

논문 2014-51-11-5

# MU-MIMO 하향링크 시스템에서의 MRT 기법 사용 시 에너지 효율을 최대화하는 최적 송신 안테나의 수

( The Optimal Number of Transmit Antennas Maximizing Energy Efficiency in Multi-user Massive MIMO Downlink System with MRT Precoding )

이 정 수\*, 한 용 규\*, 이 충 용\*\*

( Jeongsu Lee, Yonggug Han, and Chungyong Lee<sup>Ⓞ</sup> )

## 요 약

본 논문에서는 다중 사용자 다중 안테나 하향링크 시스템에서 maximal ratio transmission (MRT) 기법 사용 시, 에너지 효율을 최대화하는 최적의 송신 안테나 수에 대해 알아본다. Full channel state information at the transmitter (CSIT) 환경에서 평균 채널 이득, 각 단말 간 채널 독립성, 평균 path loss를 사용하여 최적화 식을 근사하고 편미분을 이용하여 closed form으로 최적의 송신 안테나 수를 구한다. 또한 limited feedback 환경에서는 동일한 방법으로 근사한 목적함수에 대하여 bisection method를 이용하여 최적의 송신 안테나 수를 찾는다. 모의실험 결과를 통해, 구해진 최적의 송신안테나 수가 exhaustive search로 찾은 최적의 송신안테나 수에 비해 오차가 크지 않음을 확인하고, 단말의 피드백 비트 수가 최적의 송신 안테나 수에 미치는 영향을 분석한다.

## Abstract

We propose an optimal number of transmit antennas which maximizes energy-efficiency (EE) in multi-user massive multiple-input multiple-output (MIMO) downlink system with the maximal ratio transmission (MRT) precoding. With full channel state information at the transmitter (CSIT), we find a closed form solution by partial differential function with proper approximations using average channel gain, independence of individual channels, and average path loss. With limited feedback, we get a solution numerically by the bisection with approximations in the same manner, and analyze an effect of feedback bits on the optimal number of transmit antennas. Simulation results show that the optimal numbers of transmit antenna getting from proposed closed form solution and exhaustive search are nearly same.

**Keywords** : MRT, 에너지 효율, 최적의 안테나 수, limited feedback, 다중 사용자 다중 안테나 하향링크 시스템

## I. 서 론

\* 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)”

접수일자: 2014년09월23일, 수정일자: 2014년10월25일  
게재확정: 2014년10월31일

최근 다양한 무선 인터넷 접속 기기의 수가 급격히 증가 하면서, 데이터 트래픽의 요구량 역시 기하급수적으로 증가하고 있다. 이로 인해 발생하는 트래픽 과부하 문제를 해결하기 위한 차세대 기술로 massive multiple-input multiple-output (massive MIMO) 기술이 활발히 연구되고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 massive MIMO 기

술은 무수히 많은 안테나 수를 가정하기 때문에, 안테나의 수에 비례하여 증가하는 radio frequency (RF) chain에서의 소비 전력으로 인하여 커지는 총 소비 전력을 무시할 수 없다<sup>[2]</sup>. 이로 인하여 적정 안테나의 수를 사용할 때 에너지 효율 측면에서 효율적임을 연구 제시 되었다<sup>[3]</sup>.

본 논문에서는 다중 사용자 다중안테나 하향링크 시스템에서 maximal ratio transmission (MRT) 기법 사용 시, 에너지 효율을 최대화 하는 최적의 송신 안테나 수에 대한 최적화 문제를 고려한다. 이와 유사한 연구로 zero-forcing beamforming (ZFBF) 기법을 사용하였을 때 에너지 효율에 대한 최적화 연구가 진행된바 있다<sup>[4]</sup>. ZFBF 기법을 사용하는 경우, 단말 간 간섭이 존재하지 최적화 식을 근사하여 쉽게 간소화 할 수 있고, [4]에서는 단말의 위치에 따른 path loss를 고려하지 않았다. 선행 연구와는 다르게, 본 논문은 단말 간 간섭과 단말의 위치에 따른 path loss와 MRT 기법을 사용함에 있어서 발생하는 단말 간 간섭을 고려한 최적화 문제를 고려한다. 또한, 실제로 기지국은 각 단말로부터 전송된 채널에 대한 정보를 이용하여 데이터를 전송하기 때문에 기지국의 채널정보 인지는 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 기지국에서 채널에 대한 정보를 모두 알고 있는 full channel state information at the transmitter (CSIT) 환경과 부분적인 채널 정보를 알고 있는 limited feedback 환경에서 최적화 문제를 다룬다. Full CSIT 환경인 경우, 최적화 문제의 목적함수 분석을 통해 수식을 근사하고 편미분을 통해 최적 해를 구한다. 반면, limited feedback 환경에서는 bisection method를 이용하여 에너지 효율을 최대화 하는 최적의 송신 안테나 수를 구한다. 더불어 제한된 피드백 비트 수로 인해 발생하는 양자화 오류가 에너지 효율에 미치는 영향과, 그에 따른 최적 송신 안테나 수의 변화를 분석 한다.

## II. 시스템 모델과 에너지 효율

### 1. 시스템 모델

그림 1과 같이 하나의 massive MIMO 기지국과  $K$  개의 단말이 존재하는 다중 사용자 하향링크 시스템을 고려한다. 여기서 massive MIMO 기지국은  $N_T$ 개의 송신 안테나를 가지고 있으며,  $K$ 개의 단말은 각각 1개의

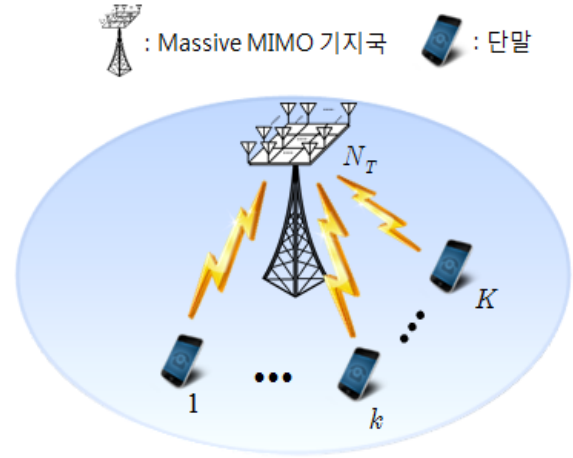


그림 1. 다중 사용자 massive MIMO 하향링크 시스템  
Fig. 1. Multi-user massive MIMO downlink system.

수신 안테나를 가지고 있다고 가정한다. 그리고 각 단말은 셀 내에 균일하게 분포한다고 가정한다.

기지국과  $K$ 개 단말 사이의 하향링크 채널  $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{K \times N_T}$ 는 식 (1)과 같으며, 여기서  $\mathbb{C}$ 는 복소수 집합을 의미한다.

$$\mathbf{G} = \mathbf{D}^{1/2} \mathbf{H} = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1N_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{K1} & \cdots & g_{KN_T} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{G}$ 의 각 성분  $g_{mk}$ 는 기지국의  $k$ 번째 안테나와  $m$ 번째 단말 사이의 채널 계수를 의미한다. 또한 large scale fading을 나타내는  $\mathbf{D} = \text{diag}\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K\}$ 의 각 성분  $\beta_k = \psi\zeta/d_k^\alpha$ 는  $k$ 번째 단말에 대한 path loss와 shadow fading을 의미한다. Path loss  $d_k^\alpha$ 는 기지국과  $k$ 번째 단말간 거리  $d_k$ 와 경로 손실계수  $\alpha$ 로 구성되고, shadow fading  $\zeta$ 는 평균이 0이고, 분산이  $\sigma_{sh}^2$ 인 log-normal 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  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{1 \times N_T}$ 의 각 성분은 평균이 0이고, 분산이 1인 independent identically distributed (i.i.d) 가우시안 분포를 따른다.

가. Full CSIT 환경에서의 전송률

Massive MIMO 기지국은 목적 단말의 수신 signal to noise ratio (SNR)을 최대화하기 위해 MRT 기법을

사용하며, 이때 기지국의 송신 신호는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

여기서,  $w_k$ 는  $k$ 번째 단말의 수신잡음으로 평균이 0이고, 분산이  $N_0$ 인 i.i.d 백색 가우시안 분포를 가진다.

$K$ 개 단말에 대한 전송률의 합은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$R = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \gamma_{k_{P-CSIT}}) \quad (5)$$

#### 나. Limited feedback 환경에서의 전송률

각 단말이 기지국으로 채널 정보를 피드백 할 때 채널 벡터의 방향을  $B$ 개의 피드백 비트로 양자화 하여 기지국으로 전송한다. 이때, 각 단말은 massive MIMO 시스템에서 점근 최적의 양자화 방법인 random vector quantization (RVQ)를 사용한다고 가정한다<sup>[5]</sup>. 기지국은 피드백을 통해 얻은 양자화된 채널  $\hat{\mathbf{h}}_k \in \mathbb{C}^{1 \times N_T}$ 를 이용하여 송신 신호를 식 (6)과 같이 구성한다.

$$\mathbf{x}_{LIM} = \sum_{k=1}^K \frac{\hat{\mathbf{h}}_k^H}{\|\hat{\mathbf{h}}_k\|} \sqrt{P_k} s_k \quad (6)$$

이때  $k$ 번째 단말의 수신 SINR과 전송률 합은 각각 식 (7), (8)과 같다.

$$\gamma_{k_{LIM}} = \frac{P_k \beta_k \left| \mathbf{h}_k \frac{\hat{\mathbf{h}}_k^H}{\|\hat{\mathbf{h}}_k\|} \right|^2}{\sum_{l=1}^K \left| \sqrt{P_l \beta_k} \frac{\mathbf{h}_k \hat{\mathbf{h}}_l^H}{\|\hat{\mathbf{h}}_l\|} \right|^2 + N_0} \quad (7)$$

$$R = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \gamma_{k_{LIM}}) \quad (8)$$

## 2. 소비 전력 모델

Long term evolution (LTE) 표준을 기반으로 안테나 수에 비례하는 RF chain의 소모 전력을 고려한 기지국의 총 소모 전력은 식 (9)와 같이 모델링 할 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$P_{total} = \frac{\sum_{k=1}^K P_k}{\eta(1 - \sigma_{feed})} + P_{cir} + P_{sta} \quad (9)$$

$$= \frac{\sum_{k=1}^K P_k}{(1 - \sigma_{DC})(1 - \sigma_{MS})(1 - \sigma_{cool})} + P_{cir} + P_{sta}$$

이때  $\eta$ 는 파워앰프 효율,  $P_{sta}$ 는 유효 소비 전력을 나타낸다. 그리고  $\sigma_{feed}$ ,  $\sigma_{DC}$ ,  $\sigma_{MS}$ ,  $\sigma_{cool}$ 은 각각 안테나 공급기, DC-DC 전력 공급기, 메인 전력 공급기와 냉각기의 손실 계수이다. 각 단말에서 소비하는 전력은 기지국에서 소비하는 전력에 비해 매우 작기 때문에 고려하지 않는다. 또한, RF chain의 소비 전력  $P_{cir}$ 은 식 (10)과 같이 송신 안테나 수에 비례하는 특징을 가진다.

$$P_{cir} = N_T(p_{dac} + p_{mix} + p_{filt}) + p_{syn}, \quad (10)$$

여기서,  $P_{cir}$ 을 구성하는  $p_{dac}$ ,  $p_{mix}$ ,  $p_{filt}$ ,  $p_{syn}$ 는 각각 digital-to-analog converter (DAC), 믹서, 필터, 합성기에서 소비되는 소비전력이다.

## 3. 에너지 효율

에너지 효율은 전송률 합과 이때 소모되는 전력량을 나눔으로써, 식 (11)과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{에너지 효율} = \frac{R}{P_{total}} \quad (11)$$

### III. 에너지 효율을 최대화하는 최적의 기지국 송신 안테나 수

#### 1. Full CSIT 환경

기지국은 사용가능한 최대 송신 전력  $P_T$ 를 모두 사용하여 송신한다고 가정한다. 이때 에너지 효율을 최대화하는 기지국 송신 안테나의 수를 찾기 위한 최적화 문제를 식 (12)와 같이 설정할 수 있다.

$$N_T^* = \operatorname{argmax}_{N_T} \frac{R}{P_{total}}, \quad \text{s.t. } 0 < K \leq N_T \quad (12)$$

그러나 식 (12)의 최적화 문제는 송신 안테나 수에 따라 채널 이득이 변하기 때문에 풀기 어렵다. 따라서 평균 채널 이득, 각 단말 채널의 독립성, 평균 path loss를 이용하여 식을 근사한 후 최적화 문제를 푼다. 채널의 구성 성분은 서로 독립적이기 때문에 massive MIMO 시스템에서의 평균 채널 이득은  $E[\|\mathbf{h}_k^2\|] \approx N_T$ 로 근사될 수 있다. 그리고 각 단말 채널 역시 독립적이기 때문에, 간섭 크기에 대한 평균값은  $E[\|\mathbf{h}_k \mathbf{h}_l^H / \|\mathbf{h}_k\|^2] \approx 1$ 로 근사된다<sup>[7]</sup>. 또한 각 단말이 셀 내에 균등하게 분포하므로  $\beta_k \approx \beta_{avr}$ 로 근사한다. 결국 식 (12)의 최적화 문제는 식 (13)과 같이 근사 된다.

$$N_T^* \approx \operatorname{argmax}_{N_T} \frac{K \log_2 \left( 1 + \frac{N_T}{K-1 + KN_0/P_T \beta_{avr}} \right)}{\frac{P_T}{\eta(1-\sigma_{feed})} + P_{cir} + P_{sta} \frac{1}{(1-\sigma_{DC})(1-\sigma_{MS})(1-\sigma_{cool})}}, \quad \text{s.t. } 0 < K \leq N_T \quad (13)$$

식 (13)의 목적함수인 에너지 효율을 분석하면, 분자인 전송률 합은 송신 안테나의 수에 따라 로그 스케일로 증가하고, 분자인 총 소비전력은 송신 안테나의 수에 비례하여 선형적으로 증가한다. 따라서 에너지 효율은 안테나에 수에 대한 quasi-concave 함수임을 알 수 있다. 목적함수가 quasi-concave 함수이므로 이를 최대화하는 전역 최적해  $N_T^*$ 가 반드시 존재하고, 편미분을 통해  $N_T^*$ 를 구할 수 있다. 식 (13)을 보조 상수  $\zeta, \Omega, \varpi$ 를 사용하여  $N_T$ 에 관한 식으로 간략화하면 식 (14)와 같다.

$$N_T^* \approx \operatorname{argmax}_{N_T} \frac{K \log_2(1 + \zeta N_T)}{\Omega N_T + \varpi} \quad (14)$$

$$\text{s.t. } \zeta = \frac{1}{(K-1 + KN_0/P_T \beta_{avr})},$$

$$\Omega = \frac{P_{dac} + P_{mix} + P_{filt}}{(1-\sigma_{DC})(1-\sigma_{MS})(1-\sigma_{cool})},$$

$$\varpi = \frac{\frac{P_T}{\eta(1-\sigma_{feed})} + P_{syn} + P_{sta}}{(1-\sigma_{DC})(1-\sigma_{MS})(1-\sigma_{cool})},$$

$$0 < K \leq N_T$$

식 (14)를  $N_T$ 에 관하여 편미분하면 식 (15)와 같다.

$$\frac{\zeta}{(1 + \zeta N_T)} (\Omega N_T + \varpi) - \Omega \ln(1 + \zeta N_T) = 0 \quad (15)$$

식 (15)를 보조변수  $\alpha, \beta, \gamma$ 를 사용하여  $\alpha = 1 + \zeta N_T$ ,  $\beta = \varpi \zeta / \Omega - 1$ , 그리고  $\gamma = \ln \alpha - 1$ 로 각각 치환하면 식 (16), (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \alpha(\ln \alpha - 1) = \alpha \gamma \quad (16)$$

$$\frac{\beta}{e} = e^{\frac{\ln \alpha}{e}} (\ln \alpha - 1) = e^{\gamma} \gamma \quad (17)$$

최종적으로 식 (17)은 Lambert W-function ( $W(z)e^{W(z)} = z$ )의 꼴이므로  $\gamma = W\left(\frac{\beta}{e}\right)$ 를 이용하여, 에너지 효율을 최대화하는 최적의 송신 안테나의 수를 식 (18)과 같이 closed form으로 구할 수 있다.

$$N_T = \left( K - 1 + \frac{KN_0}{\beta_{avr} P_T} \right) (\alpha - 1) \quad (18)$$

#### 2. Limited feedback 환경

RVQ 방법을 사용하는 point-to-point multiple-input single-output (MISO) 시스템에서는 채널에 대한 양자화 오류로 인하여  $10 \log_{10}(1 - 2^{-(B/N_T-1)})$ 의 SNR 손실이 발생함을 예시 알 수 있다<sup>[5]</sup>. 여기에서  $B$ 는 피드백 비트 수를 나타낸다. 일반적으로 point-to-point MISO 시스템의 경우 단말이 1개의 안테나를 가지는 다중 사용

자 하향링크 시스템으로 확장이 가능하다. 또한 단말의 채널이 서로 독립적이기 때문에 식 (19)와 같이 양자화 오류로 인하여 생기는 문제는 간섭 신호에 관해서 무관해지며, 간섭의 크기는 full CSIT 환경일 때와 동일하다.

$$E[\mathbf{h}_k \hat{\mathbf{h}}_k^H / \|\hat{\mathbf{h}}_k\|^2] = E[\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H / \|\mathbf{h}_k\|^2] \quad (19)$$

최종적으로 limited feedback 환경에서의 최적화 문제는 식 (20)과 같다.

$$N_T^* = \arg \max_{N_T} \frac{K \log_2 \left( 1 + \zeta N_T \left( 1 - 2^{-2 \frac{B}{N_T - 1}} \right) \right)}{\Omega N_T + \varpi}, \quad (20)$$

s.t.  $0 < K \leq N_T$

식 (20)의 최적화 문제의 해를 closed form 형태로 구하는 것은 future work로 남기며, 본 논문에서는 bisection method를 이용한다<sup>[8]</sup>.

#### IV. 실험

본 장에서는 앞서 III장에서 다룬 최적화 문제를 풀어 구한 식 (18)의 closed form 해와 exhaustive search 방법을 사용하여 구한 최적 송신 안테나의 수를 비교 분석한다. 실험 환경은 표 1과 같으며, 식 (18)을 통해 찾은 최적의 송신 안테나 수가 소수값을 가질 경우 반올림을 통해 최적의 송신 안테나 수를 결정한다.

그림 2는 단말의 수에 따라 제안하는 closed form 해와 근사 전후 목적함수에 대한 exhaustive search 방법으로 찾은 최적 송신 안테나 수를 비교한다.

실험 결과, closed form의 최적 송신 안테나 수가 근사 후 목적함수에 대한 exhaustive search 방법의 결과와 같으며, 근사 전 exhaustive search 방법의 결과와는 최대 1개의 오차가 있음을 알 수 있다.

이 결과를 바탕으로 채널 이득과 간섭의 크기, 그리고 path loss의 각 평균값을 이용하여 식 (13)으로 근사한 과정이 타당함을 알 수 있다. 더불어 closed form인 식 (18)의 결과가 근사 후 exhaustive search 방법을 통해 구한 최적 송신 안테나 수를 정확하게 유도함을 확인할 수 있다. 제안된 방법은 exhaustive search 방법에 비해 낮은 복잡도를 가지며, 단말에 대한 순시 채널 정보 없이 최적의 송신 안테나의 수를 찾을 수 있는 장점

표 1. 모의실험 환경

Table 1. Simulation environment.

Parameter	Value
The number of users	2 ~ 12
Cell radius	0.2 [km]
Transmit power ( $P_T$ )	27.5 [dBm]
Noise power	-114 [dBm]
$\eta, \sigma_{DC}, \sigma_{MS}, \sigma_{Cool}$	38.8, 6, 9, 7 [%]
$P_{due}, P_{mix}, P_{filt}, P_{syn}$	15.6, 30.3, 20, 50 [mW]
$\psi, \alpha, \sigma_{sh}^2$	1, 3.7, 10[dB]

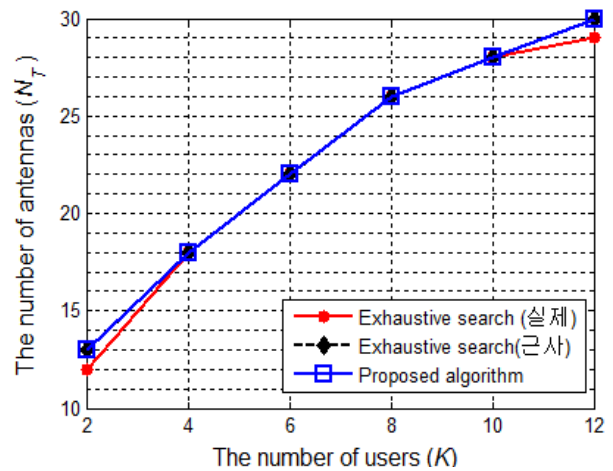


그림 2. Full CSIT 환경에서 exhaustive search 방법과 제안하는 closed form 해로 구한 최적의 송신 안테나 수 비교

Fig. 2. The optimal number of transmit antennas by the exhaustive search and the proposed closed form solution with full CSIT.

을 갖는다.

그림 3은 limited feedback 환경에서 단말의 수가 12개, 송신 안테나의 수가 2~40개일 때 피드백 비트 수에 따른 에너지 효율을 나타낸다. 식 (14), (20)을 통해 단말의 수에 관계없이 각 환경에 대한 최적화 문제의 분모는 같음을 알 수 있다. 그러나 식 (20)을 통해 양자화 오류로 인한 SNR 손실이 송신 안테나 수의 증가에 따라 지수적으로 커지기 때문에 에너지 효율의 최대점은 적은 수의 송신안테나 수로 밀집함을 볼 수 있다.

그림 4는 단말의 수가 2~12개 일 때, 피드백 비트수에 따른 bisection method 기법과 근사 전 목적함수에 대한 exhaustive search 방법을 이용한 최적의 송신 안테나 수를 비교한 실험 결과이다. 근사과정에서 발생하는 오차로 인한 최적 안테나 수의 오차가 최대 1개임을

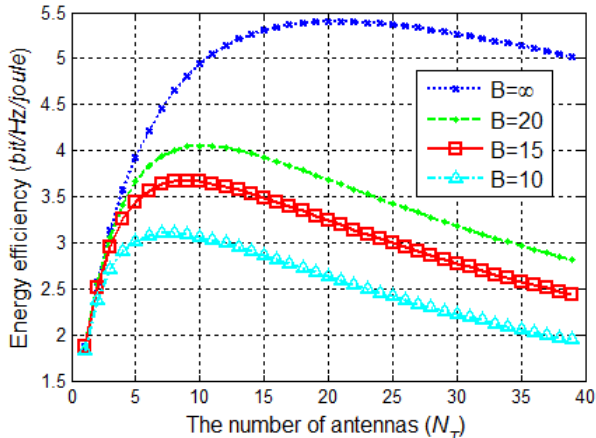


그림 3. 피드백 비트 수와 송신 안테나 수에 따른 에너지 효율 비교

Fig. 3. Energy efficiency for given  $B$  and  $N_T$ .

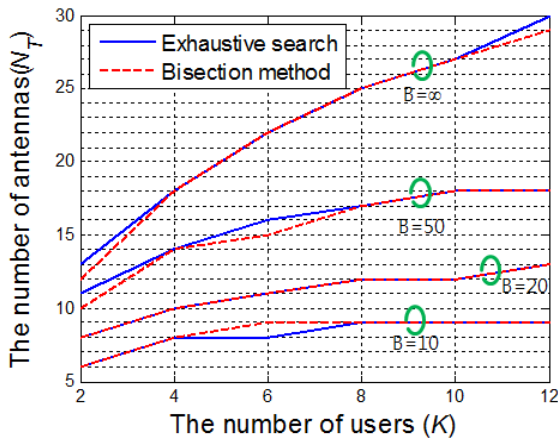


그림 4. 피드백 비트 수와 유저 수에 따른 exhaustive search 방법과 bisection method로 구한 최적의 송신 안테나 수 비교

Fig. 4. The optimal number of transmit antennas by the exhaustive search and the bisection method for given  $K$  and  $N_T$ .

확인 할 수 있다. 또한 피드백 비트 수가 많아질수록 limited feedback 환경에서의 에너지 효율을 최대화 하는 송신 안테나의 수가 full CSIT에서의 최적 송신안테나의 수로 접근한다. 이러한 이유는 피드백 비트 수가 많을수록 양자화 오류가 적어지기 때문이다. 더불어, 그림 3에서 상술한 동일한 이유로, 단말의 수가 많아질수록 full CSIT 환경과 limited feedback 환경에서의 에너지 효율을 최대화 하는 최적의 송신 안테나 수의 차가 커짐을 확인 할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 에너지 효율을 최대화하는 기지국 송신 안테나 수에 대한 최적화 문제를 세우고, 채널이득, 간섭 그리고 path loss에 대한 평균값들을 사용하여 최적화 문제를 근사하였다. Full CSIT 환경의 경우 편미분을 통하여 최종적으로 Lambert W-function 형태로 closed form 해를 제안하였다. 그리고 실험을 통해 근사 과정이 타당함을 보이고, 구한 closed form 해가 정확함을 확인하였다. 또한, limited feedback 환경에서는 bisection method를 통해 채널에 대한 양자화 오류에 의해 에너지 효율을 최대화하는 최적의 안테나 수가 적은 수로 밀집됨을 확인하였다. 향후 limited feedback 환경에서의 최적화 문제는 수식 분석을 통해 closed form 해를 구하는 연구로 확장될 수 있다. 더불어 최적 송신 안테나 수 뿐만 아니라 동시에 에너지 효율을 고려한 전력에 대한 최적화 문제로 확장 가능하다.

## REFERENCES

- [1] Rusek, F.; Persson, D.; Buon Kiong Lau; Larsson, E.G.; Marzetta, T.L.; Edfors, O.; Tufvesson, F., "Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol.30, no.1, pp.40,60, Jan. 2013.
- [2] Hongseok Kim; Chan-Byoung Chae; de Veciana, G.; Heath, R.W., "A cross-layer approach to energy efficiency for adaptive MIMO systems exploiting spare capacity," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.8, no.8, pp.4264,4275, Aug. 2009.
- [3] Miao, Guowang, et al. "Cross layer optimization for energy efficient wireless communications: a survey." *Wireless Communications and Mobile Computing* 9.4 (2009): 529-542
- [4] Jie Xu; Ling Qiu, "Energy Efficiency Optimization for MIMO Broadcast Channels," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.12, no.2, pp.690,701, Feb. 2013.
- [5] Jindal, N., "MIMO Broadcast Channels With Finite-Rate Feedback," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol.52, no.11, pp.5045,5060, Nov. 2006.
- [6] G. Auer, et al., "D2.3: Energy Efficiency

Analysis of the Reference Systems, Areas of Improvements and Target Breakdown,” in *Proc. of the 2010 IEEE Global Communications Conference Workshops* (Globecom 2012 Workshops), Muiami, Florida, USA, Dec. 2012.

- [7] 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, Aug. 2012.
- [8] Burden R.L. and Faires J.D. *Numerical Analysis*, Third edition, Prindle, Weber & Schmidt, Boston (1985).

---

— 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>



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>