

논문 2015-52-8-1

# MRT 기법 사용 시 다중 사용자 다중 안테나 하향링크 시스템에서의 에너지 효율 향상을 위한 최적화 알고리즘

( Optimization Algorithm for Energy-Efficiency in the Multi-user Massive MIMO Downlink System with MRT Precoding )

이 정 수\*, 한 용 규\*, 심 동 규\*, 이 충 용\*\*

( Jeongsu Lee, Yonggug Han, Dongkyu Sim, and Chungyong Lee<sup>Ⓢ</sup> )

## 요 약

본 논문에서는 사용 가능한 최대 송신 전력과 만족해야 하는 최소 전송률에 대한 제한 조건 아래에서, maximal ratio transmission (MRT) 기법 사용 시 다중 사용자 다중 안테나 하향링크 시스템의 에너지 효율을 최대화하는 최적의 안테나 수와 송신 전력을 찾는 알고리즘을 제시한다. 순시 채널에 대한 최적화 문제는 직접 풀기 어려우므로 단발 간 채널의 독립성, 평균 채널 이득, 평균 path loss를 이용하여 근사한다. 근사된 에너지 효율에 대한 최적화 문제는 두 개의 변수를 동시에 고려해야 하는 2차원 최적화 문제가 된다. 우리는 이러한 2차원 최적화 문제를 라그랑지 승수법과 제안하는 알고리즘을 통하여 최적의 안테나 수와 송신 전력을 구한다. 실험을 통해, 제안하는 알고리즘으로 구한 최적의 송신 안테나 수와 송신 전력이 exhaustive search로 찾은 값과 근사함을 확인한다.

## Abstract

Under the maximum transmit power constraint and the minimum rate constraint, we propose the optimal number of transmit antennas and transmit power which maximize energy-efficiency (EE) in multi-user multiple-input multiple-output (MIMO) downlink system with the maximal ratio transmission (MRT) precoding. Because the optimization problem for the instantaneous channel is difficult to solve, we use independence of individual channel, average channel gain and path loss to approximate the objective function. Since the approximated EE optimization problem is two-dimensional search problem, we find the optimal number of transmit antennas and transmit power using Lagrange multipliers and our proposed algorithm. Simulation results show that the number of transmit antennas and power obtained by proposed algorithm are almost identical to the value by the exhaustive search.

**Keywords** : MRT, 에너지 효율, 다중 사용자 다중 안테나 하향링크 시스템, 최적 안테나 수, 최적 송신 전력

\* 학생회원, \*\* 정회원, 연세대학교 전기전자공학과  
(Department of Electrical and Electronic  
Engineering, Yonsei University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: cylee@yonsei.ac.kr)

※ “이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (N0. 2013R1A1A2012846)”

Received ; February 17, 2015 Revised ; June 30, 2015

Accepted ; July 26, 2015

## I. 서 론

무선 통신 시스템에서, 기지국이 소비하는 에너지는 전체 시스템에서 소비되는 에너지의 절반 이상이다<sup>[1]</sup>. 이에 따라 기지국에서 소모되는 에너지를 고려한 에너지 효율 측면의 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[2~3]</sup>. 특히, radio frequency (RF) chain에서의 소비 전력은 안

테나 수에 비례하여 증가하기 때문에, 기지국에서 많은 수의 안테나를 사용하는 massive multiple-input multiple-output (MIMO) 기술의 에너지 효율에 대한 연구가 주목받고 있다<sup>[4~7]</sup>.

대부분의 기존 연구에서는 사용 가능한 송신 전력과 안테나를 모두 사용함을 가정하였으나, 최근 에너지 효율을 최대화하는 최적의 안테나 수 및 송신 전력이 존재한다는 연구 결과가 제시되었다<sup>[6~7]</sup>. 논문 [6]은 zero-forcing (ZF) 전처리 기법 사용 시, 에너지 효율을 최대화하는 최적의 기지국 안테나 수와 사용자 수, 그리고 전력 할당 문제에 대한 최적화 기법을 제시하였다. 하지만 ZF 전처리 기법은 신호 대 잡음비가 낮은 경우, 또는 다중 셀 환경에서 파일럿 오염에 의한 셀 간 간섭이 존재하는 경우 maximal ratio transmission (MRT) 전처리 기법에 비해 성능 열화가 발생한다<sup>[5]</sup>. 더불어 massive MIMO 시스템은 간단한 구조의 MRT 전처리 기법을 통해 간섭을 효과적으로 제거할 수 있기 때문에, MRT 기법에 대한 추가적 에너지 효율 연구가 필요하다. 반면 [7]은 최대 송신 전력으로 MRT 전처리 기법을 사용했을 때 에너지 효율을 최대화하는 최적의 안테나 수를 제시하였다. 하지만 에너지 효율에 중요한 영향을 끼치는 요소인 송신 전력을 고려하지 않았다는 점에서 그 한계가 존재한다.

본 논문에서는 massive MIMO 하향링크 시스템에서 기지국이 MRT 기법을 사용할 때, 최대 송신 전력 제한 조건과 최소 전송률 조건 아래에서 에너지 효율을 최대화하는 최적의 안테나 수와 송신 전력을 동시에 찾는 알고리즘을 제시한다. 그리고 모의실험을 통해 제안하는 알고리즘이 에너지 효율을 최대화함을 보이고, 결론 및 앞으로의 연구 방향에 대해 논의한다.

## II. 시스템 모델과 에너지 효율

### 1. 시스템 모델

그림 1과 같이 단일 셀 내부에  $N_T$ 개의 송신 안테나를 가진 massive MIMO 기지국과  $K$ 개의 단말이 존재하는 다중 사용자 하향링크 시스템을 고려한다. 각 단말은 셀 내에 균일하게 분포하며, 1개의 수신 안테나를 가지고 있다고 가정한다.

기지국과  $K$ 개 단말 사이의 하향링크 채널은  $\mathbf{G} = \mathbf{D}^{1/2} \mathbf{H} \in \mathbb{C}^{K \times N_T}$ 로 표현되며, 여기서  $\mathbb{C}$ 는 복소수 집



그림 1. 다중 사용자 massive MIMO 하향링크 시스템  
Fig. 1. Multi-user massive MIMO downlink system.

합을 의미한다. 채널의 구성 성분을 살펴보면,  $\mathbf{D} = \text{diag}\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K\}$ 는 large scale fading을 나타낸다.  $\mathbf{D}$ 의 각 성분  $\beta_k = \psi \zeta / d_k^\alpha$ 는  $k$ 번째 단말에 대한 path loss  $d_k^\alpha$ 와 shadow fading  $\zeta$ , 안테나 이득과 관련된 상수  $\psi$ 로 구성된다.  $d_k^\alpha$ 는 기지국과  $k$ 번째 단말간 거리  $d_k$ 와 경로 손실계수  $\alpha$ 로 구성되고,  $\zeta$ 는  $10 \log_{10} \zeta \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{sh}^2)$  분포를 가진다. 또한  $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1^T, \mathbf{h}_2^T, \dots, \mathbf{h}_K^T]^T$ 는 fast fading을 의미하며,  $k$ 번째 단말에 대한 하향링크 채널  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{1 \times N_T}$ 는 Rayleigh flat-fading 채널이고 각각의 성분은 평균 0, 분산 1인 independent identically distributed (i.i.d) 가우시안 랜덤 변수이다.

### 2. 에너지 효율

에너지 효율은 데이터 전송률 합  $R$ 을 이때 소모되는 총 사용 전력  $P_{total}$ 로 나눈으로써, 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{에너지 효율} = \frac{R}{P_{total}}. \quad (1)$$

#### 가. 데이터 전송률

MRT 전처리 기법을 사용한 massive MIMO 기지국의 송신 신호는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \frac{\mathbf{h}_k^H}{\|\mathbf{h}_k\|} \sqrt{P_k} s_k, \quad (2)$$

여기서,  $s_k$ ,  $P_k$ 는 각각  $k$ 번째 단말을 위한 송신 심볼과 송신 전력을 의미한다. 그리고 연산자  $\|\cdot\|$ 는 벡터

norm을 의미하고,  $(\cdot)^H$ 는 hermition 연산을 나타낸다.

$k$ 번째 단말의 수신신호  $y_k$ 와 signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR)은 각각 식 (3), (4)와 같다.

$$y = \sqrt{P_k \beta_k} \|\mathbf{h}_k\| s_k + \sum_{l=1, l \neq k}^K \sqrt{P_l \beta_k} \frac{\mathbf{h}_k \mathbf{h}_l^H}{\|\mathbf{h}_l\|} s_l + w_k, \quad (3)$$

$$\gamma_k = \frac{P_k \beta_k \|\mathbf{h}_k\|^2}{\sum_{l=1, l \neq k}^K \left| \sqrt{P_l \beta_k} \frac{\mathbf{h}_k \mathbf{h}_l^H}{\|\mathbf{h}_l\|} \right|^2 + N_0}, \quad (4)$$

여기서,  $w_k$ 는 i.i.d 분포를 갖는 평균이 0, 분산이  $N_0$ 인 부가 백색 가우시안 잡음 신호를 나타낸다.

최종적으로,  $K$ 개 단말에 대한 데이터 전송률 합은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$R = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \gamma_k). \quad (5)$$

#### 나. 소비 전력

본 논문에서는 식 (6)과 같이 안테나 수에 비례하여 소비 전력이 증가하는 소비 전력 모델을 사용한다<sup>[1]</sup>.

$$P_{total} = \eta P_{tran} + N_a P_R + P_E, \quad (6)$$

이때  $\eta$ 는 파워앰프 에너지 효율 계수,  $P_{tran}$ 은 RF chain의 파워앰프에서 소모되는 전력,  $N_a$ 는 실제 송신에 사용되는 안테나의 수,  $P_R$ 은 파워앰프에서 소모되는 전력을 제외한 나머지 RF chain의 소비 전력,  $P_E$ 는 기타 회로에서 소모되는 전력을 나타낸다. 각 단말에서 소비하는 전력은 기지국에서 소비하는 전력에 비해 매우 작기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않는다.

#### 다. 최적화 문제

제한 조건을 고려한 에너지 효율에 대한 최적화 문제는 식 (7)과 같이 세울 수 있다.

$$N_a^{EE}, P_k^{EE} = \arg \max_{N_a, P_k} \frac{R}{P_{total}}, \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^K P_k \leq P_{max}, \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \gamma_k) \geq C_{min}, 0 < N_a \leq N_T,$$

여기서  $P_{max}$ 와  $C_{min}$ 은 사용 가능한 최대 송신 전력과 요구되는 최소 데이터 전송률을 나타내며,  $N_a$ 와  $N_T$

는 각각 실제로 사용되는 안테나의 수 그리고 기지국에 설치된 총 사용가능한 안테나의 수를 의미한다. 이때 최소 데이터 전송률을 만족하는 전력을  $P_{min}$ 이라 정의한다.

식 (7)의 최적화 문제는 채널 이득 및 path loss가 시간과 단말의 위치, 송신 안테나의 수에 따라 변하므로 분석이 어렵다. 따라서 Jensen's inequality를 사용하여 식 (8)과 같이 평균 데이터 전송률로 근사한다.

$$N_a^{EE}, P_k^{EE} \approx \arg \max_{N_a, P_k} \frac{K \log_2 \left( 1 + \frac{P_k \beta_{avr} N_a}{P_k (K-1) \beta_{avr} + N_0} \right)}{\eta \sum_{k=1}^K P_k + N_a P_R + P_E}, \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^K P_k \leq P_{max}, \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \gamma_k) \geq C_{min}, 0 < N_a \leq N_T,$$

이때 안테나 개수가 많은 massive MIMO 시스템을 가정하였으므로, 평균 채널 이득은  $E[\|\mathbf{h}_k\|^2] \approx N_a$ 로 근사된다. 또한, 간섭 크기에 대한 평균값은 각 단말의 채널이 서로 독립적이기 때문에  $E\left[\left|\frac{\mathbf{h}_k \mathbf{h}_l^H}{\|\mathbf{h}_l\|}\right|^2\right] \approx 1$ 로 근사되며<sup>[8]</sup>, 단말이 셀 내에 균등하게 분포하므로  $E[\beta_k] \approx \beta_{avr}$ 로 근사된다<sup>[9]</sup>. 그 결과, 전력 이득이 각 단말에 상관없이  $N_a$ 와  $\beta_{avr}$ 의 곱으로 동일하게 된다. 따라서 각 단말에 동일한 송신 전력을 할당하게 된다. 이러한 이유로, 우리는 각 단말에 개별적으로 할당되는 송신 전력이 아닌 송신 전력의 합에 관심을 갖는다. 식 (8)의 최적화 문제에 대한 목적함수는 송신 안테나 수  $N_a$ 가 고정되었을 때  $P_k$ 에 대하여 pseudo-concave function이다<sup>[1]</sup>. 따라서 전역 최적 해  $P_k^*$ 가 반드시 존재함을 알 수 있다. 그러나 전역 최적해  $P_k^*$ 가 제한 조건의 가능해 영역  $[P_{min}, P_{max}]$ 을 고려하면 반드시 식 (8)의 해가 되는 것은 아니다. 결론적으로, 최적화 문제의 해는 식 (9)와 같이 세 가지 경우로 나누어 생각할 수 있다.

$$P_k^{EE} = \begin{cases} P_{max}/K, & P_{min} \leq P_{max} \leq P^*, \\ P_{min}^*/K, & P^* \leq P_{min} \leq P_{max}, \\ P^*/K, & P_{min} \leq P^* \leq P_{max}. \end{cases} \quad (9)$$

본 논문에서는  $P_k^{EE} = P_{max}/K$ 의 경우에 대한 최적의 안테나 수를  $\hat{N}_a$ 라 하고, 나머지  $P_k^{EE} = P_{min}/K$ ,  $P_k^{EE} = P^*/K$ 의 경우에 대하여 최적의 안테나 수를 각각  $\bar{N}_a$ ,  $N_a^*$ 로 정의한다.

### III. 에너지 효율을 최대화하는 최적의 기지국 송신 안테나 수와 최적의 송신 전력

본 장에서는 식 (9)의 세 가지 경우에 대하여, 에너지 효율을 최대화하는 최적의 송신 안테나 수와 송신 전력을 제시한다. 송신 전력  $P_k^{EE}$ 가  $P_{\max}/K$ 일 경우, 최적의 안테나 수는 논문 [7]에서 식 (10)과 같이 closed form으로 제시되었다.

$$\hat{N}_a = \left( K - 1 + \frac{KN_0}{\beta_{avr} P_{\max}} \right) (\alpha - 1), \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \alpha = 1 + \zeta \hat{N}_a, \zeta = 1 / \left( K - 1 + \frac{KN_0}{P_{\max} \beta_{avr}} \right), 0 < \hat{N}_a \leq N_T.$$

따라서  $P_{\max}/K$  경우를 제외한 나머지 두 가지 경우에 대하여 최적의 안테나 수와 송신 전력을 제시한다.

#### 1. $P_k^{EE} = P_{\min}/K$ 경우

송신 전력  $P_k^{EE}$ 가 최소 데이터 전송량을 만족하기 위한  $P_{\min}/K$  일 경우,  $\bar{N}_a$ 에 의해  $P_{\min}$ 의 값이 결정된다. 따라서 식 (11)과 같이  $P_{\min}$ 과  $N_a$ 를 동시에 고려하는 2차원 최적화 문제로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \bar{N}_a, P_{\min} \\ & K \log_2 \left( 1 + \frac{\bar{N}_a}{K - 1 + \left( \frac{KN_0}{P_{\min} \beta_{avr}} \right)} \right) \\ & \approx \arg \max_{\bar{N}_a, P_{\min}} \frac{K \log_2 \left( 1 + \frac{\bar{N}_a}{K - 1 + \left( \frac{KN_0}{P_{\min} \beta_{avr}} \right)} \right)}{\eta P_{\min} + \bar{N}_a P_R + P_E}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{s.t. } K \log_2 \left( 1 + \frac{\bar{N}_a}{K - 1 + \left( \frac{KN_0}{P_{\min} \beta_{avr}} \right)} \right) \geq C_{\min}, 0 < \bar{N}_a \leq N_T.$$

최소 전송률에 대한 제한 조건을 통해 식 (11)을 재정리하면 식 (12)와 같은 1차원 최적화 문제로 정리된다.

$$\begin{aligned} \bar{N}_a & \approx \arg \max_{\bar{N}_a} \frac{C_{\min}}{\eta P'_{\min} + \bar{N}_a P_R + P_C} \\ & = \arg \min_{\bar{N}_a} \eta P'_{\min} + \bar{N}_a P_R + P_C, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{s.t. } P'_{\min} = \frac{KN_0}{\beta} \left[ \frac{\bar{N}_a}{2^{(C_{\min}/K)} + 1} - K \right]^{-1}.$$

식 (12)의 경우,  $\bar{N}_a$ 에 대해 convex 하므로 라그랑지 승수법을 이용하여  $C_{\min}$ 을 만족하는  $\bar{N}_a$ 를 구하면 식

(13)과 같다.

$$\bar{N}_a = 2^{(C_{\min}/K)} \log_2 \left( 2^{K - 2^{(C_{\min}/K)} - 1} \sqrt{\frac{\beta_{avr} P_R}{4\eta KN_0}} \right). \quad (13)$$

최종적으로, 얻어진  $\bar{N}_a$ 를 통해  $P_{\min}$ 을 구하면 식 (14)와 같다.

$$P_{\min} = \frac{KN_0}{\beta} \left[ \frac{\bar{N}_a}{2^{(C_{\min}/K)} + 1} - K \right]^{-1}. \quad (14)$$

#### 2. $P_k^{EE} = P^*/K$ 경우

송신 전력  $P_k^{EE}$ 가 에너지 효율을 최대화하는  $P^*/K$ 일 경우, 최적화 문제가  $P_{\min}/K$ 의 경우와 동일한 이유로 식 (15)와 같이 2차원 최적화 문제로 표현된다.

$$\begin{aligned} & N_a^*, P^* \\ & K \log_2 \left( 1 + \frac{N_a^*}{K - 1 + \left( \frac{KN_0}{P^* \beta_{avr}} \right)} \right) \\ & \approx \arg \max_{N_a^*, P^*} \frac{K \log_2 \left( 1 + \frac{N_a^*}{K - 1 + \left( \frac{KN_0}{P^* \beta_{avr}} \right)} \right)}{\eta P^* + N_a^* P_R + P_E}. \end{aligned} \quad (15)$$

그러나 최적화 문제 (15)의 경우,  $P_{\min}/K$  경우에서 사용된 방법으론 풀 수 없다. 그 이유는, 두 변수  $N_a^*$ 와  $P^*$ 의 관계를 알 수 없기 때문이다. 따라서 알고리즘 1을 통해 두 변수  $N_a^*, P^*$ 를 동시에 찾는다.

알고리즘 1.

◦ 1단계 : 변수 초기화  
 $\lambda = 0, P_k = P_{\max}/K, \mathcal{L}(\lambda)$ 의 정확도 ( $\Delta$ ) 설정.

◦ 2단계 :  $N_a$  계산 및 에너지 효율 갱신

초기화된  $P_k$ 에 대하여, 식 (10)을 이용하여  $\hat{N}_a$  계산. 계산된  $\hat{N}_a$ 를 이용, 에너지 효율을 갱신하여 식 (16)과 같이  $\lambda$ 에 저장.

$$\lambda = \frac{K \log_2 \left( 1 + \frac{\hat{N}_a}{K - 1 + \left( \frac{KN_0}{P^* \beta_{avr}} \right)} \right)}{\eta P_k + \hat{N}_a P_R + P_E}. \quad (16)$$

◦ 3단계 : 송신 전력  $P_k$  계산  
 함수  $\mathcal{L}(\lambda)$ 를 식 (17)과 같이 정의.

$$\mathcal{L}(\lambda) = \max_{P_k} \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{N_a}{\left( K-1 + \frac{N_0}{P_k \beta_{avr}} \right)} \right) \right] - \lambda (\eta K P_k + N_a P_R + P_E) \quad (17)$$

여기서, 송신 전력  $P_k$ 는 라그랑지 승수법 식 (18)을 사용하여 획득.

$$P_k = \left[ \frac{1}{\lambda \eta \ln 2} - \frac{P_k \beta_{avr} (K-1) + N_0}{\beta_{avr} N_a} \right]^+, \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \lambda' = \frac{K \log_2 \left( 1 + \frac{N_a}{K-1 + \left( \frac{N_0}{P_k \beta_{avr}} \right)} \right)}{\eta K P_k + N_a P_R + P_E}.$$

구해진 송신 전력  $P_k$ 를 통해  $\mathcal{L}(\lambda)$ 를 갱신.

◦ 4단계 : 반복 및 종료

$\mathcal{L}(\lambda_{n+1} - \lambda_n) < \Delta$  를 만족할 때까지 2~3단계 반복 후 종료.

#### IV. 실험

표 1은 본 논문에서 다룬 최적화 문제에 대한 실험 환경이다. 제안하는 알고리즘을 통해 얻어진 기지국 송신 안테나 수는 소수점을 가지므로 반올림 한 값과 하지 않은 값에 대하여 exhaustive search 결과와 비교한다.  $P_k^{EE}$ 가  $P_{\min}/K$ 인 경우는 에너지 효율 측면에서 본 논문의 취지를 벗어나므로 실험에서 제외한다.

안테나 최적화 문제에 대한 당위성을 그림 2를 통하여 알 수 있다. 그림 2는 송신 전력  $P_k^{EE}$ 가 모든 송신 전력을 사용한  $P_{\max}/K$ 일 경우에 대한 실험 결과이며, 송신 안테나 수에 따른 데이터 전송률, 총소비 전력, 에너지 효율을 나타낸다. 안테나 수가 증가함에 따라 데이터 전송률은 log 함수 형태로 증가하는 반면, 총소비 전력은 안테나 수에 비례하여 선형적으로 증가한다. 최종적으로 에너지 효율은 특정 안테나 수 전후로 증가 감소하는 concave 형태가 된다. 즉, 에너지 효율을 최대화하는 송신 안테나 수가 존재함을 알 수 있다. 따라서 그림 2로부터 무분별한 안테나의 사용은 데이터 전송률의 이득을 가져올 수 있지만, 에너지 효율 측면에서는 비효율적임을 알 수 있다.

그림 3은 사용자의 수가 6~25명 일 때, 제안하는 알

표 1. 모의실험 환경

Table 1. Simulation environment.

Parameter	Value
The number of users	6 ~ 25
Cell radius	0.2 [km]
$P_{\max}$	27.5 [dBm]
$N_0$	-114 [dBm]
$\eta, P_R, P_E$	1/0.12, 2 [W], 10 [W]
$\psi, \alpha, \sigma_{sh}^2$	1, 3.7, 4 [dB]

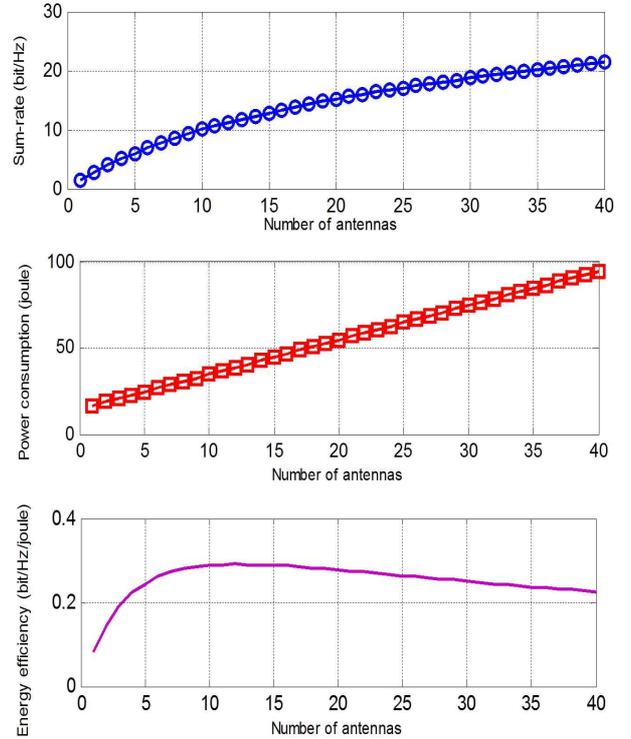


그림 2. 송신 안테나 수에 따른 데이터 전송률, 소비 전력, 에너지 효율

Fig. 2. Sum-rate, power consumption, and energy efficiency for given  $N_T$ .

고리즘을 통해 구한 최적의 송신 안테나 수와 exhaustive search로 찾은 최적의 송신 안테나 수를 비교한 결과이다. 여기서, exhaustive search의 결과는 주어진 사용자의 수 일 때, ergodic capacity에 대하여 최대의 에너지 효율을 가지는 최적의 안테나 수를 나타낸다. 또한, 제안 알고리즘으로 찾은 값은 소수점을 가지므로 반올림 한 값과 그 이전의 값을 모두 표기한다.

제안하는 알고리즘을 통해 구한 최적의 안테나 수가 exhaustive search 결과와 최대 1개의 오차가 있으며, 이러한 오차는 평균 채널 이득과, 간섭에 대한 근사 과

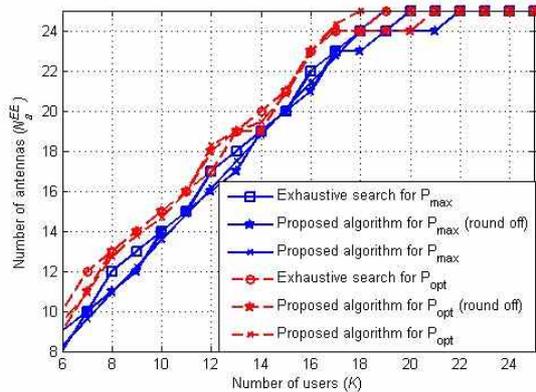


그림 3. 사용자 수에 따른 exhaustive search 방법과 제안 알고리즘으로 구한 최적의 송신 안테나 수 비교

Fig. 3. The optimal number of transmit antennas by the exhaustive search and the proposed algorithm for given  $K$ .

정에서 발생하는 오차임을 알 수 있다. 또한, 송신 안테나 수와 송신 전력은 상호 연관되어 있으므로, 구한 송신 안테나 수와 최적 안테나 수의 일치는 송신 전력 또한 최적의 값과 일치함을 의미한다. 결론적으로, 각 순시 채널에 대한 에너지효율을 평균화하고 그때의 에너지 효율을 최대화 하는 안테나의 수를 전수 조사하여 찾는 일련의 과정 없이, 주어진 사용자 수에 대하여 채널에 대한 정보 없이 제안하는 알고리즘을 통하여 낮은 복잡도로 최대 에너지 효율을 가지는 기지국의 안테나의 수를 찾을 수 있음을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 사용 가능한 최대 송신 전력과 요구되는 최소 데이터 전송률에 대한 제한 조건 아래에서, 에너지 효율을 최대화하는 최적의 기지국 송신 안테나 수와 송신 전력을 찾는 알고리즘을 제시하였다. 제안하는 알고리즘을 통한 송신 안테나 수와 송신 전력은 순시 채널 정보 없이, 최대 에너지 효율에 근사함을 보였다. 단일 셀 환경에서 진행된 본 연구는, MRT 기법이 장점을 가지는 다중 셀 환경과 limited feedback 환경으로 확장될 수 있다.

## REFERENCES

- [1] Congzheng Han; Harrold, T.; Armour, S.; Krikidis, I.; Videv, S.; Grant, Peter M.; Haas, H.; Thompson, J.S.; Ku, I.; Cheng-Xiang Wang; Tuan Anh Le; Nakhai, M.R.; Jiayi Zhang; Hanzo, L., "Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol.49, no.6, pp.46,54, June 2011.
- [2] Jie Xu; Ling Qiu, "Energy Efficiency Optimization for MIMO Broadcast Channels," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.12, no.2, pp.690,701, February 2013.
- [3] Shiwen He; Yongming Huang; Shi Jin; Fei Yu; Luxi Yang, "Max-Min Energy Efficient Beamforming for Multicell Multiuser Joint Transmission Systems," *Communications Letters, IEEE*, vol.17, no.10, pp.1956,1959, October 2013.
- [4] Hong Yang; Marzetta, T.L., "Total Energy Efficiency of Cellular Large Scale Antenna System Multiple Access Mobile Networks," *Online Conference on Green Communications (GreenCom), 2013 IEEE*, vol., no., pp.27,32, 29-31 October. 2013.
- [5] Hien Quoc Ngo; Larsson, E.G.; Marzetta, T.L., "Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems," *Communications, IEEE Transactions on*, vol.61, no.4, pp.1436,1449, April 2013.
- [6] Seungkyu Choi, "Energy-efficiency optimization techniques for ZFBF in the MIMO broadcast channel". Graduate School, Yonsei University : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, 2014.
- [7] Jeongsu Lee; Yonggwe Han; Dongkyu Sim; Chyngyong Lee, "The Optimal Number of Transmit Antennas Maximizing Energy Efficiency in Multi-user Massive MIMO Downlink System with MRT Precoding", *Journal of Electronics Engineers of Korea*, vol.51, TC, no.11, pp.33~39, Nov. 2014.
- [8] Yunchuan Yang; Wenbo Wang; Hui Zhao; Long Zhao, "Transmitter Beamforming and Artificial Noise with Delayed Feedback: Secrecy rate and power allocation," *Communications and Networks, Journal of*, vol.14, no.4, pp.374,384, August. 2012.
- [9] Bharucha, Z., & Haas, H. (2008). The Distribution of Path Losses for Uniformly

Distributed Nodes in a Circle. Research Letters  
in Communications. doi:10.1155/2008/376895.

— 저 자 소 개 —



이 정 수(학생회원)  
2013년 경희대학교 전자전파공학과 학사 졸업.  
2013년~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사 과정.  
<주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO>



한 용 규(학생회원)  
2013년 연세대학교 전기전자공학과 학사 졸업.  
2013년~현재 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정.  
<주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO, 군사전자>



심 동 규(학생회원)  
2011년 연세대학교 전기전자공학과 학사 졸업.  
2011년~현재 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정  
<주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO, 군사전자>



이 충 용(정회원)  
1987년 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.  
1989년 연세대학교 전자공학과 석사 졸업.  
1995년 Georgia Tech. 전자공학과 박사 졸업.  
1996년~1997년 삼성전자 선임연구원  
1997년~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수  
<주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO, 협력통신 시스템, 군사전자>