  
Fig. 2. Runtime comparison according to the number of users

링크 빔포밍 벡터를 갱신하기 위한 연산이 추가로 필요하므로 [12]에 비해 다소 높은 실행시간을 요구한다.

5.2 제안된 알고리즘 수렴 특성

이 절에서는 제안된 알고리즘에서 사용되는  $\tau$ 에 대한 경사 하강법과  $\mathbf{v}$ 에 대한 벡터 경사 하강법의 수렴 특성을 모의실험을 통해 평가한다.  $\sigma^2 = -80\text{dBm}$ ,  $d_0 = 1$ ,  $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 3$ 로 설정한다. 그림 3에서는 에너지 빔포밍 벡터  $\mathbf{v}$ 를 최적값으로 고정한 경우, (13)-(16)에서 제안된 경사 하강법을 이용해서  $\tau$ 를 갱신하는 경우 반복 횟수에 따른  $\tau$ 의 수렴 특성과 단말 전송률의 수렴 특성을 나타낸다. 전체적으로 약 5회 반복 이후에 정상 상태로 수렴함을 확인할 수 있다. 식(20)에서 정의한 에너지 빔포밍 벡터 표현식이 최적 빔포밍 벡터에 대한 근사식이므로 정상 상태에서 최

적 전송률 대비 약간의 전송률 손실이 발생한다.

그림 4에서는 전송시간 비율  $\tau = 0.18$ 일 때, (22)-(25)에서 제안된 벡터 경사 하강법을 이용해서  $\mathbf{v}$ 를 갱신하는 경우 반복 횟수에 따른 단말의 전송률 수렴 특성을 보인다. 전체적으로 약 90회 반복 이후에 빔포밍 벡터  $\mathbf{v}$ 의 최적값에 수렴하고 4개 단말의 전송률 경우 반복 횟수에 따른 단말의 전송률 수렴 특성을 보인다. 전체적으로 약 90회 반복 이후에 빔포밍 벡터  $\mathbf{v}$ 의 최적값에 수렴하고 4개 단말의 전송률 최소값이 정상 상태로 수렴함을 확인할 수 있다.

5.3 전송률 비교

그림 5에서는  $d_0 = 1$ 일 때 공유기의 수신기 잡음 분산  $\sigma^2$ 의 변화에 따른 단말 최소 전송률을 비교한다. 제안된 전송 기법은 잡음 분산에 상관없이 [12]의 부최적 전송 기법에 비해 우수한 성능을 보이고, 잡음 분산  $\sigma^2$ 이 감소함에 따라 (신호대 잡음비가 증가함에 따라) 전송률 차이가 증가한다. 단말 최소 전송률 기준 [11]의 최적 전송 기법 대비 제안된 전송 기법의 손실은 8.6% 이내로 나타난다.

그림 6에서는 공유기의 수신기 잡음 분산  $\sigma^2 = -80\text{dBm}$  이고,  $d_0 = 1 \sim 5\text{m}$  범위에서 변할 때 단말의 최소 전송률을 비교한다. 모든  $d_0$ 에 대해 제안된 전송 방식이 [12]의 부최적 전송 기법에 비해 우수한 성능을 보이고,  $d_0$ 가 작을 때 성능 차이가 커진다. 또한,  $d_0$ 가 증가하면 상향링크 채널을 기하평균으로 근사화할 때의 오차가 커지므로 [11]의 최적 전송 기법 대비 제안된 기법의 성능 손실이 증가하지만 최대 성능 손실은 0.4dB 이내로 제한된다.

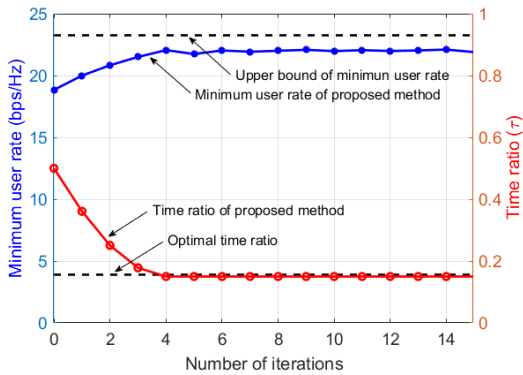


그림 3.  $\tau$  최적화를 위해 제안된 경사 하강법의 수렴 특성  
Fig. 3. Convergence characteristics of the proposed gradient descent method for  $\tau$  optimization

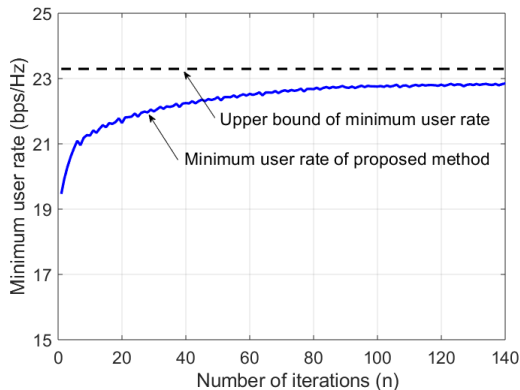


그림 4.  $\mathbf{v}$  최적화를 위해 제안된 벡터 경사 하강법의 수렴 특성  
Fig. 4. Convergence characteristics of the proposed vector gradient descent method for  $\mathbf{v}$  optimization

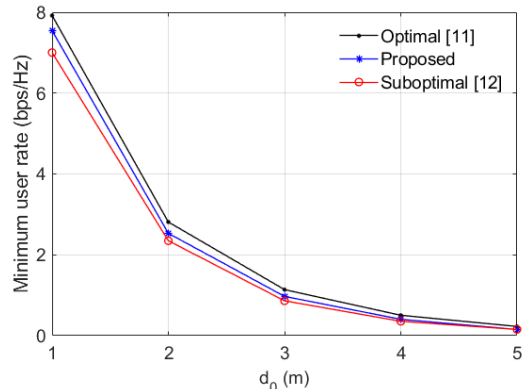


그림 5.  $d_0 = 1$  일 때  $\sigma^2$ 에 따른 단말 최소 전송률  
Fig. 5. Minimum user rate across  $\sigma^2$  when  $d_0 = 1$



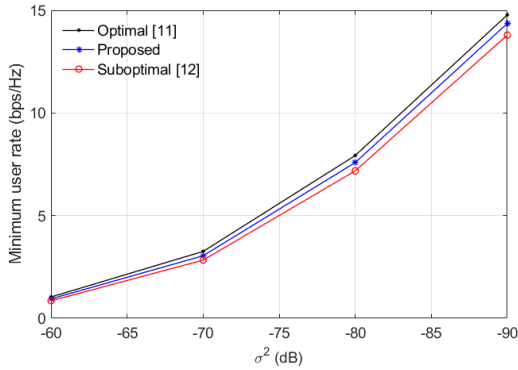


그림 6.  $\sigma^2 = -80\text{dBm}$  일 때  $d_0$  에 따른 단말 최소 전송률  
 Fig. 6. Minimum user rate across  $d_0$  when  $\sigma^2 = -80\text{dBm}$

그림 7에서는  $d_0 = 1$ , 공유기의 수신기 잡음 분산  $\sigma^2 = -80\text{dBm}$  일때, Rician 채널의 K-factor에 따른 단말의 최소 전송률을 비교한다. 제안된 전송 기법은 K-factor에 상관없이 [12]의 부최적 전송 기법에 비해 우수한 성능을 보이고, K-factor가 증가함에 따라 [11]의 최적 기법 대비 전송률 손실이 감소한다. 단말 최소 전송률 기준 [11]의 최적 전송 기법 대비 제안된 전송 기법의 손실은 0.5dB 이내로 나타난다.

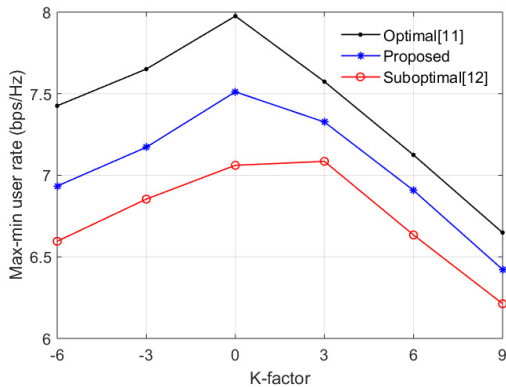


그림 7.  $d_0 = 1$ ,  $\sigma^2 = -80\text{dBm}$  일 때 K factor에 따른 단말 최소 전송률  
 Fig. 7. Minimum user rate across K factor when  $d_0 = 1$  and  $\sigma^2 = -80\text{dBm}$

## VI. 결론

MU-MIMO WPCN 시스템을 최대-최소 전송률 관점에서 최적화하기 위한 유사 최적 알고리즘을 제안하고, 제안된 기법의 복잡도와 성능을 기존 기법과 비교하였다. 제안된 기법은 기존 최적 전송 기법에 비해

복잡도가 현저히 낮으면서 제한적인 성능 손실을 보이고, 기존 부최적 전송 기법에 비해 우수한 전송률을 보인다. 따라서 제안된 전송 기법은 MU-MIMO WPCN 시스템의 상하향링크 시간 비율, 하향링크 빔 포밍 벡터, 상향링크 데이터 스트림 수를 실시간으로 조절하는데 사용할 수 있다.

## References

- [1] P. Grover and A. Sahai, "Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer," in *Proc. Int. Symp. Inf. Theory (ISIT) 2010*, pp. 2363-2367, Austin, Texas, Jun. 2010.
- [2] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, May 2013.
- [3] D. W. K. Ng, S. Lo, and R. Schober, "Wireless information and power transfer: Energy efficiency optimization in OFDMA systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 12, pp. 6352-6370, Dec. 2013.
- [4] X. Gui, Z. Zhu, and I. Lee, "Sum rate maximizing in a multi-user MIMO system with SWIPT," in *Proc. VTC Spring 2015*, pp. 1-5, Glasgow, Scotland, May 2015.
- [5] J. Rubio, A. Pascual-Iserte, D. P. Palomar, and A. Goldsmith, "Joint optimization of power and data transfer in multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 1, pp. 212-227, Jan. 2017.
- [6] T. Jung, T. Kwon, and C.-B. Chae, "Transmission strategies and utility region analysis for wireless powered Communications," in *Proc. Symp. KICS*, pp. 260-261, Daejeon, Korea, Nov. 2014.
- [7] K. Kwon and C. Lee, "An SNR-based power splitting receiver for rate-energy performance improvement of SWIPT in adaptive modulation systems," *J. KICS*, vol. 42, no. 10, pp. 1871-1877, Oct. 2017.
- [8] H. Ju and R. Zhang, "Throughput maximization in wireless powered

communication networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 418-428, Jan. 2014.

- [9] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chua, “Multi-antenna wireless powered communication with energy beamforming,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 12, pp. 4349-4361, Dec. 2014.
- [10] H. Lee, K. J. Lee, H. B. Kong, and I. Lee, “Sum rate maximization for multi-user MIMO wireless powered communication networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 11, pp. 9420-9424, Nov. 2016.
- [11] J. Choi, C. Song, and J. Joung, “Wireless powered information transfer based on zero-forcing for multiuser MIMO systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 8561-8570, Sept. 2018.
- [12] J. Choi and J. Joung, “Low complexity wireless powered information transfer strategy for multiuser MIMO systems,” *IEEE Access (Early Access)*, pp. 1-9, Nov. 2018.
- [13] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*, Cambridge University Press (New York), 2004.

**김 선 영 (Seonyeong Kim)**



2018년 2월 : 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 졸업  
2018년 3월~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정  
<관심분야> 이동통신, 통신신호처리, 모델 설계

[ORCID:0000-0003-0806-2102]

**김 훈 창 (Hoonchang Kim)**



2019년 2월 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 졸업  
2019년 3월~현재 : 삼성전자 네트워크사업부 연구원  
<관심분야> 이동통신, 통신신호처리, 모델 설계

[ORCID:0000-0002-8014-202X]

**최 지 훈 (Jihoon Choi)**



1993년~1997년 : KAIST 전기및전자공학과 학사  
1997년~2003년 : KAIST 전자전산학과 석사 및 박사  
2003년~2004년 : University of Texas, Austin 방문연구원  
2004년~2008년 : 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원

2008년~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수

<관심분야> 무선 전력 전송, 물리계층 보안 통신, 이동통신, 통신신호처리, 모델 설계

[ORCID:0000-0002-5433-2241]