

# 다중사용자 다중입출력 하향링크 시스템에서 사용자별 통계적 지연제한을 고려한 전력 할당 기법

권재홍\*, 고영채<sup>o</sup>

## Power Allocation Method for Multi-User MIMO Downlink Systems with Individual Statistical Delay Constraints

Jae-Hong Kwon\*, Young-Chai Ko<sup>o</sup>

요약

본 논문에서는 다중사용자 다중입출력 시스템 하향링크 상황에서 사용자들의 개인별 통계적 지연 제한을 고려한 새로운 전력할당 기법을 제안한다. 물리 계층의 통계적 채널 모델을 고려한 다중사용자 다중입출력 하향링크 시스템에서 주파수 효율성이나 에너지 효율성과 같은 통신 성능을 향상시키기 위한 전력 할당 기법에 대한 연구들은 많이 수행되었다. 그러나 기존에 제안된 방법들은 선택된 다중 사용자들이 서로 다른 통신 어플리케이션을 활용하는 상황 및 서로 다른 네트워크 트래픽을 갖는 상황에 대한 고려가 되지 않아 실제 통신 시스템에 적용되기 어렵다는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 링크 계층의 지연 아웃리지 확률을 고려하여 새로이 제안된 성능 지표인 유효용량 (effective capacity)를 활용하여 사용자들이 서로 다른 지연 제한 조건을 가질 때 통신 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 전력 할당 기법을 제안한다. 향상시키고자 하는 통신 성능 지표로는 통계적 지연 제한을 고려한 통신 시스템의 주파수 효율성 (spectral efficiency)을 의미하는 유효용량과 유효 에너지 효율성 (effective energy efficiency)을 고려한다. 유효용량이 할당된 전력에 대해 볼록함수임을 이용하여 주파수 효율적 전력 할당 기법과 에너지 효율적 전력 할당 기법을 각각 제안하고 모의실험을 통해 성능을 검증한다.

**키워드** : 다중사용자 다중입출력 시스템, 전력 할당, 통계적 지연 제한 조건, 유효 용량, 에너지 효율성  
**Key Words** : multi-user MIMO, power allocation, statistical delay constraint, effective capacity, energy efficiency

### ABSTRACT

In this paper, we propose an novel power allocation algorithm for multi-user multiple-input multiple-output (MU-MIMO) downlink systems with individual statistical delay constraints. Many studies on the power allocation methods for the MU-MIMO downlink systems considering physical layer channel already have been performed to improve the communication system performance such as spectral efficiency or energy efficiency. However, the existing power allocation methods are difficult to be used for practical communication systems since several cases that selected multiple users have different communication applications and they have different network traffic

\* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD160070BD)

• First Author : School of Electrical Engineering, Korea University, hugokwon@korea.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Korea University, koyc@korea.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201907-120-A-RU, Received May 13, 2019; Revised July 24, 2019; Accepted July 26, 2019

have not been considered. Therefore, in this paper, we propose a novel power allocation scheme in order to improve the communication performance when multiple users have different delay constraints by using novel performance metric, effective capacity, which includes the effect of the delay outage probability in the link layer. We consider the effective capacity and effective energy efficiency that are spectral efficiency and energy efficiency with delay constraints, respectively, as performance metrics to be improved. We propose spectral efficient and energy efficient power allocation methods using the point that effective capacity is a convex function for an allocated power and demonstrate our proposed methods by simulation.

## I. 서 론

다중입출력 (multiple-input multiple-output: MIMO) 기술은 셀룰러, 무선랜 등 여러 무선 통신 시스템에서 널리 활용되고 있다. 전통적인 MIMO 기술 관련 연구들은 대부분 기지국 혹은 무선 AP(access point)와 사용자들의 모바일 기기에 다수의 안테나를 갖고 있는 상황에서 주파수 효율성 (spectral efficiency)의 획기적인 증가를 통해 데이터 전송 속도를 늘리는 방향으로 진행되었다. 주파수 효율성을 높이기 위한 대표적인 MIMO 기술은 공간 다중화 (spatial multiplexing) 기술로 일반적인 무선 채널에서 다중화 이득 (multiplexing gain)의 최대값은 송신기와 수신기 안테나 개수의 최소값에 해당된다고 알려져 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 일반적으로 사용자들의 모바일 기기의 경우는 기기의 크기, 배터리 용량 등의 하드웨어적 한계점 때문에 다수의 안테나를 탑재하는 것이 불가능하고 따라서 기지국이 아무리 많은 안테나를 갖춘다고 해도 높은 다중화 이득을 얻기 힘들다.

이를 해결하는 방안 중 하나로 제안된 것이 다중사용자 다중입출력 (multi-user MIMO: MU-MIMO) 기술로 상대적으로 적은 안테나 개수를 갖고 있는 사용자들을 다수 선택하여 같은 시간 및 주파수 자원을 활용해 신호를 송수신하는 기법이다. 사용자끼리는 채널 정보 공유 등의 협력 통신이 어려워 사용자간 간섭이 발생한다는 단점이 있으나 적절한 사용자 선택 및 스케줄링 기법을 적용하면 기지국에서 간단한 프리코딩 혹은 필터링을 통해 사용자간 간섭을 효과적으로 제거하고 높은 다중화 이득을 얻을 수 있다<sup>[2,3]</sup>.

한편, 최근 무선 통신 연구에서는 모바일 사용자들의 데이터 전송 속도의 증대 뿐 아니라 각 사용자들의 통신 품질 서비스 (quality of service: QoS) 보장을 통한 높은 신뢰도의 통신 서비스 제공이 화두가 되고 있다. 물리 계층 관점에서의 QoS는 일반적으로 사용자들에게 요구되는 최소의 샤논 용량 (Shannon capacity)으로 정의되지만 이는 사용자들의 서로 다른 네트워

크 트래픽 환경이나 통신 어플리케이션을 고려하지 않은 것으로, 이를 보완하기 위해 유효용량 (effective capacity: EC)라는 개념이 도입되었다<sup>[4]</sup>. 유효용량은 링크 계층에서 지연으로 인하여 버퍼에 데이터가 축적되어 아웃티지가 발생하는 확률을 고려한 성능 지표이다.

최근 물리 계층 뿐 아니라 링크 계층의 지연 아웃티지 확률을 고려하여 조금 더 현실적인 성능 개선 및 분석을 수행한 연구가 다수 진행되었다<sup>[5-9]</sup>. 먼저 매 시간 슬롯마다 채널이 변화하는 것을 고려하여 적응적으로 송신 신호 비트에 전력 할당을 조절하는 기법이 제안되었다<sup>[5]</sup>. 지연 아웃티지 확률의 제한 조건이 있는 상태에서 유효용량과 차세대 무선 통신의 또 다른 성능 지표 중 하나인 에너지 효율성 (energy efficiency: EE) 사이의 트레이드오프 (trade-off) 관계가 분석되었다<sup>[6]</sup>. 통신 시스템의 에너지 효율성은 일반적으로 ‘샤논 용량/전력 소모량’으로 정의되는데, 샤논 용량 대신 유효용량을 대입하여 새로운 유효 에너지 효율성 (effective-EE) 개념이 제안되었고 이 때 지연 아웃티지 확률이 주는 효과에 대한 분석이 진행되었다<sup>[7]</sup>. 최소 유효용량 제한 조건이 있는 상태에서 최대의 유효 에너지 효율성을 예측하는 연구가 진행되었고<sup>[8]</sup>, 반대로 Nakagami- $m$  페이딩 채널에서 최소의 유효 에너지 효율성 제한 조건이 있을 때 유효용량의 최대화 문제가 다루어졌다<sup>[9]</sup>. 그러나 기존의 연구들은 모두 단일사용자 점대점 통신 상황을 다루었으며 다수의 사용자가 함께 기지국에 접속하여 통신하는 상황에서 지연제한을 고려한 연구는 제한적이다.

본 논문에서는 다중사용자 다중입출력 시스템 하향링크에서 선택된 각 사용자들이 서로 다른 통신 어플리케이션을 사용하고 서로 다른 네트워크 트래픽 상황을 가진다고 가정하고 사용자의 통계적 지연 제한 조건을 고려한 사용자별 전력 할당 기법을 제안한다. 본 연구의 목표는 통계적 지연을 고려한 새로운 성능 지표인 유효용량을 기존의 샤논 용량 대신 활용하고 사용자별 지연 제한 조건을 고려한 전력 할당 최적화

문제를 설정하여 해법을 제시하는 것이다. 설정할 최적화 문제의 목적 함수 (objective function)는 유효용량과 유효 에너지 효율성 2가지이며 각각 사용자별 지연 제한을 고려한 QoS관련 제한 조건과 전체 전력 제한 조건을 포함한다. 이 두 문제를 유효용량과 유효 에너지 효율성의 함수적인 특징을 고려하여 풀고 결과를 시뮬레이션을 통해 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 시스템 모델과 유효용량 및 유효 에너지 효율성 개념에 대해 설명하고, III장에서는 2가지의 최적화 문제를 설정하여 그에 대한 해법을 제시한다. IV장에서는 제안된 기법을 활용한 모의실험 결과를 제시하고 마지막 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 단일셀 다중사용자 다중입출력 시스템에서 기지국이  $N_t$ 개의 안테나, 선택된  $K$ 명의 사용자들이 각각 단일 안테나를 갖고 있는 상황을 고려한다. 기지국과 각  $K$ 명의 유저들 사이의 무선 채널 행렬  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{K \times N_t}$ 는 모든 성분이 평균은 0, 분산은 1인 독립 동일 분포 (independent identically distributed) 복소 가우시안 랜덤 변수로 가정한다.  $K$ 명의 사용자에게 송신하고자하는 신호 벡터를  $\mathbf{x}$ 라 하고 벡터  $\mathbf{x}$ 의 각 성분의 크기가 모두 1로 가정하면, 송신 빔포밍을 했을 경우 수신 신호 벡터  $\mathbf{y}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{F}^{1/2}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

이 때  $\mathbf{n}$ 은 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인 복소 가우시안 잡음,  $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_K] \in \mathbb{C}^{K \times K}$ 는 모든  $m$ 에 대하여  $\|\mathbf{f}_m\| = 1$ 을 만족하는 송신 빔포밍 행렬이며  $\mathbf{P} = \text{diag}(p_1, p_2, \dots, p_K)$ 는 사용자별 전력 할당 행렬이다.  $i$ 번째 사용자의 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_i = \sqrt{p_i} \mathbf{h}_i^T \mathbf{f}_i x_i + \sum_{j=1, j \neq i}^K \sqrt{p_j} \mathbf{h}_i^T \mathbf{f}_j x_j + n_i \quad (2)$$

$i$ 번째 사용자의 채널 정보에 해당되는  $\mathbf{h}_i$ 는  $i$ 번째 사용자가 완벽하게 예측되며 기지국으로 오류 없이 피드백되어 기지국은 선택된 모든  $K$ 명의 사용자의 채널을 모두 알고 있다고 가정한다. 기지국은  $K$ 명의

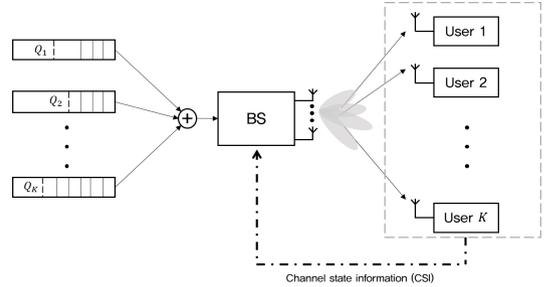


그림 1.  $n$ 번째 사용자의 최대 큐 길이가  $Q_n$ 인 시스템 모델  
Fig. 1. A system model where  $Q_n$  is the threshold of the queue length for the  $n$ th user

사용자로부터 채널 정보를 피드백 받은 다음 송신 빔포밍 행렬  $\mathbf{F}$ 를 설계한다 본 연구에서는 일반적으로 널리 사용되는 제로포싱 빔포밍 (zeroforcing beamforming: ZFBF)을 사용한다. 이 경우, 송신 빔포밍 행렬은 다음과 같이 설계된다<sup>2)</sup>.

$$\mathbf{F} = \sqrt{\gamma} \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (3)$$

여기에서  $\gamma = 1/\text{tr}[(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}]$ 는 송신 빔포밍 행렬의 전력 평준화를 위한 요소이며 동시에 모든  $K$  사용자의 유효 채널 이득 (effective channel gain)에 해당된다. 수식 전개에 간편함을 위하여 잡음의 분산  $\sigma^2$ 를 1이라 가정하면,  $i$ 번째 사용자의 사논 용량은 다음과 같이 표현된다.

$$R_i = \log_2(1 + \gamma p_i) \quad (4)$$

### 2.1 유효용량 (Effective capacity)

물리 계층에서는 식 (4)에 표현된 사논 용량이 무선 채널에서 최대 달성 가능한 데이터 전송 속도를 의미하여 무선 통신 시스템의 성능 지표로서 많이 활용된다.

따라서 다중사용자 다중입출력 시스템의 물리 계층에서의 연구는 사용자의 서비스 품질 (quality of service: QoS)의 정의를 최소로 요구되는 사논 용량으로 정의한다. 이러한 가정 하에서 연구된 결과들은 모두 선택된 사용자들이 서로 다른 통신 어플리케이션을 사용하거나, 네트워크 트래픽 환경이 서로 다른 상황에서의 적용이 어렵게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 링크 계층에서 발생하는 큐잉(queueing) 지연으로 인해 발생하는 지연 아웃티지 확률을 수학적으로 분석하고 이를 고려한 새로운 성능 지표인 유

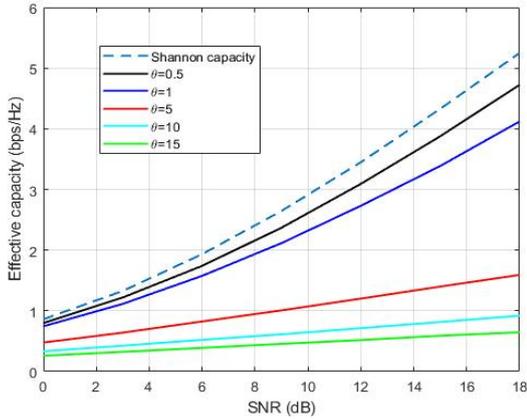


그림 2. 서로 다른 지연 제한 조건을 갖는 상황에서 신호 대 잡음비에 따른 유효용량  
 Fig. 2. Effective capacity with regard to SNR under different delay constraints

효용량이 정의되었다<sup>[4]</sup>. 대편차 이론에 따르면, 버퍼에서 발생하는 아웃티지 확률은 근사적으로 다음과 같이 정의된다.

$$\Pr(Q \geq q_{\max}) \approx 1 - e^{-\theta q_{\max}} \quad (5)$$

Q는 송신단의 정상 상태 (steady state)의 큐 길이를 의미하며  $q_{\max}$ 는 지연 임계점이다. 유효용량은 지연 지수  $\theta$ 로 표현되는 통계적 지연 요구조건을 만족하기 위해 특정 통신 서비스가 제공해야 하는 최대 데이터 전송 속도를 의미한다. 블록 페이딩 채널에서 한 페이딩 블록의 길이를  $T_f$ 라고 할 때  $i$ 번째 사용자의 유효용량은 다음과 같이 정의된다<sup>[4]</sup>.

$$EC(\theta_i, p_i) = -\frac{1}{\theta_i T_f} \log \mathbb{E}_\gamma [e^{-\theta_i T_f R_i}] \quad (6)$$

$\theta_i$ 는  $i$ 번째 사용자의 지연 지수이다. 지연 지수가 0이면 링크 계층에서 발생하는 지연 아웃티지 확률이 0이라는 의미이며 사는 용량과 유효용량이 같은 값이 된다. 그림 1은 지연 제한 조건을 고려한 다중사용자 다중입출력 하향링크 시스템 모델을 나타낸 것이며 그림 2는 서로 다른 지연 지수를 갖는 상황에서 유효용량과 사는 용량의 차이를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 선택된 각 사용자들이 서로 다른 지연 제한 조건을 갖는 상황을 가정하며 이는 선택된 각 사용자들이 서로 다른 지연 지수를 갖는 것으로 모델링이 가능하다<sup>[10]</sup>. 이 경우, 전체 통신 시스템의 유효용량 값,  $EC_{\text{tot}}$

은 총  $K$ 명의 사용자들의 유효용량 값의 합으로 표현이 가능하다.

$$EC_{\text{tot}} = \sum_{n=1}^K EC(\theta_n, p_n) \quad (7)$$

### 2.2 유효 에너지 효율성 (Effective energy efficiency)

무선 통신 시스템의 고전적인 에너지 효율성 (energy efficiency : EE)은 ‘사는 용량/전력 소모량’으로 정의된다<sup>[11]</sup>. 다중사용자 다중입출력 시스템에서는 ‘사용자들의 사는 용량의 합/사용자들의 전력 소모량의 합’으로 정의되며 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$EE = \frac{\sum_{n=1}^K R_n}{\alpha \sum_{n=1}^K p_n + N_t P_{BS} + K P_{user}} \quad (8)$$

$P_{BS}$ 와  $P_{user}$ 는 각각 기지국과 사용자의 RF (radio frequency) 체인과 각종 구성 회로에서 소모되는 회로 전력 소모량의 합을 나타낸 것이며<sup>[12]</sup>,  $\alpha$ 는 기지국의 전력 증폭기 (power amplifier: PA)의 효율성을 의미한다. 기존에 진행된 다중사용자 다중입출력 하향링크에서 에너지 효율성과 관련된 연구에서는 식 (8)의 지표가 활용되었으나, 링크 계층의 지연 제한 조건을 고려한 상황에서는 식 (8)에서 분자의 사는 용량 대신 유효용량을 대입한 다음과 같은 유효 에너지 효율성 (effective-EE),  $\eta$ 를 고려한다.

$$\eta = \frac{\sum_{n=1}^K EC(\theta_n, p_n)}{\alpha \sum_{n=1}^K p_n + N_t P_{BS} + K P_{user}} \quad (9)$$

이 때 사는 용량과 유효용량과의 관계와 마찬가지로, 지연 지수  $\theta$ 가 0일 때 식 (9)의 유효 에너지 효율성은 식 (8)의 고전적인 에너지 효율성 값과 유사해진다.

### III. 최적의 전력 할당 알고리즘

본 장에서는 사용자별 지연 제한 조건을 고려한 다중사용자 다중입출력 시스템에서 두 가지 전력 할당 기법을 제안한다. 먼저 주파수 효율성 향상을 위해 식 (7)의 유효용량의 최대화를 위한 전력 할당 기법을 제

안하고, 다음으로 식 (9)의 유효 에너지 효율성 최대화를 위한 전력 할당 기법을 제안한다.

3.1 주파수 효율성 향상을 위한 전력 할당 기법

사용자별 지연 제한 조건을 고려한 주파수 효율적 전력 할당 기법을 제안하기 위하여 아래와 같은 최적화 문제를 설정한다.

$$\max_{\mathbf{p}} EC_{\text{tot}} \quad (10)$$

$$\text{subject to } EC(\theta_n, p_n) \geq \Omega_{thr} \quad \forall n, \quad (11)$$

$$\sum_{n=1}^K p_n = P_{\text{max}} \quad (12)$$

여기에서  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_K]^T$ 이다. 제한 조건 (11)에서  $\Omega_{thr}$ 는 각 사용자들이 적절한 통신 서비스를 제공받기 위해 최소한으로 확보해야 하는 유효용량 값을 의미하며, 따라서 (12)는 사용자별 QoS를 만족시키기 위한 조건이다. 제한 조건 (12)에서  $P_{\text{max}}$ 는 기지국에서 사용 가능한 최대의 송신 전력을 의미하며 따라서 (12)는 송신 전력 합에 대한 조건이다. 제한 조건 (11)을 간단화하기 위하여 사용자별로  $\Omega_{thr}$ 의 유효용량 값을 갖기 위한 최소 요구 송신 전력값  $p_n^{thr}$ 을 계산하면 다음과 같다.

$$p_n^{thr} = \arg \min_x \left| \int_0^1 F(t, x) dx - x(\theta_n T_f)^2 \Omega_{thr} \right| \quad (13)$$

식 (13)에서  $F(t, x)$ 은 다음과 같다.

$$F(t, x) = t^{-\frac{1}{\theta_n T_f}} f_{\gamma} \left( x^{-1} t^{-\frac{1}{\theta_n T_f}} - x^{-1} \right) \quad (14)$$

여기에서  $f_{\gamma}(\cdot)$ 는 유효 채널 이득  $\gamma$ 의 확률 밀도 함수 (probability density function: PDF)이다.  $f_{\gamma}(\cdot)$ 의 closed-form 수식은 알려져 있지 않으므로  $p_n^{thr}$ 은 bisection 방법과 같은 수치 해석적 방법 (numerical method)으로 구해야 한다. 총  $K$ 명의 사용자에 대해 각각  $p_n^{thr}$  값을 구하고  $\mathbf{p}_n^{thr} = [p_1^{thr}, p_2^{thr}, \dots, p_K^{thr}]^T$ 이라 하면 최적화 문제 (10)과 제한조건 (11), (12)는 다음과 같이 재

설정할 수 있다.

$$\max_{\tilde{\mathbf{p}}} EC_{\text{tot}} \quad (15)$$

$$\text{subject to } \tilde{p}_n \geq 0 \quad \forall n, \quad (16)$$

$$\sum_{n=1}^K \tilde{p}_n = P_{\text{max}} - \sum_{n=1}^K p_n^{thr} \quad (17)$$

이 때  $\tilde{p}_n$ 은  $n$ 번째 사용자에게  $p_n^{thr}$ 을 할당하고 주파수 효율성 향상을 위해 추가적으로 할당하는 전력량을 의미한다. 본 연구에서는 기지국이 충분한 송신 전력을 사용할 수 있고 적절한  $K$ 값을 선택할 수 있다고 가정하면  $P_{\text{max}} - \sum_{n=1}^K p_n^{thr} \geq 0$ 이다. 즉, 선택된 모든 사용자들에게 QoS보장을 하지 못하는 상황은 고려하지 않는다. 한편 유효용량은 할당되는 전력에 대해 볼록함수임이 알려져 있다<sup>[13]</sup>. 따라서 (15)의 최적화 문제를 풀기 위해 라그랑지안  $L_1(\tilde{\mathbf{p}}_n, \omega_n, \nu)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$L_1(\tilde{\mathbf{p}}_n, \omega_n, \nu) = \sum_{n=1}^K EC(\theta_n, p_n^{thr} + \tilde{p}_n) + \sum_{n=1}^K \omega_n \tilde{p}_n + \nu \left( \sum_{n=1}^K \tilde{p}_n + \sum_{n=1}^K p_n^{thr} - P_{\text{max}} \right) \quad (18)$$

유효용량이 할당 전력에 대해 볼록함수임으로 잘 알려진 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 조건을 적용하면 최적화 문제의 해법을 찾을 수 있다. 해법은 잘 알려진 water-filling 기법과 유사하다. Water-level의 계산을 위해 새로운 함수  $g_n(\nu)$ 를 정의한다.

$$g_n(\nu) = \arg \min_x \left| \frac{\mathbb{E}_{\gamma} [\gamma V(\gamma, \tilde{p}_n)^{-B-1}]}{\mathbb{E}_{\gamma} [V(\gamma, \tilde{p}_n)^{-B}]} + \nu \ln 2 \right| \quad (19)$$

이 때  $\tilde{p}_n^* = g_n(\nu)$ 이며 전체 전력과 관련된 제한 조건을 만족시키기 위해  $\sum_{n=1}^N g_n(\nu) = P_{\text{max}} - \sum_{n=1}^K p_n^{thr}$ 이 성립해야 한다.  $N$ 은 추가 전력을 할당받는 사용자의 숫자를 의미하며, 이 때  $G_N(\nu) = \sum_{n=1}^N g_n(\nu)$ 으로 정의하면 water-level 계산을 위한  $\nu$ 값을 구할 수 있다.

### 3.2 에너지 효율성 향상을 위한 전력 할당 기법

사용자별 지연 제한 조건을 고려한 에너지 효율적 전력 할당 기법을 구하기 위하여 다음과 같은 최적화 문제를 설정한다.

$$\max_{\mathbf{p}} \frac{EC_{\text{tot}}}{\alpha \sum_{n=1}^K p_n + N_t P_{BS} + K P_{user}} \quad (20)$$

$$\text{subject to } EC(\theta_n, p_n) \geq \Omega_{thr} \quad \forall n, \quad (21)$$

$$\sum_{n=1}^K p_n = P_{\max} \quad (22)$$

유효용량과 달리 식 (9)의 유효 에너지 효율성은 할당 전력에 대해 볼록함수가 아니다. 그러나 유효 에너지 효율성은 분수 형태로, 분자인 유효용량은 미분 가능한 볼록함수, 분모인 전력 소모량은 선형 함수이므로 잘 알려진 볼록-오목 분수 문제 (concave-convex fractional problem)로 미분해서 0이 되는 지점, 즉 stationary point가 global optimum을 보장한다<sup>[14]</sup>. 따라서 (15), (16), (17)과 마찬가지로 해법을 구할 수 있으므로  $K$ 명의 사용자들에 대해 각각  $p_n^{thr}$ 을 구하고 (20)의 최적화 문제를 재설정하면 다음과 같다.

$$\max_{\tilde{\mathbf{p}}} \frac{\sum_{n=1}^K EC(\theta_n, p_n^{thr} + \tilde{p}_n)}{\alpha \sum_{n=1}^K (p_n^{thr} + \tilde{p}_n) + N_t P_{BS} + K P_{user}} \quad (23)$$

$$\text{subject to } \tilde{p}_n \geq 0 \quad \forall n, \quad (24)$$

$$\sum_{n=1}^K \tilde{p}_n \leq P_{\max} - \sum_{n=1}^K p_n^{thr} \quad (25)$$

새로운 라그랑지안  $L_2(\tilde{\mathbf{p}}_n, \lambda_n, \mu)$ 은 아래처럼 정의된다.

$$L_2(\tilde{\mathbf{p}}_n, \lambda_n, \mu) = \eta + \sum_{n=1}^K \lambda_n \tilde{p}_n + \mu \left( \sum_{n=1}^K \tilde{p}_n + \sum_{n=1}^K p_n^{thr} - P_{\max} \right) \quad (26)$$

위 문제에 KKT 조건을 적용하기 위하여 먼저  $\frac{\partial \eta}{\partial p_n} = 0$ 을 풀면 다음과 같다.

$$A \mathbb{E}_{\gamma} [V(\gamma, \tilde{p}_n)^{-B}] = \mathbb{E}_{\gamma} [\gamma V(\gamma, \tilde{p}_n)^{-B-1}] \quad (27)$$

$A = \alpha \eta \ln 2$ ,  $B = \theta_n T_f$ ,  $V(\gamma, \tilde{p}_n) = 1 + \gamma(p_n^{thr} + \tilde{p}_n)$ 이다. 이 때 KKT 조건을 적용하면,  $\left. \frac{\partial \eta}{\partial p_m} \right|_{\tilde{p}_m=0} < 0$ 인  $m$ 번째 사용자에 한해서  $p_m^* = p_m^{thr}$ 을 할당하는 것이 최적의 해법이다. 선택된 전체 사용자 집합을  $\mathbb{K}$ 라 하고  $\left. \frac{\partial \eta}{\partial p_m} \right|_{\tilde{p}_m=0} < 0$ 을 만족하는 사용자 집합을  $\mathbb{Y}$ , 나머지 추가 전력을 할당 받을 사용자 집합을  $\mathbb{S}$ 라 하면 최적의 전력 할당 방법은 다음과 같다.

$$p_n^* = \begin{cases} \arg \min_x |J(x)| & \text{for } n \in \mathbb{S} \\ 0 & \text{for } n \in \mathbb{Y} \end{cases} \quad (28)$$

여기에서 새로 정의된 함수  $J(x)$ 는 다음과 같다.

$$J(x) = A \mathbb{E}_{\gamma} [V(\gamma, x)^{-B}] - \mathbb{E}_{\gamma} [\gamma V(\gamma, x)^{-B-1}] \quad (29)$$

집합  $\mathbb{Y}$ 의 크기를  $M$ 이라 하면, 유효 에너지 효율성  $\eta$ 가 모든  $\tilde{p}_n$ 에 대한 함수이므로 식 (28)의 해답을 얻기 위해서는 총  $K - M$ 개의 연립방정식을 풀어야 한다. 모든  $n$ 에 대하여  $p_n^*$ 을 모두 계산한 다음  $p_n^* = \tilde{p}_n^* + p_n^{thr}$ 로 정의하면, 이 때 나온 최적 해법과 전체 전력량과의 관계에서 두 가지 경우로 나눌 수 있다.

$$3.2.1 \quad P_{\max} > \sum_{n=1}^K \tilde{p}_n^* + \sum_{n=1}^K p_n^{thr} \text{인 경우}$$

이 경우 구해진 최적의 전력 할당량의 합이 전체 사용 가능한 전력량보다 적으므로, 구해진 해답이 유효하며 실제 최적화 문제에서 전체 전력 할당량에 관련된 제한조건 (25)는 이 경우에 전력 할당량 결정에 영향을 주지 않는다. 일반적으로 주파수 효율적 시스템에서는 전체 전력을 모두 활용하는 것이 유리하나, 에너지 효율적 시스템에서는 상황에 따라 사용 가능

한 모든 전력을 활용하는 것이 해답이 되지 않을 수 있다.

$$3.2.2 \ P_{\max} \leq \sum_{n=1}^K \tilde{p}_n^* + \sum_{n=1}^K p_n^{thr} \text{인 경우}$$

위 경우는 최적의 전력 할당량이 전체 사용 가능한 전력량보다 많은 경우로, 일반적으로 송신 속도 향상 대비 전력 소모량이 적은 경우에 해당된다.

즉 주파수 효율적 시스템과 유사하게 사용 가능한 전력을 모두 사용하여 최대한 송신 속도를 올리는 것이 에너지 효율적 측면에서도 유리한 상황이다. 이 경우, 사용 가능한 모든 전력을 활용하는 것이 유리하므로 (25)의 조건이  $\sum_{n=1}^K \tilde{p}_n^* = P_{\max} - \sum_{n=1}^K p_n^{thr}$ 의 등호 조건으로 바뀌어야 한다. 그렇게 되면 최적화 문제 (23)

은 (15)의 문제와 동일한 문제가 된다. 즉, 사용할 전체 전력이 정해지면, 문제 (23)의 목적 함수에 해당되는 유효 에너지 효율성 식에서 분모가 고정되므로, 분자인 유효용량을 최대화하는 문제로 바뀌는 것이다. 이 경우는 III장 1절의 해답과 같게 된다. 두 가지 상황을 모두 고려한 전력 할당 알고리즘을 요약하면 그림 3과 같다.

#### IV. 모의 실험 결과

본 장에서는 장에서 제안된 알고리즘이 사용자별 지연제한 조건이 있는 상황에서 통신 시스템의 주파수 효율성 및 에너지 효율성을 개선할 수 있다는 것을 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 검증한다.  $\Omega_{thr} = 1$ ,  $T_f = 1$ 으로 각각 가정하고, 전력 소모 모델 파라미터 값들은 참조 논문의 값을 사용한다[12]. 이 값들은 유효 에너지 효율성 값에는 영향을 주지만, 본 논문에서 제안하는 전력 할당 알고리즘에는 영향을 주지 않는다.

그림 4는 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio : SNR)에 따른 유효용량 값을 나타낸 것으로, 제안하는 알고리즘을 적용할 시 사용자별로 균등하게 전력을 할당하는 것보다 더 좋은 유효용량 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 그림 5는 유효용량을 송신 안테나 개수에 따라 나타낸 것으로 low  $\theta$ 그룹은 (0,10]의 균등 분포, high  $\theta$ 그룹은 (0,100]의 균등 분포를 가정하였다. 그림 4와 마찬가지로 기법의 성능이 더 높다는 것을 확인할 수 있다.

그림 6에서 8은 에너지 효율적 전력 할당 기법을 적용한 것을 나타낸 것이다. 먼저 그림 6은 서로 다른

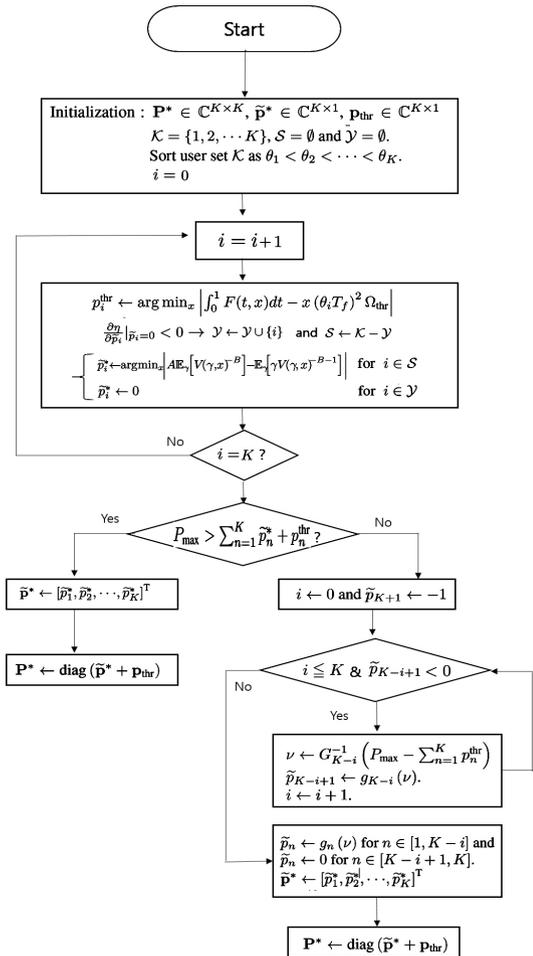


그림 3. 제안하는 유효 에너지 효율성 최대화 알고리즘  
Fig. 3. Proposed algorithm for maximizing effective-EE

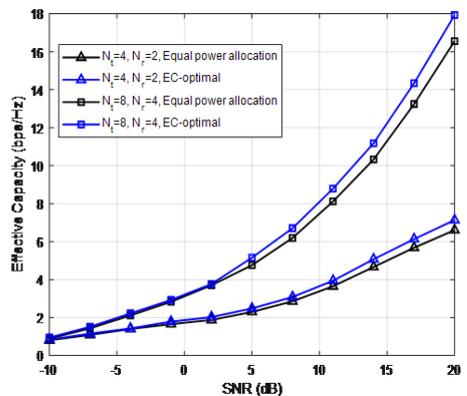


그림 4. 서로 다른  $N_t$ 와  $N_r$  값을 가질 때 신호 대 잡음비에 따른 유효용량 비교  
Fig. 4. Effective capacity with regard to SNR for different value of  $N_t$  and  $N_r$

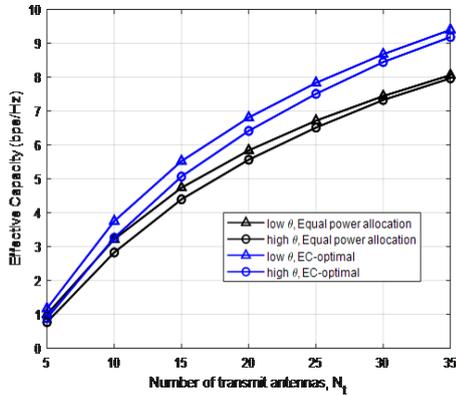


그림 5. 서로 다른  $\theta$  값을 가질 때  $N_t$  값에 따른 유효용량  
Fig. 5. Effective capacity with regard to  $N_t$  for different value of  $\theta$

송신 안테나를 갖는 기지국에 대해 기지국의 최대 송신 전력인  $P_{max}$  에 따른 유효 에너지 효율성을 나타낸 것이다.  $\theta = [10, 20, 30, 40]$  이고  $K=4$ 이다. 제안하는 전력 할당 기법이 균등 할당 기법 및 유효용량 최대화 기법보다 더 좋은 유효 에너지 효율성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 특히 기지국에서 사용 가능한 전력량이 큰 경우에 유효 에너지 효율성을 최대화하는 전력 할당 기법을 적용하면 필요 이상의 전력은 사용하지 않게 되면서 일정 수준의 유효 에너지 효율성 값을 유지하지만, 다른 두 기법의 경우에는 남은 전력을 계속해서 사용자들에게 할당하여 유효 에너지 효율성 측면에서 성능 열화가 발생하게 됨을 확인할 수 있다.

그림 7에서는 송신 안테나 개수에 따른 유효 에너지 효율성을 나타낸 것으로, 제안하는 기법이 유효 에

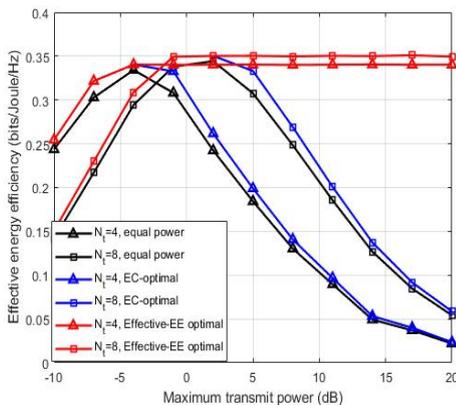


그림 6. 기지국에서 사용 가능한 최대 송신 전력  $P_{max}$  에 따른 유효 에너지 효율성  
Fig. 6. Effective-EE with regard to the maximum transmission power available at the BS,  $P_{max}$

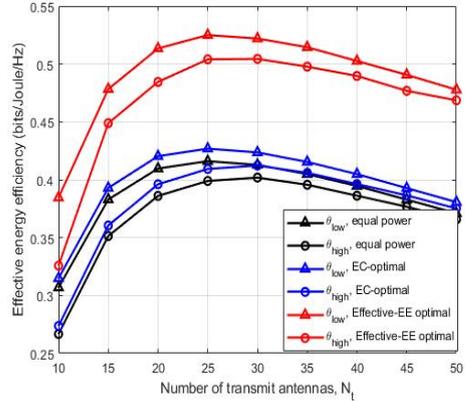


그림 7. 서로 다른  $\theta$  값을 가질 때 일 때 송신안테나 개수  $N_t$ 에 따른 유효에너지 효율성  
Fig. 7. Effective-EE with regard to the  $N_t$  for different value of  $\theta$

너지 효율성 측면에서 균등 할당 기법 및 유효용량 최대화 기법보다 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.  $P_{max} = 10dB$ ,  $K=4$ 로 가정한다. 시뮬레이션은 서로 다른 두 사용자 그룹에 대해 수행하였으며, 각 사용자 그룹은 전반적으로 높은 자연 제한 조건을 갖는 그룹과 ( $\theta_{high} = [1, 11, 21, 31]$ ), 낮은 자연 제한 조건을 갖는 그룹 ( $\theta_{low} = [1, 2, 3, 4]$ )으로 구별된다. 송신 안테나 개수가 증가하면 유효용량은 증가하지만, 전력 소모량도 함께 증가하게 되므로 유효 에너지 효율성 측면에서 최적의 안테나 개수가 정해지게 된다. 이 때 어떤 전력 할당 기법을 적용하느냐에 따라서 최적의 안테나 개수도 달라지는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 동시에 신호를 받는 사용자의 숫자가 다르고 사용자 그룹의 자연 지수  $\theta$ 의 값이 다를 때 균등 할당 기법과 제안하는 전력 할당 기법 사이의 유효 에너지 효율성 성능을 비교한 것이다.  $N_t = 16$ 이고  $P_{max} = 10dB$ 이다. 가로축은  $\theta_{max}$  값으로, 선택되는 사용자들의 분포는  $(0, \theta_{max}]$ 의 균등 분포를 가정하였다.의 값이 작을 때 제안하는 전력 할당 기법이 가지는 성능 이득이 더 크게 나타난다. 사용자별 자연 제한 조건이 까다로운 시스템에서는 균등 할당 기법과 제안하는 기법 사이의 에너지 효율성 차이가 작게 나타나는데 이는 사용자별 자연 제한 조건을 만족하기 위해 미리 할당되어 버리는 전력량이 커서, 에너지 효율성을 향상시키기 위해 활용될 수 있는 전력량이 제한되기 때문이다. 즉 본 논문에서 제안하는 에너지 효율적 전력 할당 기법은 사용자별 자연 제한 조건이 상대적으로 덜 까다로운 시스템에서 더 좋은 효율을 보임

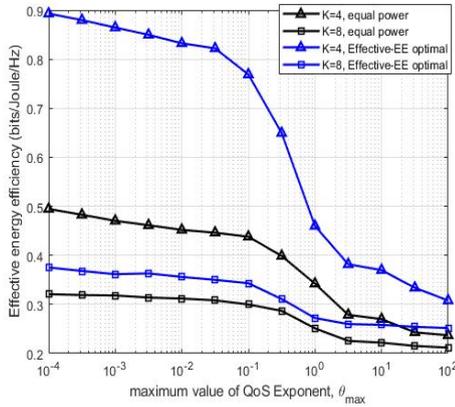


그림 8. 서로 다른 K값을 가질 때  $\theta_{max}$  값에 따른 유효 에너지 효율성  
 Fig. 8. Effective-EE with regard to the  $\theta_{max}$  for different value of K

을 알 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 다중사용자 다중입출력 하향링크 시스템에서 사용자별 통계적 지연 제한 조건을 고려하여 주파수 효율성 및 에너지 효율성을 향상시킬 수 있는 전력 할당 기법을 제안하였다. 먼저 사용자별 지연 제한 조건을 고려하기 위해 링크 계층의 지연 아웃티지 확률을 감안한 유효용량의 개념을 도입하여 유효용량과 유효 에너지 효율성을 목적 함수로 하는 최적화 문제를 설정하였다. 각 최적화 문제의 제한 조건은 사용자별 지연 제한 조건을 고려한 최소 유효용량 조건 및 최대 사용 가능한 송신 전력량으로 설정하였다. 유효용량이 할당 전력에 대해 볼록함수이고 유효 에너지 효율성이 볼록-오목 분수 문제임을 이용하여 두 최적화 문제를 풀고 전력 할당 알고리즘을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 알고리즘은 다중사용자 다중입출력 하향링크 시스템에서 기지국이 사용자별로 서로 다른 전력을 할당할 때, 물리 계층 관점 뿐 아니라 링크 계층의 큐잉 지연으로 인해 발생하는 아웃티지까지 고려한, 조금 더 효율적인 전력 할당 기법으로 활용 가능할 것으로 예상된다.

### References

[1] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to space-time wireless communications*, Stanford University, Jun.

2008.

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

[3] Y.-I. Shin, T.-S. Kang, and H.-M. Kim, "Multi-antenna subcarrier allocation using zero-forcing beamforming in MIMO-OFDM systems," *J. KICS*, vol. 32, no. 10, pp. 974-983, 2007.

[4] D. Wu and R. Negi, "Effective capacity: A wireless link model for support of quality of service," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 4, pp. 630-643, 2003.

[5] M. C. Gursoy, D. Qiao, and S. Velipasalar, "Analysis of energy efficiency in fading channels under QoS constraints," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 8, pp. 4252-4263, 2009.

[6] L. Musavian and T. L.-Ngoc, "Energy-efficient power allocation for delay-constrained systems," in *Proc. IEEE Globecom*, Anaheim, CA, USA, Dec. 2012.

[7] D. Qiao, "The impact of statistical delay constraints on the energy efficiency in fading channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 2, pp. 994-1007, 2016.

[8] B. Liu, L. Qiu, and J. Xu, "QoS aware energy efficiency analysis in the cellular networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E94-B, no. 10, pp. 2925-2928, Oct. 2011.

[9] L. Musavian and Q. Ni, "Effective capacity maximization with statistical delay and effective energy efficiency requirements," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 7, pp. 3824-3835, 2015.

[10] Z. Feng, G. Wen, and C. W. Chen, "Multiuser effective capacity analysis for queue length based rate maximum wireless scheduling," in *Proc. IEEE ICC*, Beijing, China, Aug. 2012.

[11] H. Kwon and T. Birdsall, "Channel capacity in bits per joule," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 97-99, 1986.

[12] H. Li, L. Song, D. Zhu, and M. Lei, "Energy

efficiency of large scale MIMO systems with transmit antenna selection,” in *Proc. IEEE ICC*, Budapest, Hungary, Jun. 2013.

- [13] D. Qiao, M. C. Gursoy, and S. Velipasalar, “Transmission strategies in multiple-access fading channels with statistical QoS constraints,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, no. 3, pp. 1578-1593, 2012.
- [14] S. Schaible, “Fractional programming,” *Zeitschrift fur Operation Res.*, vol. 27, no. 1, pp. 39-54, 1983.

고 영 채 (Young-Chai Ko)



1997년 2월 : 한양대학교 전자통신 학사

1999년 5월 : University of Minnesota, 전기공학 석사

2001년 10월 : University of Minnesota, 전기공학 박사

2001년 3월~2004년 2월 :

Texas Instruments InC., San Diego, CA USA.

2004년 2월~현재 : 고려대학교 전기전자공학부 교수

<관심분야> 통신공학, 무선통신

[ORCID:0000-0003-1043-9028]

권 재 홍 (Jae-Hong Kwon)



2014년 8월 : 고려대학교 전기전자전파공학부 학사

2014년 9월~현재 : 고려대학교 전자전자공학부 석박사통합과정

<관심분야> 통신공학, 무선통신

[ORCID:0000-0003-4934-6478]