2014년 5월 전자공학회 논문지 제 51권 제 5 호
Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol. 51, NO. 5, May 2014 http://dx.doi.org/10.5573/ieie.2014.51.5.029

논문 2014-51-5-4

다중 사용자 다중 안테나 하향링크 채널에서 에너지 효율 향상을 위한 기지국 활성 안테나 수 최적화 기법

(Optimization of the Number of Active Antennas for Energy-Efficiency in the MIMO Broadcast Channel)

최 승 규*, 김 도 훈**, 이 충 용***

(Seungkyu Choi, Dohoon Kim, and Chungyong Lee©)

요 약

본 논문에서는 다중 사용자 다중 안테나 하향링크 채널에서 에너지 효율을 향상시키기 위하여 zero-forcing beamforming (ZFBF) 전처리 필터 기반의 기지국 활성 안테나 수 최적화 기법을 제안한다. 제안하는 기법에서는 최적의 안테나 수를 찾는 연산과정의 복잡도를 줄이기 위하여 사용자의 순시 채널 이득 대신 ZFBF의 평균 채널 이득을 사용한다. 그리고 분수함수 형태의 목적함수를 차를 이용한 목적함수로 변환하여 최적의 안테나 수와 최대 에너지 효율을 찾는 과정을 반복 수행하여 문제를 해결한다. 모의실험을 통해 제안하는 기법의 에너지 효율은 exhaustive search 방법으로 찾은 최대 에너지 효율과 거의 동일함을 확인한다.

Abstract

We introduce a number of antenna optimization problem for the zero-forcing beamforming (ZFBF) scheme to enhance energy-efficiency (EE) of the multiple-input-multiple-output broadcast channel. For proposed optimization problem, we assume an instantaneous channel gain of the ZFBF scheme as an average channel gain, given by $N_a - K + 1$, in order to reduce a computational complexity of finding the number of active antennas N_a. Then, we convert a fractional-form objective function into a subtractive-form, and find a solution of N_a and the maximum EE by an iterative process. Simulation results show that the maximum EE value obtained by proposed algorithm is almost identical to the optimal EE value by the exhaustive search method.

Keywords : 다중 사용자 다중안테나 하향링크 채널, 에너지 효율, ZFBF, 안테나 수 최적화

Ⅰ. 서 론

스마트폰, 태블릿 PC와 같은 모바일 디바이스를 사용하는 사용자의 급증과 함께 무선통신 시스템의 데이터 트래픽이 폭발적으로 증가하고 있어 차세대 무선 통신 시스템에서는 지금보다 1000배 이상의 시스템 전송 용량을 제공할 수 있는 기술을 요구하고 있다[1]. 한편, 국제 유가 상승에 따른 단위 전력 당 비용 상승, 이산화

* 학생회원, *** 정회원, 연세대학교 전기전자공학과
(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)
** 정회원, 전자부품연구원
(Korea Electronics Technology Institute)
© Corresponding Author(E-mail: cylee@yonsei.ac.kr)
※ "이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2013R1A1A2012846)"
접수일자: 2014년1월17일, 수정일자: 2014년3월21일
수정완료: 2014년4월24일

탄소 배출량을 감소시키기 위한 그린IT 기술에 대한 요구 등 다양한 이유로 인하여 차세대 무선 통신 시스템에서는 에너지 효율을 최대화 할 수 있는 기술 또한 요구하고 있다[1]. Massive multiple-input multiple output (massive-MIMO) 기술은 위에서 언급한 데이터 전송 효율 뿐 아니라 에너지 효율 측면 모두를 만족시킬 수 있는 핵심 요소기술로서 최근 데이터 전송량을 확보하는 연구에서 더 나아가 에너지 효율을 증대시키기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다[2]-[4].

지금까지 에너지 효율 증대를 위한 MIMO 기술 연구는 대부분 기지국에서 사용되는 안테나 수가 고정된 상태에서 수행되는 전력 할당 기법 연구가 주를 이루고 있다[5~8]. 그러나 radio-frequency (RF) chain에서 실제 소모되는 에너지를 고려하면 사용되는 안테나 수에 비례하여 RF chain의 에너지 소모량 또한 증가하기 때문에, 전력 할당 기법 뿐 아니라 기지국에서 사용되는 안테나 수 또한 에너지 효율 성능에 큰 영향을 끼치게 된다. 특히, massive-MIMO 기술은 매우 많은 수의 안테나를 가정하고 있기 때문에 사용되는 안테나 수를 최적화 하는 것은 에너지 효율 관점에서 중요한 의미를 갖는다. 기존 연구에서도 무조건 많은 수의 안테나를 사용하는 것보다 적당한 수의 안테나를 사용할 때 MIMO 기술의 에너지 효율이 우수하다는 결과가 제시되었다[9]. 따라서 massive-MIMO 기술의 에너지 효율을 증대시키기 위해서는 전력 할당 기법 뿐 아니라 얼마나 많은 수의 기지국 안테나를 이용하여야 하는지에 대해서도 반드시 고려하여야 한다.

이를 위하여 본 논문에서는 기지국 활성 안테나 수를 최적화하는 문제를 고려하기로 한다. 이와 유사한 연구로서 [5]에서는 전력할당을 고려하지 않는 상태에서 활성 안테나 선택 기법을 제안하였다. 그러나 본 논문은 에너지 효율을 향상시키기 위하여 순시채널 정보를 이용하여 안테나를 선택하는 기존 기법과 달리 순시채널 정보 궤환 없이 주어진 기지국 안테나 중 몇 개의 안테나를 이용하는 것이 평균적으로 에너지 효율이 최적인지에 대한 연구라는 측면에서 그 차별성이 존재한다. 활성 안테나 수 최적화 문제를 설정함에 있어 다중 사용자 다중 안테나 시스템의 전처리 필터로 zero-forcing beamforming (ZFBF)[10]을 사용하고, 실제 기지국에서 소비되는 세부 전력들을 수식화한 소비전력 모델[5]을 고려한다. 그리고 기지국과 사용자 사이의 채널 이득의 통계적인 특성을 이용하여 에너지 효율을 최대화시키는 최적의 기지국 활성 안테나 수를 구한다. 모의실험에서는 제안하는 기법의 에너지 효율이 ZFBF 전처리 필터를 사용한 다중 사용자 다중 안테나 시스템의 최대 에너지 효율과 거의 동일한 에너지 효율에 도달할 수 있음을 보인다.

Ⅱ. 시스템 모델

1. 다중사용자 다중안테나 시스템 모델

그림 1과 같이 하나의 기지국과 K명의 사용자가 존재하는 다중사용자 다중안테나 하향링크 시스템을 고려한다. 여기서, 기지국은 N개의 안테나를 가지고 있으며 각 안테나는 각각의 RF chain을 갖는다고 가정한다. 또한, 모든 사용자는 같은 large scale fading을 겪지만 각 사용자는 서로 다른 small scale fading을 겪는 homogeneous한 시나리오를 가정한다. 위 시스템에서 기지국과 사용자 k의 채널은 $1\times N$ 벡터 $\boldsymbol{h}_k$로 표시되고, 채널 $\boldsymbol{h}_k$는 Rayleigh flat-fading 채널이고 각각의 성분들은 i.i.d 분포를 갖는 평균 0, 분산 1인 가우시안 랜덤 변수이다. 기지국에서는 다중 사용자 간섭을 제거하는 전처리 필터로 ZFBF 기법을 사용한다. 전처리 필터 $\boldsymbol{W}=\left[\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,...,\boldsymbol{w}_K\right]$는 $\boldsymbol{H}=\left[\boldsymbol{h}_1^T,\boldsymbol{h}_2^T,...,\boldsymbol{h}_K^T\right]^T$의 pseudo-inverse 행렬 $\boldsymbol{H}^{\dagger}$와 전력 정규화 행렬 $\boldsymbol{D}$로 구성될 수 있다[10].

$$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{H}^{\dagger}\boldsymbol{D}=\boldsymbol{H}^{H}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{H}^{H})^{-1}\boldsymbol{D} \tag{1}$$

여기서, $\boldsymbol{w}_k$는 k번째 사용자를 위한 $N\times 1$ 벡터를 나타내고, $\dagger$는 pseudo-inverse 연산자, $(\cdot)^H$는 conjugate transpose 연산자, $(\cdot)^T$는 transpose 연산자를 의미한다. 전력 정규화 행렬 $\boldsymbol{D}$는 대각 행렬이며 그 대각 성분들의 값은 다음과 같다.

$$d_k=\frac{1}{\sqrt{\left[(\boldsymbol{H}\boldsymbol{H}^{H})^{-1}\right]_{k,k}}}. \tag{2}$$

기지국에서 사용하는 전력할당 행렬을 대각행렬 $\boldsymbol{P}$로 정의할 때, 전송신호는 다음과 같이 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{W}\boldsymbol{P}\boldsymbol{a}$로 나타낼 수 있고, k번째 사용자가 수신하는 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

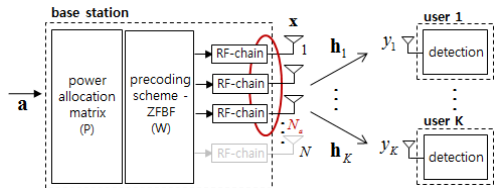

그림 1. 다중사용자 다중안테나 시스템 블록도
Fig. 1. A block diagram of the MIMO-BC.

$$y_k = \sqrt{P_k}\boldsymbol{h}_k\boldsymbol{w}_k a_k + \sum_{j \neq k}\sqrt{P_j}\boldsymbol{h}_k\boldsymbol{w}_j a_j + n_k \quad (3)$$

여기서, P_k는 k번째 사용자에게 할당된 전력을 의미하고, $\boldsymbol{a}= [a_1, a_2, ..., a_K]^T$는 사용자들에게 보내는 데이터 벡터, n_k는 i.i.d 분포를 갖는 평균 0, 분산 σ_n^2인 부가 백색 가우시안 잡은 신호를 나타낸다. ZFBF 전처리 필터의 특성에 의하여 식 (3)의 두 번째 항, 즉 다중 사용자 간섭은 0이 되어, 식 (3)에 의해 구해지는 다중사용자 다중안테나 하향링크 채널의 throughput은 식 (4)로 표시될 수 있다[10].

$$C_{ZF} = \sum_{k=1}^{K}\log_2\left(1+\frac{P_k d_k^2}{\sigma_n^2}\right) \quad (4)$$

2. 기지국 소비전력 모델

다중안테나 시스템의 에너지 효율은 기지국 각각을 구성하고 있는 요소들에서 사용되는 전력소모량에 매우 큰 영향을 받는다. 예를 들어, RF chain 구성요소에서 소모되는 전력량은 기지국 안테나가 늘어날수록 실제 데이터를 전송하는데 소모되는 전력량과 유사할 만큼 무시할 수 없는 양이 되고, 기지국의 기타 요소들에서 소모되는 전력량 또한 전체 전력소모량의 상당한 부분을 차지하게 된다. 이러한 점들을 고려하였을 때, 본 논문에서는 총 전력소모량을 크게 세 가지로 분류하는 다음과 같은 소비전력 모델을 적용하도록 한다[5].

$$P_{tot} = \eta P_T + N_a P_R + P_C \quad (5)$$

여기서, η는 파워앰프의 에너지 효율 계수, P_T는 파워앰프에서 소모되는 전송전력, P_R은 RF chain에서 파워앰프를 제외한 나머지 부분에서 소모되는 전력, P_C는 기지국의 기타 부분에서 소모되는 모든 전력, N_a는 데이터를 전송하기 위해 실제 사용되는 안테나 수를 각각 의미한다. 사용자들이 소비하는 전력소모량은 기지국이 소비하는 전력소모량에 비해 매우 작기 때문에 소비전력 모델 (5)에서는 사용자들의 전력소모량은 고려하지 않기로 한다.

Ⅲ. 에너지 효율 향상을 위한 기지국 활성 안테나 수 최적화 기법

기존의 대부분 기법들은 에너지 효율을 향상시키기 위한 방법으로 전력할당 기법을 고려하고 있다. 하지만 에너지 효율은 기지국에서 적용하는 전력할당 기법뿐만 아니라 기지국에서 데이터를 전송하기 위해 실제 사용하는 안테나 수에도 많은 영향을 받는다. 왜냐하면 사용하는 안테나가 늘어날수록 안테나 수에 비례하여 추가적인 RF chain을 필요로 하게 되어 더 많은 전력을 소모하게 되기 때문이다. 따라서 에너지 효율 측면을 고려하였을 때, 기지국에서 몇 개의 안테나를 사용하여 데이터를 전송하는 것이 최적인 것인가에 대한 문제를 고려해 볼 필요가 있다. 이를 위하여, 본 논문에서는 데이터 전송률 (4)와 소비전력 모델 (5)를 이용하여 ZFBF 기법 기반의 다음과 같은 에너지 효율 최적화 문제를 설정하였다.

$$\max_{N_a, P_k} \frac{\sum_{k=1}^{K}\log_2\left(1+\frac{P_k d_k^2}{\sigma_n^2}\right)}{\eta\sum_{k=1}^{K}P_k + N_a P_R + P_C}, \quad s.t.\ \sum_{k=1}^{K}P_k \le P_{\max}, 0 \le K \le N_a \le N, \quad (6)$$

여기서, $P_{\max}$는 최대 송신 파워를 의미하고, 에너지 효율은 실제 전송되는 throughput과 이를 전송하기 위해 소모되는 에너지 소모량의 분수형태(bit/Joule)로 정의된다.

위의 최적화 문제는 N_a와 P_k, 즉 두 개의 변수를 동시에 최적화 하는 2차원 최적화 문제로서 이 문제의 해를 구하기 위해서는 exhaustive search 방법을 사용해야만 한다. 그 이유는 N_a와 d_k^2간의 상관관계가 존재하여 N_a가 변함에 따라 d_k^2 또한 변하기 때문이다. 그런데 만약 N_a와 d_k^2간의 상관관계를 d_k^2의 평균값 $d_k^2 \approx E\{N_a - K + 1\}$[11]을 이용하여 나타낸다면 최적

화 문제 (6)은 다음과 같이 N_a를 찾는 1차원 최적화 문제로 근사화 될 수 있다.

$$\max_{N_a} \frac{K\log_2\left(1+\frac{P_{\max}}{K}\frac{N_a-K+1}{\sigma_n^2}\right)}{\eta P_{\max}+N_aP_R+P_C}, \quad s.t.\ KP_k=P_{\max}, 0\le K\le N_a\le N. \tag{7}$$

이 최적화 문제에서 각 사용자의 채널이득이 모두 평균값 $d_k^2 \approx E\{N_a-K+1\}$으로 치환되었기 때문에 전력할당 문제는 더 이상 고려 대상이 되지 않는다. 전력할당 문제를 고려하지 않음에도 불구하고 이 문제는 실제 전력 할당을 고려한 문제와 비교하였을 때 에너지 효율이 거의 일치하게 되는데, 그 이유는 전력할당 기법을 통해 얻는 분자의 이득보다 실제 사용되는 N_a와 $P_{\max}$가 에너지 효율에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 이 결과는 모의실험 결과를 통해서도 확인할 수 있다.

근사화된 최적화 문제 (7)에서 N_a에 대한 제한조건이 존재하지 않으면, 이 문제의 목적함수는 N_a에 대한 quasi-concave 함수가 되어 그 해가 전역 최적해가 된다. [5]에 의하면, 목적함수가 quasi-concave 함수이면 에너지 효율을 최대화하기 위한 전역 최적해 N_a^*가 반드시 존재하고, 에너지 효율은 $N_a < N_a^*$인 경우 단조증가하고 $N_a > N_a^*$인 경우 단조감소하게 된다. 그러나 만약 N_a의 가능해 영역을 고려하게 되면, 전역 최적해 N_a^*가 반드시 식 (7)의 해가 되는 것은 아니다. 이러한 이유로 인하여, 식 (7)의 해를 구하기 위해서는 N_a^*를 찾는 것 뿐 아니라 N_a^*가 어디에 존재하는지를 찾는 것 또한 고려해야만 한다.

전역 최적해 N_a^*를 찾기 위해서 먼저 식 (7)의 분수형태의 목적함수를 에너지 효율을 나타내는 보조 변수 q를 이용하여 다음과 같이 제한조건을 고려하지 않는 차를 이용한 목적 함수로 치환한다.

$$L(q)= \max_{N_a}\{\mathrm{K}\log_2\left(1+\frac{P_{\max}}{K}\frac{N_a-K+1}{\sigma_n^2}\right) - q(\eta P_{\max}+N_aP_R+P_C)\}, \tag{8}$$

여기서, q^*는 최대 에너지 효율을 의미하고, 그 값은 다음과 같다.

$$q^*=\frac{K\log_2\left(1+\frac{P_{\max}}{K}\frac{N_a^*-K+1}{\sigma_n^2}\right)}{\eta P_{\max}+N_a^*P_R+P_C}. \tag{9}$$

식 (7)과 같은 분수형태 목적함수의 최적화 문제는 그 최적해가 식 (8)과 같이 차를 이용한 목적함수의 최적화 문제와 최적해가 동일하고, q^*는 다음 조건을 만족시킬 때에 구해지는 것이 증명되어 있다[6].

$$L(q^*)=\{\mathrm{K}\log_2\left(1+\frac{P_{\max}}{K}\frac{N_a^*-K+1}{\sigma_n^2}\right) - q^*(\eta P_{\max}+N_a^*P_R+P_C)\}=0. \tag{10}$$

식 (8)을 풀기 위하여 라그랑지 승수법을 이용하기로 한다. q 값이 최초에 주어졌다고 가정하고 식 (8)을 N_a에 대하여 편미분을 적용한 후 그 값이 0이 되는 N_a를 찾으면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$N_a=\frac{K}{qP_R\ln 2}-\frac{K\sigma_n^2}{P_{\max}}+K-1. \tag{11}$$

식 (9)의 q 값을 갱신하고 그 갱신된 값을 이용하여 다시 N_a를 구하는 과정을 반복 수행하면 N_a와 q값은 수렴하게 되고 그 수렴 값이 식 (10)을 만족시키게 된다. 따라서 수렴한 N_a와 q는 전역 최적해 N_a^*와 최대 에너지 효율 q^*를 각각 의미하게 된다.

다음 과정으로 N_a의 가능해 영역을 고려하였을 때 N_a^*값이 가능해 영역 안에 존재하면 그 값이 식 (7)의 해가 되고, 그렇지 않으면 quasi-concave 함수의 특성에 의하여 $N_a^* < K$인 경우에는 $N_a^*=K$, $N_a^* > N$인

표 1. 에너지 효율 최적화 기법 모의실험 환경
Table 1. Simulation environments of an energy-efficiency optimization scheme.

Parameter	Value
η	1/0.12
P_R	2 (W)
P_C	10 (W)
$P_{\max}$	33 (dBm)
σ_n^2	−97.5 (dBm)
N	20
R	0.2 (Km)
Pathloss model	$128.1+37.6\log_{10}(R)$

경우에는 $N_a^* = N$이 식 (7)의 해가 된다. 이를 정리하면 다음과 같다.

$$N_a^* = \begin{cases} N_a^*, & K \le N_a^* \le N, \\ N, & N_a^* > N, \\ K, & N_a^* < K. \end{cases} \quad (12)$$

위의 과정을 알고리즘으로 정리하면 다음과 같다.

1단계(초기화): $q = 0.5$, $\Delta = 10^{-5}$.

2단계(N_a 결정):

식 (11)을 이용하여 N_a를 결정. N_a가 가능해 영역안에 존재하지 않으면, $N_a < K$인 경우 $N_a = K$, $N_a > N$인 경우 $N_a = N$으로 그 값을 대체.

3단계(알고리즘 종료):

N_a와 q를 이용하여 $L(q)$를 계산. $L(q) > \Delta$ 이면, 식 (9)의 q 값을 갱신 후 2단계로 분기하고, 그렇지 않으면 알고리즘을 종료.

Ⅳ. 모의실험 결과

본 논문에서 제안하는 기지국 활성 안테나 수 최적화 기법의 에너지 효율을 보여주기 위하여 표 1과 같이 변수 값들을 설정하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험에서 모든 사용자의 채널은 homogeneous 채널을 가정하였다.

그림 2는 사용자 수 K가 4부터 20까지 변화하였을 때 제안하는 기법과 exhaustive search 방법으로 찾은 최적의 활성 안테나 수를 보여주고 있다. 제안하는 기법으로 찾은 N_a값은 소수 값을 가질 수 있으므로 exhaustive search 방법과 비교하기 위해 그 값을 반올림(Round off) 하였다. 그림 2를 보면 제안하는 기법으로 찾은 N_a값은 exhaustive search 방법으로 찾은 N_a 값과 비교하였을 때 그 값이 같거나 또는 그 차이가 1 밖에 나지 않음을 확인할 수 있다. 그림 3은 그림 2의 결과를 기반으로 도출한 제안하는 기법과 exhaustive search 방법의 에너지 효율을 보여주고 있다. 그림 3에서 'Verification of Proposed Algorithm'은 사용자 채널 이득의 근사값 $N_a - K + 1$을 이용하여 구한 N_a값이 의미 있는 결과인지 증명하기 위해 이 값을 실제 채널에 적용하였을 때의 에너지 효율을 나타낸다. 그림 3을 보면 제안하는 기법이 근사값 $N_a - K + 1$을 이용하였음에도 불구하고 에너지 효율이 exhaustive search 방법으로 찾은 최대 에너지 효율과 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 실제 순시 채널 d_k^2을 기준으로 전력할당 기법을 적용하여 얻는 분자의 이득보다 실제 사용되는 N_a와 $P_{\max}$가 에너지 효율에 더 많은 영향을 주기 때문이다. 위의 결과들은 제안하는 기법이 사용자의 채널정보를 사용하지 않으면서도 exhaustive search 방법보다 적은 복잡도로 최대 에너지 효율과 거의 근사한 에너지 효율을 도출할 수 있음을 의미한다고 할 수 있다.

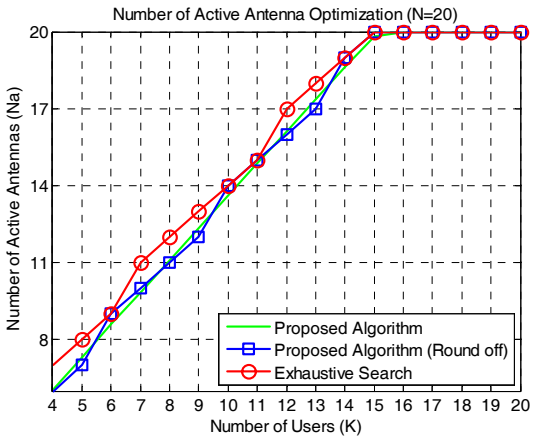

그림 2. 제안 기법과 exhaustive search 방법으로 찾은 최적의 활성 안테나 수

Fig. 2. Optimum number of active antennas by the proposed algorithm and the exhaustive search schemes: K varies from 4 to 20.

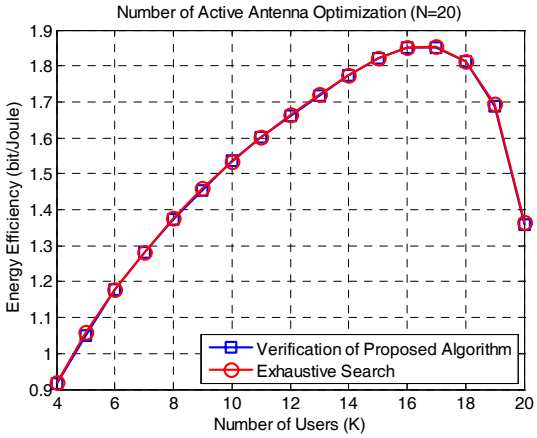

그림 3. 제안 기법과 exhaustive search 방법의 에너지 효율

Fig. 3. Energy-efficiency of the proposed algorithm and the exhaustive search schemes.

V. 결 론

에너지 효율은 전력할당 기법 뿐 아니라 기지국 활성 안테나 수에 의해서도 영향을 받는다. 기지국 활성 안테나 수가 고정되지 않으면 기지국과 사용자 사이의 채널이 변하기 때문에 일반적으로 기지국 활성 안테나 수를 최적화하여 에너지 효율을 향상시키는 것은 어렵지만, 제안하는 기법은 사용자의 순시 채널 이득을 평균 채널 이득으로 근사화 함으로써 exhaustive search 방법으로 찾은 최대 에너지 효율과 거의 동일한 에너지 효율을 얻을 수 있다. 제안하는 기법은 향후 기지국 활성 안테나 수 뿐 아니라 에너지 효율을 고려하는 $P_{\max}$ 값을 동시에 최적화하는 기법, 최소 데이터 전송률의 제약 조건이 있을 때의 활성 안테나 수 최적화 기법 등으로 확장될 수 있다.

REFERENCES

[1] Li-Chun Wang; Rangapillai, S., "A survey on green 5G cellular networks," *Signal Processing and Communications (SPCOM), 2012 International Conference on*, vol., no., pp.1,5, 22-25 July 2012.

[2] 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," *IEEE Sig. Processing Mag.*, vol.30, no.1, pp.40-60, Jan. 2013.

[3] Hien Quoc Ngo; Larsson, E.G.; Marzetta, T.L., "Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol.61, no.4, pp.1436-1449, April 2013.

[4] Hoon Huh; Caire, G.; Papadopoulos, H.C.; Ramprashad, S.A., "Achieving "Massive MIMO" Spectral Efficiency with a Not-so-Large Number of Antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.11, no.9, pp.3226-3239, Sep. 2012.

[5] Jie Xu; Ling Qiu, "Energy Efficiency Optimization for MIMO Broadcast Channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.12, no.2, pp.690-701, Feb. 2013.

[6] Ng, D.W.K.; Lo, E.S.; Schober, R., "Energy-Efficient Resource Allocation in OFDMA Systems with Large Numbers of Base Station Antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.11, no.9, pp.3292-3304, Sep. 2012.

[7] 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," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.8, no.8 pp.4264-4275, Aug. 2009.

[8] Isheden, Christian; Chong, Zhijiat; Jorswieck, E.; Fettweis, Gerhard, "Framework for Link-Level Energy Efficiency Optimization with Informed Transmitter," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.11, no.8, pp.2946-2957, Aug. 2012.

[9] Miao, Guowang, et al. "Cross layer optimization for energy efficient wireless communications: a survey." *Wireless Communications and Mobile Computing* 9.4 (2009): 529-542.

[10] Taesang Yoo; Goldsmith, A., "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.24, no.3, pp.528-541, Mar. 2006.

[11] Paulraj, Nabar, and Gore, Introduction to Space-Time Wireless Communication. NewYork: Cambridge University Press, 2003.

저 자 소 개

최 승 규(학생회원)
대한전자공학회논문지
48권 TC편 제5호 2011년 참조

김 도 훈(정회원)-공동저자
대한전자공학회논문지
50권 TC편 제11호 2013년 참조

이 충 용(정회원)-교신저자
대한전자공학회논문지
48권 TC편 제4호 2011년 참조