

# 오퍼튜니스틱 다중 빔 형성 시스템의 사용자 선택에 따른 성능 향상

준회원 구미현\*, 정회원 김동우\*\*

## On Opportunistic Beamforming with Multiple-User Selection

Mihyeon Ku\* Associate Member, Dongwoo Kim\*\* Regular Member

### 요약

이 논문에서는 오퍼튜니스틱한 빔을 형성하는 시스템에서 다중 파일럿 빔을 이용해 하향링크 데이터 수율을 높이도록 사용자들을 선택하는 스케줄링 방법을 제시한다. 오퍼튜니스틱 빔 포밍 시스템에서는 사용자의 비 균일한 분포와 적은 수에 의해 하향링크로의 데이터 수율 성능이 감소할 수 있다. 이를 개선하기 위해 기존에 연구되어 온 다중 파일럿 빔을 사용하는 다른 두 가지 시스템 모델에서 SINR이 아닌, 빔포머와 각 사용자의 채널 간 이득을 이용하여 스케줄링 하는 방법을 제안한다. 제안한 방법을 통해 사용자들의 분포에 따라 유연하게 데이터를 수신할 사용자를 선택할 수 있다. 수치적 결과에서는 사용자들의 분포가 비 균일하고 수가 적은 경우에, 사용자들로부터 피드백 받은 SINR 또는 SNR로부터 효율적인 채널 이득을 사용하여 스케줄링을 하는 것과 피드백 받은 SINR만으로 데이터를 수신 할 사용자들을 선택한 경우와 비교하여 제안한 방법에서 60%가량 향상된 데이터 수율 결과를 얻을 수 있음을 보여준다.

**Key Words** : Opportunistic beamforming, Dumb antenna, User selection

### ABSTRACT

In this paper, we propose a user selection method to maximize the sum-rate of downlink over opportunistic beamforming. The throughput of an opportunistic beamforming with non-uniformly distributed or a small number of users can decrease. In order to improve the throughput, we propose a scheduling method that does not use SINR or SNR but uses the effective channel gain of each user obtained from the SINR or SNR feedback. The proposed method makes it possible to select users flexibly according to the distribution of users. In numerical results, we show that the proposed methods improve the average sum-rate about 60% when users are distributed non uniformly.

### I. 서론

동시에 다수 사용자들에게 데이터를 전송하기 위한 공간 분할 다중 접속 기술은 시스템의 하향링크

성능을 향상시키기 위해 사용자들의 효율적인 스케줄링을 돕는 방법으로서 제안되어져 왔다<sup>[1],[2]</sup>. 지구국은 송신 안테나들을 이용해서 셀의 특정한 공간에 빔을 발생시켜 사용자의 데이터 수율 성능을 최

\* 본 연구는 2007년도 2단계 두뇌한국21 사업에 의해 지원되었습니다.

\* 한양대학교 전자전기 제어계측공학과 이동통신망연구실 (mihyeon@wnl.hanyang.ac.kr),

\*\* 한양대학교 전자컴퓨터공학부 부교수 (dkim@hanyang.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-10-470, 접수일자 : 2007년 10월 16일, 최종논문접수일자 : 2008년 1월 15일

대화 할 수 있다. 이 때 사용자를 채널 상태가 좋은 한명 이상의 사용자를 선택하여, 이들에게 동시에 빔 포밍으로 데이터를 전송함으로써, 공간 분할 다중 접속 방법을 통한 각 사용자들의 데이터 수율 합 성능을 향상시킬 수 있다.

기지국에서 사용자들의 채널에 대한 완벽한 정보를 갖는 smart 안테나를 사용한다고 가정하는 시스템에서는 송신 단에서 주어진 채널에 이상적인 빔을 형성할 수 있는 preprocessor, 또는 빔 가중치 벡터 (beamformer)를 구할 수 있다. 하지만, 채널에 대한 완벽한 정보 (perfect CSIT)를 갖는 빔 포밍 시스템이 되기 위해서는 채널에 대한 많은 양의 데이터를 사용자들로부터 피드 백 받아야 한다. 이로 인해 피드 백 오버헤드가 높아지고, 스케줄링을 위한 복잡도가 증가 한다. 반면에, dumb 안테나를 갖는 오퍼튜니스틱 빔 포밍 또는 랜덤 빔 포밍 기술은 기지국이 채널에 대한 부분 정보 (partial CSIT)만을 순시 적으로 피드 백 받아 이용하기 때문에 완벽한 채널 정보를 갖고 빔 포밍하는 시스템에 비해 성능은 다소 낮을 수 있다. 그러나 채널에 대한 부분 정보만을 피드백 받기 때문에 시스템 자원의 낭비가 없고, 피드백 오버헤드가 늘어나는 단점이 없다. 또한 순시적인 채널의 변화를 고려하기 때문에 이를 이용하는 스케줄링을 통해 완벽한 채널 정보를 알지 못함으로 인한 데이터 수율 성능 감소를 상당히 개선시키는 이득을 얻는다<sup>[1]</sup>.

오퍼튜니스틱 빔 포밍 시스템은 순시적인 채널의 상태를 피드백 받아 스케줄링에 이용하기 때문에 사용자들의 이동성에 따라 달라지는 순시적인 채널의 변화에 성능이 결정된다. 따라서 기지국에서 다중 안테나를 사용하여 의도적으로 더 크고 빠르게 채널의 변화가 일어나도록 한다. 채널 변화가 느리고 작게 변동하면 낮은 채널에 대한 이득을 피드백 하는 사용자들에 대한 스케줄링이 성능향상을 위한 사용자 차별화(Multiuser diversity)의 이득을 얻을 수 없기 때문이다.

사용자들을 차별화 하는 스케줄링을 하는 시스템에서는 특정 사용자들이 계속해서 좋은 채널의 상태를 가질 가능성이 크다. 이로 인해 여러 사용자들이 기지국과 통신할 모든 동등한 기회를 갖지 못한다. 따라서 본 논문에서는 proportional fairness scheduling을 한다고 가정한다. 즉 어떤 사용자 $k$ 가 과거 시간 윈도우 동안 평균 데이터 수율  $T_k(t)$ 과 시간슬롯  $t$ 에서의 데이터 전송률  $R_k(t)$ 의 비  $\frac{R_k(t)}{T_k(t)}$

가 큰 사용자에게 데이터를 전송하는 것이다<sup>[4][6]</sup>. 그리고 본 논문에서는 과거 시간 윈도우  $t_0$ 가  $\infty$ 이라고 가정한다.

사용자 차별화와 proportional fairness 스케줄링을 통해 오퍼튜니스틱 빔 포밍 시스템의 성능을 상당히 개선할 수 있으나, 셀 내에 적은 수의 사용자들이 있을 때나 셀의 특정 부분에 사용자들이 밀집한 경우, 랜덤하게 발생한 한 파일럿 빔 위치에 사용자가 없어서 스케줄링을 했음에도 불구하고 데이터 수율 성능에 감소가 발생할 수 있다. 이를 개선하기 위해 다중 랜덤 빔 포밍 시스템이 연구되어 왔다. 이 논문에서는 이중 두 가지 모델을 채택하여 스케줄링 과정을 보였다. 첫 번째 채택한 모델은 타임 슬롯의 한 미니 슬롯에 직교하는 안테나 위상을 갖는 다중 파일럿 빔을 동시에 발생시키는 방법이다<sup>[2]</sup>. 그리고 두 번째 보이는 모델은 한 미니 슬롯에 한 위상에 대한 빔을 발생하되 다수 미니 슬롯을 이용하여 동시에 발생하지 않는 다중 파일럿 빔 포밍을 발생하는 방법이다<sup>[7][8]</sup>.

기존에 다중 오퍼튜니스틱 빔 포밍 시스템에 대한 많은 스케줄링들이 제안되어 왔다. 이들 연구에서는 스케줄링이 기지국이 사용자들로부터 수신 SINR을 피드 백 받아 활용 했다<sup>[2]</sup>. 그러나 피드 백 SINR을 이용한 스케줄링은 안테나와 사용자 간 채널의 상태를 세밀하게 반영하기 어렵다. 왜냐하면 SINR은 동시에 동작되는 다른 사용자들로부터 발생하는 간섭 영향이 고려된 변수이기 때문이다. 또한, SINR에 의한 스케줄링은 데이터를 전송하기 위해 동시에 발생하는 빔의 수가 고정됨을 의미한다. 사용자들의 분포에 따라 성능이 민감한 오퍼튜니스틱 시스템의 특성상, 사용자가 비 균일하게 분포한 경우에도 정해진 수의 사용자들을 선택해야 하는 것은 데이터 수율 성능을 감소시킨다.

따라서 본 논문에서 채택한 두 가지 오퍼튜니스틱한 다중 빔 포밍 방법에서는 수신 SINR 또는 SNR로부터 유효한 채널 이득을 스케줄링에 활용하도록 제안한다. 첫 번째 모델은 셀 내 모든 사용자들에게 다중 랜덤 파일럿 빔을 발생하여 이에 대해 피드 백 받은 SINR로부터 채널 이득을 구한다. 그리고 데이터 수율이 최대가 되는 사용자들의 집합 얻을 수 있도록 SINR을 재조합한다. 두 번째 모델에서는 셀의 전체 위상을 균등하게 나누어 모든 위상으로 순차적으로 파일럿 빔을 발생시킨다. 기지국은 모든 빔 포밍 위상에 대해 사용자들에게 피드 백 받은 SNR로부터 유효한 채널 이득을 구하여 사

용자 위상을 추정하는데 활용한다<sup>[7]</sup>. 그리고 추정된 사용자들의 위상이 서로 직교하면서 그 위상으로 빔을 형성시켰을 때 데이터 수율이 최대가 되도록 사용자 선택을 한다.

두 과정 모두 SINR을 재조합할 수 있어, 상황에 따라 사용할 전송 안테나 수나, 데이터를 전송하기 위해 선택하는 사용자 수를 유연하게 조정하여 데이터 수율 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 두 가지 다중 빔 형성 패턴을 갖는 오퍼튜니스틱 빔 포밍 시스템이 빔 위상에 대한 채널 이득을 몇 명의, 어떤 사용자에게 데이터를 전송할지를 스케줄링 하는데 활용하는 것을 보일 것이다. 그리고 시물레이션으로 적은 수 또는 균일하지 않은 사용자들의 분포가 제안한 스케줄링을 통해 향상됨을 수치적 결과로서 보일 것이다.

## II. 시스템 모델

### 2.1 오퍼튜니스틱 빔 포밍

하나의 수신 안테나를 갖는  $K$ 명의 사용자와  $N_T$ 개의 송신 안테나를 갖는 하나의 기지국이 한 셀 내에 존재한다고 가정한다. 시간 슬롯  $t$ 에서 임의의 사용자  $k$ 와 송신 안테나  $n$  사이의 채널은 라이시안 flat 페이딩 채널로서, 다음과 같이 모델 한다<sup>[7]</sup>.

$$h_{n,k}(t) = \sqrt{\frac{K_k}{1+K_k}} \exp(jn\theta_k) + \sqrt{\frac{1}{1+K_k}} b_{nk}(t), \quad (1)$$

여기서  $\theta_k$  는 사용자  $k$ 의 도래각 (DOA: direction of arrival)이라고 정의하며,  $K_k$ 는 라이시안 K-factor이다. 그리고  $b_{nk}(t)$ 는 채널의 페이딩 성분을 나타내며 평균이 0이고, 분산이 1인 복소 가우시안 랜덤 변수로서 모델링한다. 따라서 시간 슬롯  $t$ 에서 임의의 사용자  $k$ 와 기지국 사이의 물리적 채널은  $\mathbf{h}_k(t) = [h_{1,k}(t), h_{2,k}(t), \dots, h_{n,k}(t), \dots, h_{N_T,k}(t)]^T$  벡터로 나타낼 수 있다. 수신 단은 완벽한 채널  $\mathbf{h}_k(t)$  (perfect CSIR) 을 알고 있다고 가정한다.

시간 슬롯의 시작 부분에는 미니 슬롯이 존재하며, 이 동안에는 빔의 방향을 결정하는 임의의 빔 가중치 벡터  $\mathbf{w}(t) = [w_1(t), \dots, w_n(t), \dots, w_{N_T}(t)]^T$ 와 수신 단에서도 미리 정보를 알고 있는 파일럿 신호  $s_p(t)$ 의 곱이 셀 전체에 방송된다. 빔 가중치 벡터 즉, 빔 포머의 각 원소들은 다음과 같이 주어진다.

$$w_n(t) = \sqrt{\alpha_n(t)} \exp(j\phi_n(t)), \quad n=1,2,\dots,N_T, \quad (2)$$

여기서  $\phi_n(t)$ 는  $[0,2\pi]$ 사이의 값으로서, 송신 안테나  $n$ 에 랜덤하게 가해지는 인위적인 위상 변화이며,  $\alpha_n(t)$ 은  $[0,1]$ 사이의 랜덤한 값으로서, 송신 안테나  $n$ 에 할당되는 송신 전력의 크기 비를 나타낸다. 따라서  $N_T$ 개 안테나들의 총 송신 전력비의 합은 1이 된다.  $\sum_{n=1}^{N_T} \alpha_n(t) = 1$ . 그러나 우리는 파일럿 빔 포밍에서 안테나 간 송신 전력의 크기를 균등한 비로 함을 가정한다.

안테나  $n$ 으로부터 사용자  $k$  사이에 발생한 채널 이득 전력  $\mathbf{H}_{n,k}^p$ 은  $|\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_n|^2$ 으로 주어지며, 기지국은 상향링크를 통해 사용자들로부터 피드 백 받은 정보들에서 이를 측정하여 채널의 상태를 예측하고 스케줄링에 이용한다.

임의의 사용자  $k$ 가 파일럿 빔을 수신한 신호는 다음과 같다.

$$y_k = \sum_n \mathbf{h}_k^H(t) \mathbf{w}_n(t) s_p(t) + n_k(t), \quad (3)$$

여기서  $n_k(t)$ 는 평균 0, 분산 값  $N_0$ 를 갖는 i.i.d. (independent identically distributed) 복소 가우시안 랜덤 잡음이다.

### 2.2 수신 SINR 과 데이터 수율 합

다음 섹션에서 제안된 스케줄링을 통해 선택된 한명 이상의 사용자에게 동시에 데이터를 전송한다고 가정한다면, 시간 슬롯  $t$ 에서 전송하는 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k \in \Omega^*} \mathbf{w}_{k^*} s_{k^*}(t), \quad (4)$$

여기서  $\Omega^*$ 은 데이터 수율 합이 최대가 되도록 선택된 사용자  $k^*$ 들의 집합이다. 따라서 선택된 사용자  $k^*$ 가 시간 슬롯  $t$ 에서 수신한 신호는 다음처럼 쓸 수 있다.

$$y_{k^*}(t) = \mathbf{h}_{k^*}^H(t) \mathbf{x}(t) + n_{k^*}(t). \quad (5)$$

여기서 송신 신호의 전력  $E\{|s_{k^*}(t)|^2\} = P$ 라면, 사용자에게 수신된 신호 (4)로부터 사용자  $k^*$ 의 SINR은 다음과 같다.

$$SINR_k^* = \frac{|h_k^H w_k|^2}{\sum_{l \neq k} |h_k^H w_l|^2 + \frac{N_0}{P}} \quad (6)$$

수신 신호에 대한 SINR 식 (6)로부터 데이터 수율함에 대한 식 (7)을 시스템의 성능으로 한다.

$$I(\Omega^*) = \sum_{k \in \Omega^*} \log(1 + SINR_k^*) \quad (7)$$

우리는 데이터 수율 함 식 (7)이 최대가 되도록 하는 사용자 집합  $\Omega^*$ 를 얻는 방법들을 본 논문에서 제안한다. 파일럿을 이용한 사용자 집합을 구하는 문제를 나타내면 아래와 같다.

$$\Omega^* = \operatorname{argmax}_{\Omega \subset K} T_p(\Omega) \quad (8)$$

$T_p(\Omega)$ 는 수신된 파일럿 신호에 대한 데이터 수율 함수를 의미한다. 수신 파일럿 신호들로부터 구한 데이터 수율이 최대가 되는 사용자 집합  $\Omega^*$ 을 구할 것이다. 다중 오퍼튜니스틱 빔 포밍을 하는 시스템의 성능을 그림 1에서 살펴보면, 오퍼튜니스틱 빔 포밍 시스템에서 제안하는 스케줄링을 하는 이유를 설명할 수 있다. 그림 1에서는 셀 내에 사용자가 비 균일하게 분포할 때, 다중 오퍼튜니스틱 빔 포밍을 사용하여 데이터 수율이 최대가 되도록 한 명 이상의 사용자를 선택할 수 있도록 하면 가장 좋은 채널 상태를 갖는 한 명의 사용자를 선택할 때보다 데이터 수율 성능이 향상됨을 보여주고 있다. 또한, 안테나 간 데

이터 송신 전력 크기를 재 할당함으로써, 성능을 보다 향상시킬 수 있음을 보여준다.

### III. 다중 오퍼튜니스틱 빔 포밍

이 섹션에서는 기존에 연구되었던 다중 파일럿 빔을 발생시키는 다른 두 가지 방법을 정리한다. 그리고 이들을 이용한 스케줄링을 제안할 것이다. 첫 번째 제시한 오퍼튜니스틱 빔 포밍 시스템에서는 직교하는 다중 파일럿 빔을 동시에 형성하여 빔이 형성된 위상들에 셀 내 분포한 사용자들의 위상이 있을 가능성을 증가시킨다. 랜덤하게 발생한 다중 파일럿 빔에서 각 사용자들의 채널을 통한 수신 파일럿 신호의 크기가 크면 파일럿 빔을 발생한 위상으로의 데이터를 전송 시 역시 높은 데이터 수율을 얻을 수 있다.

두 번째 빔 포밍 시스템은 첫 번째 방법처럼 여러 파일럿 빔을 동시에 발생하는 것이 아니라, 셀 전체 위상  $[0, 2\pi]$ 을 균등하게 나누어 나누어진 위상 각각에 대한 파일럿 빔을 순차적으로 발생한다. 한 위상에 대한 파일럿 빔을 하나의 미니 슬롯을 이용하기 때문에 다중 미니 슬롯을 이용하게 된다. 이들에 대한 SNR 피드백으로부터 채널 이득을 구하여 사용자들의 위상을 추정한다<sup>7)</sup>.

제시한 두 가지 방법의 공통된 점은 스케줄링을 위한 정보로서 SINR이 아니라, 각 안테나와 사용자 간 채널 이득 크기를 이용하여 데이터 수율 함이 최대가 되도록 SINR을 재조합한다는 것이다.

일반적으로, 사용자들로부터 피드 백 되어 스케줄링에 사용되는 정보는 사용자들의 SINR이다. 데이터 수율 함을 최대화하기 위해서, SINR이 큰 사용자들을 선택하는 스케줄링은 데이터 수율 함을 최대화 하지 않을 수 있다. 왜냐하면, SINR이 큰 어떤 사용자는 상대적으로 작은 간섭으로 인해 SINR은 크나 희망하는 사용자의 채널 상태는 좋지 않을 수 있다. 반면에 전송된 다른 사용자들의 간섭으로 인해 SINR이 크지 않지만, 채널 상태는 좋은 사용자가 있을 수 있다. 이러한 경우, 데이터 수율이 커지도록 동시에 데이터를 전송할 사용자를 유동적으로 선택 할 필요가 있다.

또한 SINR로 스케줄링하게 되면, 데이터를 전송하기 위한 사용자의 수는 고정되어야 하는 한계를 갖는다. 이런 경우 셀 내에 사용자들이 적게 있거나 균일하지 않게 분포하는 경우, 간섭을 증가 시켜 성능을 감소하게 한다.

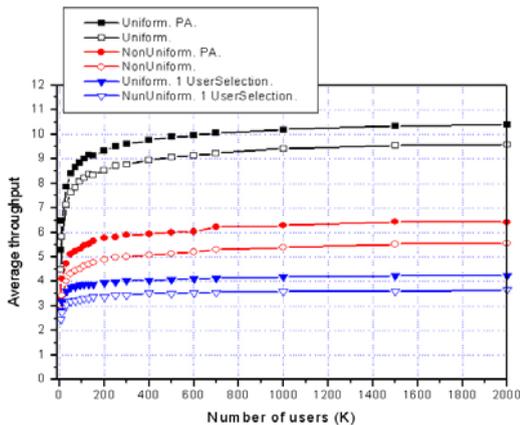


그림 1. 다중 오퍼튜니스틱 빔 포밍을 하여 하향링크의 데이터 수율이 최대가 되도록 사용자 선택을 한 경우와 가장 좋은 사용자 한 명만을 선택했을 경우에 대한 데이터 수율 비교

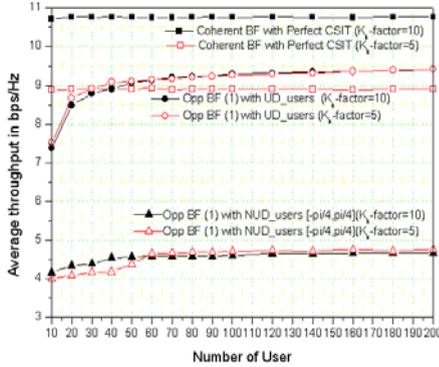


그림 2. 사용자들의 SINR을 사용해 스케줄링을 했을 경우, 사용자 분포에 따른 평균 데이터 수율

기지국이 SINR을 가지고 스케줄링을 한 데이터 수율 결과를 그림 2에서 보여주고 있다. 사용자들이 균일하게 분포하는 경우에 비해, 비 균일하게 분포 하게 될 때, 이 시스템이 갖는 데이터 수율 결과는 크게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 사용자 들이 비 균일하게 분포하는 경우에, 크게 저하 되는 성능을 향상시키기 위해 사용자들을 좀 더 유동적 으로 선택할 수 있는 방법을 다음에서 제안한다.

3.1 동시에 발생하는 직교하는 랜덤한 다중 파 일렛 빔 포밍

앞에서 소개한 것처럼 서로 간 직교하는 특성을 갖는 랜덤한 다중 빔을 발생한다. 직교하는 파일렛 빔 포머 개개의 요소들은 송신 전력을 균등하게 할 당하여 다음과 같이 발생 시킨다.

$$w_n(t) = \sqrt{\frac{1}{N_T}} \exp(jm\phi_n(t)), n = 1, 2, \dots, N_T, \quad (9)$$

이들이 서로 직교하는 특성을 갖도록 발생하기 위해 우리는 Gram-Shmidt Procedure를 아래와 같 이 소개한다.

Step1. Initialize: decide a adequately large number  $B$ .

$$i = 1, \Phi = \{ \},$$

$$\phi_{(1)} = \text{random} \left\{ \phi_k | \phi_k = 2\pi - (B - k) \frac{2\pi}{B}, 0 \leq k < B \right\}$$

$$\Phi = \Phi \cup \{ \phi_{(1)} \},$$

Step2. loop: If  $|\Phi| < M$ , then  $i \leftarrow i + 1$  and

$$\phi_{(i)} = \max_{\phi_{(i)} \neq \phi_{(j)}} \left\| \mathbf{w}(\phi_{(i)}) - \mathbf{w}(\phi_{(j)}) \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\mathbf{w}(\phi_{(j)}) \mathbf{w}^*(\phi_{(j)})}{\| \mathbf{w}(\phi_{(j)}) \|^2} \right\|,$$

$\mathbf{w}(\phi_{(i)})$ : the beamformer of  $\phi_{(i)}$ .

$$\Phi \cup \{ \phi_{(i)} \}.$$

Step3. Obtain the orthogonal phase index set:

$$\Phi = \{ \phi_{(1)}, \phi_{(2)}, \dots, \phi_{(N_T)} \}.$$

Gram-Schmidt Procedure로 발생한 파일렛 빔들 로부터 각 사용자는 안테나  $n$ 과 사용자  $k$ 사이에 채널 이득의 크기  $H_{n,k}$  를 측정한다.

$$H_{n,k} = | \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_n |$$

$$= \left| \sqrt{\frac{K_k}{N(1+K_k)}} \sum_{n=1}^{N_T} \exp(jm(\theta_k(t) + \phi_n(t))) \right.$$

$$\left. + \sqrt{\frac{1}{N(1+K_k)}} \sum_{n=1}^{N_T} \exp(jm\phi_n(t)) b_{n,k}(t) \right|,$$

그리고 피드 백 하는 값은 채널 이득의 함수  $f(\mathbf{H}_{n,k}) = SINR_k$ 이라고 정의하자. 기지국은 총  $N_T \times K$  개의 각 채널 상태에 대한 정보를 피드 백 받는다. 기지국은  $N_T \times K$ 개의 연립 방정식으로부터 해로 채널 이득들을 얻을 수 있다.

따라서 구한 각 안테나와 사용자들 간 평균 채널 이득 값 이상이 되는 채널 이득들 가운데서 데이터 수율 합이 최대가 되도록 빔 포머와 사용자들을 선택한다.

$$[Q^*, \Omega^*] = \arg \max_{Q \subset N_T} \{ \max_{\Omega \subset K^*} [T_p(Q, \Omega)] \}, \quad (10)$$

여기서  $\Omega^*$ 와  $Q^*$ 은 각각 선택된 사용자의 집합 과 이들에 해당하는 빔 포머 집합을 의미한다. 그리고  $K^*$ 는 일정 값 이상의 채널 이득을 갖는 사용자 들의 부분 집합을 의미한다.

임의로 선택된 사용자들  $\Omega$ 은 다음과 같이 데이 터 전송 전력 크기 비를 재 할당하여 식 (10)에서 의 데이터 수율 합을 구한다.

$$(P_{k_{(1)}}^*, P_{k_{(2)}}^*, \dots, P_{k_{(|\Omega^*|)}}^*) =$$

$$\left( \frac{\mathbf{H}_{k_{(1)}}^*}{\sum_{j=1}^{k_{(1)} \in \Omega^*} \mathbf{H}_{k_{(j)}}^*}, \frac{\mathbf{H}_{k_{(2)}}^*}{\sum_{j=1}^{k_{(2)} \in \Omega^*} \mathbf{H}_{k_{(j)}}^*}, \dots, \frac{\mathbf{H}_{k_{(|\Omega^*|)}}^*}{\sum_{j=1}^{k_{(|\Omega^*|)} \in \Omega^*} \mathbf{H}_{k_{(j)}}^*} \right), \quad (11)$$

여기서,  $P_{k(j)}$  은  $j$  번째 큰 크기로 선택된 사용자의 데이터 전송을 위해 할당된 전력 크기 비를 의미한다.  $j$  는 선택된 사용자의 채널 이득 크기 서열을 나타낸다.

따라서 재 할당된 전송 전력을 갖는 사용자  $k_{(j)}^*$  에 해당하는 빔 포머 원소는

$$w_{k_{(j)}^*}(t) = \sqrt{P_{k_{(j)}^*}} \exp(jn\phi_{k_{(j)}^*}(t)), \quad n = 1, 2, \dots, N_T. \quad (12)$$

이다. 그리고 이들에게 데이터를 전송 했을 경우, 전송된 시스템의 총 데이터 수율은 다음과 같이 주어지게 된다.

$$I(Q^*, \Omega^*) = \sum_{k^* \in \Omega^*} \log(1 + SINR_{k^*}(Q^*)), \quad (13)$$

### 3.2 순차적으로 발생하는 다중 파일럿 빔 포밍

두 번째 보이는 향상된 오피튜니스틱 빔 포밍 시스템은 직접적으로 사용자의 도래 각을 예측할 수 있다 [7]. 그리고 추정한 사용자들의 도래 각을 이용해 영리하게 빔을 발생시킨다.

각 시간 슬롯의 시작 부분에 미니 슬롯이라는 작은 시간 주기 동안 균등한 셀의 위상으로 빔을 순차적으로 발생시킨다. 기지국은 각 사용자들로부터 피드 백 받은 채널 이득 정보를 이용하여, Maximum-likelihood (ML) 추정기로부터 사용자들의 도래 각을 추정한다.

사용자들의 도래 각들을 추정하기 위해, 추정주기  $P$  는  $Q$  개의 부추정주기를 갖는다,  $P = P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_Q$ . 이 부추정주기는 다음과 같은 관계를 갖는다.  $P_i \cap P_j = \emptyset, i \neq j$ . 임의의  $q$  번째 부추정주기  $P_q$  내에는  $L_q$  개의 미니 슬롯이 있다고 가정한다. 따라서 추정 전체 주기 동안의 미니 슬롯의 수는  $L = \sum_{q=1}^Q L_q$  이 된다.

기지국이  $q$  번째 부추정주기에 발생하는 파일럿 빔 포밍의 인위적 위상각은  $\phi_q(t)$  이다. 피드 백 하는 채널 이득,  $H_{q,k}$  으로부터 Maximum-likelihood (ML) 추정기를 사용해서 추정된 사용자들의 도래 각은 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_k^{ML} = \arg \max_{\theta_k \in [0, 2\pi]} \prod_{q=1}^Q \left( \frac{2}{N_0} \right)^{L_q} \times \left\{ \prod_{t \in P_q} H_{q,k}(t) \times \exp \left( - \frac{H_{q,k}^2(t) + A_{k,q}^2}{N_0} \right) \times I_0 \left( \frac{2H_{q,k}(t)A_{k,q}}{N_0} \right) \right\}, \quad (14)$$

여기서  $H_{q,k}(t)$  값은 기지국에 정확하게 알려져 있다고 가정한다. 그리고 식 (13)에서  $A_{k,q}$  은 아래와 같이 정의된다.

$$A_{k,q}(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{K_k}{N(1+K_k)}} + 2\sqrt{\frac{K_k}{N(1+K_k)}} \sum_{n=1}^{(N-1)/2} \cos(n(\theta_k + \phi_q(t))), & N = \text{odd} \\ 2\sqrt{\frac{K_k}{N(1+K_k)}} \sum_{n=1}^{N/2} \cos((n-1/2)(\theta_k + \phi_q(t))), & N = \text{even} \end{cases}$$

그리고  $I_0$  은 modified Bessel function of order zero 이다.

$$I_0(y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{y \cos \beta} d\beta.$$

식 (13)의 ML 추정 식에 로그를 취하여 식을 단순화 시키면 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_k^{ML} = \arg \max_{\theta_k \in [0, 2\pi]} \sum_{q=1}^Q \sum_{t \in P_q} \left\| \ln I_0 \left( \frac{2H_{q,k}(t)A_{k,q}}{N_0} \right) - A_{k,q}^2 \right\|, \quad (15)$$

식(14)로 사용자들의 방향이 추정되며, 추정된 사용자들의 도래 각  $\hat{\theta}_k^{ML}$  을 직교하도록 하는 집합을 다음에서 구한다.

기지국은 전체 사용자 집합,  $K_0 = \{1, 2, \dots, K\}$  원소들 가운데서 가장 좋은 채널 상태를 갖는 한명을 선택한다.

$$[k_{(0)}, q_{(0)}] = \arg \max_{k \in K_0, q_i \in Q_0} [H_{q_i, k}^*], \quad (16)$$

여기서 사용자들로부터 추정된 빔 포머 위상 집합  $Q_0$  는

$$Q_0 = \left\{ q_k^* \mid \arg \max_{q=1, \dots, Q} \left( \frac{1}{L_q} \right) \sum_{t \in P_q} H_{q,k}^2, 1 \leq k \leq K \right\}, \quad (17)$$

이다.  $(i+1)$  번째 사용자  $k_{(i+1)}$  는 다음 사용자 집합에서 선택된다.

$$K_i = \left\{ 1 \leq k \leq K \mid \mathbf{w}^H(\hat{\theta}_{k_{(j)}}^{ML}) \mathbf{w}(\hat{\theta}_k^{ML}) \leq \epsilon, 1 \leq j \leq i \right\}, \quad (18)$$

$\mathbf{w}(\hat{\theta}_{k_{(j)}}^{ML})$  는  $j$  번째 선택된 사용자의 빔 포머이고,  $\mathbf{w}(\hat{\theta}_k^{ML})$  는 임의의 사용자  $k$  에 해당하는 위상의 빔 포머이다.

전체  $K$  명 가운데 직교하는 특성을 갖는 부분 최

적화된 사용자들 집합 내에서 사용자들 가운데서 데이터 수율 합을 최대화하는 최적의 사용자들 집합을 선택하도록 한다. 선택된 사용자들의 부분 집합은 식 (10)처럼 송신 파워를 할당하여 식 (6)과 같은 데이터 수율 합을 구한다. 이들 가운데 가장 큰 성능을 갖는 사용자 집합을 찾는다.

$$[\Omega^*] = \arg\{\max_{\Omega \subset U} [T_p(\Omega)]\}, \quad (19)$$

$U$  는 직교하는 특성을 갖는 전체 사용자들 가운데 부분 최적화 된 사용자들의 집합을 나타낸다.  $U = \{k_{(0)}, k_{(1)}, \dots\}$ . 따라서 결국 송신 빔 포머의 위상 각은  $\phi_{4k} = -\hat{\theta}_{k_{(0)}}^{ML}$  이 되고, 이 각으로 빔을 발생시켜 데이터를 전송한다.

#### IV. 수치적 결과

위에서 소개한 사용자 선택 방법을 사용하여 데이터를 전송했을 때, 그 평균적인 데이터 수율이 얼마나 향상됐는지, 그림2와 비교해서 살펴볼 수 있다. 그림3과 그림4의 시뮬레이션에서는 라이시안 채널의  $K$ -factor,  $K_k$  가 10과 5일 때, 사용자들의 분포가 균일한 경우와 비 균일한 경우에 대한 사용자들의 평균 데이터 수율을 살펴본다. 그림2-그림4는 송신 안테나 수  $N_T$ 를 4로 하고 있으며, 이를 이용하여 최대 4명의 사용자들에게 동시에 데이터를 전송하기 위해 사용할 수 있다고 가정했다. 사용자들의 채널은 안테나 간 독립적이라고 가정한다. 빔 포머  $w(t)$ 은 섹션III에서 설명한 다른 두 가지 방식으로 발생하였으며, 채널 이득  $\{H_k(t) : k=1, \dots, K\}$ 은 빔 포머와 사용자 채널의 곱으로써 얻는다. 성능은 평균 데이터 수율으로써 셀 내에 사용자의 수가 증가함에 따른 결과를 보였다.

비교하여 보여주는 coherent 빔 포밍은 송신 단에서 사용자들의 채널을 알고 있는 빔 포밍 시스템이라고 가정했다. 따라서 동시에 데이터를 수신하는 사용자들 간 채널의 간섭이 서로 소거되는 Zero-forcing eigen-빔 포밍 시스템을 가정하였다<sup>9)[10]</sup>. 오퍼튜니스틱 빔 포밍은 채널 정보의 부분을 스케줄링에 활용하기 때문에 완전히 소거되지 않은 다른 사용자에 의한 간섭으로 데이터 수율 성능이 떨어지는 결과를 그림 2,3 과 4에서 확인할 수 있다. 오퍼튜니스틱 빔 포밍 시스템은 사용자의 분포와 그 수에 따라 성능이 크게 좌우되기 때문에, 셀 내에 분포한 사용자의 수를 10

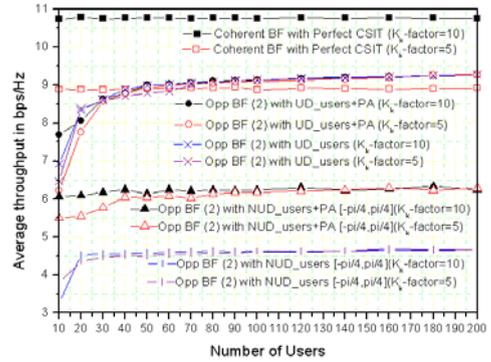


그림 3. 섹션III에서 제시한 오퍼튜니스틱 빔 포밍 방법1을 사용하는 시스템에서 제안한 스케줄링 한 경우, 사용자 수에 대한 평균 데이터 수율

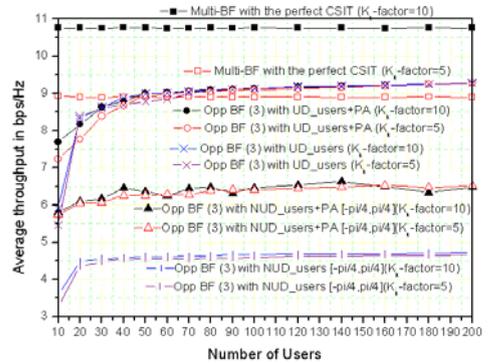


그림 4. 섹션 III에서 제시한 오퍼튜니스틱 빔 포밍 방법2를 사용하는 시스템에서 제안한 스케줄링 한 경우, 사용자 수에 대한 평균 데이터 수율

부터 200명으로 증가하면서 균일하게 분포했을 때와, 셀의  $[-\pi/4, \pi/4]$  방향에 모두 모여 있는 비 균일한 경우에 대한, 평균 데이터 수율 결과를 살펴보았다.

그림3과 4는 제안한 스케줄링 방법을 시뮬레이션을 통해 얻은 수치적 성능 결과이다. 데이터 수율은 셀 안에 있는 사용자의 수가 증가할 때, 좋은 채널 상태에 있는 사용자들이 증가하면서, 성능이 증가한다. 그리고 그림3과 4을 그림2와 비교해서 보면 채널 이득을 사용하여 사용자 SINR을 재조합함으로써, 사용자 분포에 따라 데이터를 전송할 사용자 수를 유동적으로 선택하게 되어, 사용자 채널 간 간섭을 최소화 시킬 수 있게 된다. 게다가, 선택된 사용자의 채널 상태에 따라 전송 신호 전력을 재 할당함으로써 그림2와 비교하여 데이터 수율이 60% 가량 더 향상되고 있음을 보여주고 있다.

그러나 사용자들이 비 균일하게 분포하는 경우,

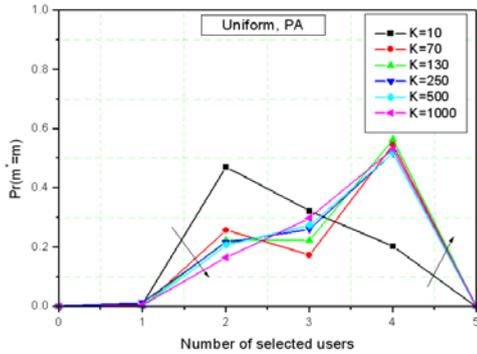


그림 5. 송신 전력을 선택된 사용자들 사이에서 재 할당하는 시스템에서, 셀 내에 균일하게 위치한 사용자들 가운데 선택되는 사용자 수의 분포

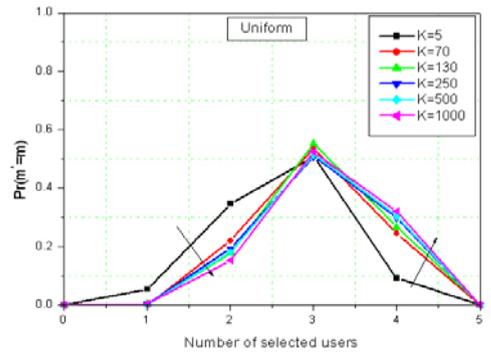


그림 7. 송신 전력을 선택된 사용자들 사이에서 재 할당 하지 않는 시스템에서, 셀 내에 균일하게 위치한 사용자들 가운데 선택되는 사용자 수의 분포

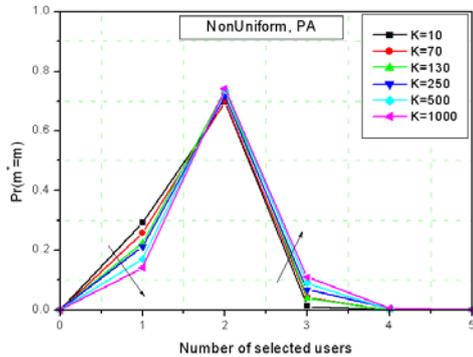


그림 6. 송신 전력을 선택된 사용자들 사이에서 재 할당하는 시스템에서, 셀 내에 비 균일하게 위치한 사용자들 가운데 선택되는 사용자 수의 분포

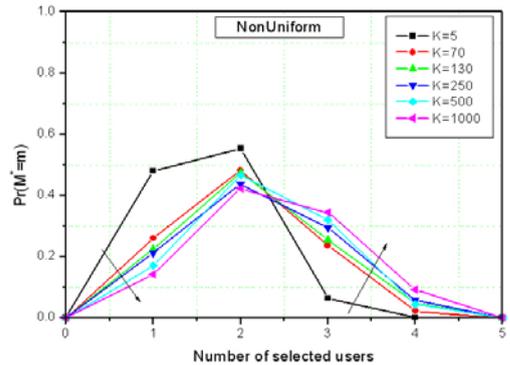


그림 8. 송신 전력을 선택된 사용자들 사이에서 재 할당하지 않는 시스템에서, 셀 내에 비 균일하게 위치한 사용자들 가운데 선택되는 사용자 수의 분포

균일할 때와 같은 성능을 얻을 수 없는 이유는 사용자들이 균일하게 분포하는 경우에는 송신 안테나 수 전체를 사용하도록 사용자를 택하게 되는 데 반해, 비 균일한 사용자들의 분포에서는 사용자간 간섭을 최소화하기 위해 일부를 택하게 되면서, 데이터 수율 합이 균일할 때에 비해 떨어진다.

사용자들의 분포가 균일할 때와 비 균일할 때, 데이터 수율을 높이기 위해서 시스템이 선택하는 사용자수가 얼마나 되는지 그 분포를 그림5-그림8를 통해서 확인해 볼 수 있다. 그림5-그림8은 섹션 III에서 제시한 첫 번째 사용자 선택방법을 사용하여 데이터 수율을 구한 그림3 결과에서 선택된 사용자 수의 분포를 그린 것이다. 그림6과 그림8에서 확인해 볼 수 있듯이 시스템 전체 데이터 수율을 높이기 위해서 비 균일한 경우일 지라도 가장 좋은 채널 상태를 갖는 1명의 사용자에게 데이터를 수신할 기회를 주기 보다는 2명 이상의 사용자를 선택하는 경우가 상당히 빈번함을 알 수 있다. 따라서 SINR

을 이용한 스케줄링으로 인해 고정된 빔 수에 강제된 사용자를 선택하는 그림2의 성능에 비해 평균 데이터 수율이 증가하는 이유를 설명하고 있다.

또한 그림6에서는 선택된 사용자들 가운데 채널 상태가 가장 좋은 사용자에게 송신 파워를 좀 더 가중하여 할당하게 함으로써 그림8에 비해 선택되는 사용자의 수가 적은 수치에서 높은 분포를 보이고 있다. 균일하게 위치하고 있는 사용자들에 대한 선택 명수의 분포 그림5와 그림7을 살펴보면 사용 가능한 최대 송신 안테나 수를 모두 사용하여 데이터를 전송하는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결론

이 논문에서는 기지국이 다중 오피튜니스틱 파일럿 빔으로부터 피드백 받은 채널에 대한 국부 정보만을 이용하여 하향링크 데이터 수율 합 성능 향상을 보일 수 있도록 사용자들을 선택하는 스케줄링 보였

다. 다중 빔 포밍 방법에서 빔에 대한 채널의 이득을 이용하여 데이터 수율이 최대가 되게 하는 사용자들의 재조합을 보였다. 제안한 스케줄링에서 보듯이 채널 이득을 이용한 사용자 집합의 재 조합은 비 균일한 사용자 분포를 갖는 오피튜니스틱 빔 포밍 시스템에서 유동적인 사용자 선택을 가능하게 한다. 따라서 비 균일한 사용자 분포로 인한 데이터 수율 성능 감소를 향상 시킬 수 있는 방법으로써 제안되었다.

참 고 문 헌

[1] H. Weubgarten. Y. Steinberg, and S. Shamai, "The capacity region of the Gaussian MIMO broadcast channel," in *Procs, IEEE Int.Symp.Inf. Theory(ISIT)*,, 2004.

[2] D. Hammarwall. M. Bengtsson and B. Ottersten, "Beamforming and user selection in SDMA systems utilizing channel statistics and instantaneous SNR feedback," *submitted to IEEE Trans. on Signal Processing*,

[3] P. Viswanath. N. C. Tse and R. Rajiv, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. on Information Theory*,, Vol.48, no.6, pp.1277-1294, June, 2002.

[4] D. N. C. Tse et al., "Transmitter directed, multiple receiver system using path diversity to equitably maximize throughput," patent filed, May 24, 1999.

[5] J. Holtzman. "CDMA forward link waterfilling power control," *IEEE VTC' 2000*, 2000, pp.1663-1667.

[6] J. Holtzman. "Asymtotic analysis of proportional fair algorithm," *IEEE PIMRC' 01*, 2001, pp.F33-F37.

[7] I. M. Kim, Z. Yi, D. Kim and W. Chung, "Improved opportunistic beamforming in Ricean channels," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol.54, pp.2199-2211, Dec, 2006.

[8] I. M. Kim, S. Hong S. S. Ghassemzadeh and V. Tarokh, "Opportunistic beamforming Based on Multiple Weighting Vectors," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, Vol.54, pp.2199-2211, Dec, 2006.

[9] C. Brunner, W. Utschick, and J. A. Nossek, "Exploiting the short-term and long-term channel

properties in space and time Eigenbeamforming.: Concepts for the BS in WCDMA," *European Trans. on Telecommunica-tions*, Vol.12, pp.365-378, 2001.

[10] K. K. Wong, "Maximizing the sum-rate and minimizing the sum-power of a broadcast 2-user 2-input multiple-output antenna system using a generalized zero-forcing approach," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.3. no.6, pp.1-5. Nov. 2004.

구 미 현(Mihyeon Ku)

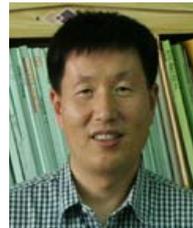
준회원



2006년 2월 한양대학교 전자컴퓨터공학부 학사졸업  
2008년 1월 한양대학교 전자전기 제어계측공학과 석사과정  
<관심분야> Multiuser beamforming system

김 동 우 (Dongwoo Kim)

정회원



1994년 8월 한국과학기술원 공학 박사  
1994년 7월~2000년 2월 신세기 통신 R&D센터 선임과장  
2000년 3월~2004년 2월 한양대학교 전자컴퓨터공학부 조교수  
2004년 3월~현재 한양대학교 전자

컴퓨터공학부 부교수  
<관심분야> Multi-user MIMO, Cognitive radio transmission