# 공간 분할 다중 접속 시스템의 상향링크 사용자 스케쥴링, 송신 전력 제어, 수신 빔포밍에 관한 연구

조문제, 반태원, 정방철*, 신원용

*경상대학교 정보통신공학과, 단국대학교 모바일시스템공학전공

mjcho.win@gmail.com, twban35@gnu.ac.kr, *bcjung@gnu.ac.kr, wyshin@dankook.ac.kr

# A Study on the Uplink SDMA Systems: User Scheduling, Transmit Power Control, and Receive Beamforming

Moon-Je Cho, Tae-Won Ban, Bang Chul Jung*, Won-Yong Shin

*Department Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University
Mobile System Engineering, Dankook University

## 요 약

본 논문은 상향링크 공간분할접속 시스템에서 사용자 스케쥴링, 전력제어, 수신 빔포밍을 다룬다. 사용자는 단일 안테나를 가지며 기지국은 다중 안테나를 가진다고 가정한다. 기지국에서는 미리 결정된 방식으로 수신 빔포밍을 수행하고 빔포밍 후의 정해진 스케쥴링 방식에 따라 사용자가 선택된다. 본 논문에서는 각 사용자는 다른 사용자의 신호에 미치는 간섭 양을 미리 계산하여 그 값이 특정 임계치보다 클 경우 자신의 송신 전력을 낮추는 전력 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 기법의 상향링크 데이터 전송률은 기존에 제안된 다양한 사용자 스케쥴링 알고리즘들에 비하여 월등히 좋은 성능을 보인다.

## Ⅰ. 서 론

최근 무선통신의 폭발적인 데이터 트래픽과 동일 지역의 셀 수의 증가로 인해 간섭 양이 증가하였다. 이에 따라 현재의 대부분의 무선통신에서 사용자들의 데이터 서비스를 수용해야 하므로 사용자 혹은 기지국은 극심한 셀 내 간섭과 셀 간 간섭을 겪게 될 것이다.

이러한 간섭 문제를 해결하기 위해 하향링크에서는 페이딩의 특성을 이용하는 기회주의적 스케쥴링, 기회주의적 빔포밍, 랜덤 빔포밍 등의 기술들이 제안되었다 [1][2]. 위 기술들을 사용하면 단일 셀에서 사용자 전송률이 최적 스케일링 법칙(Scaling law)을 성취할 수 있다는 것이 증명되었다. 기지국은 정해진 패턴 적용하여 송신 빔포밍을 변화시키고 사용자는 수신 신호 대 간섭 및 잡음 비 (signal-to-interference-and-noise ratio, SINR)를 계산하고 그 값을 기지국으로 피드백하여 SINR 값이 가장 큰 사용자를 선택하여 스케쥴링한다. 그러나 셀룰라 시스템에서 상향링크는 근본적으로 하향링크 환경과 다르다. 하향링크의 경우 사용자가 다중 빔 간의 수신단 SINR 을 정확히 계산할 수 있지만, 상향링크에서는 각 사용자는 자신의 채널 외에 다른 사용자의 상향링크 채널을 알 수 없다 [2]. 따라서 다중 사용자들이 서로 기지국에서 미치는 간섭의 양을 알 수 없고 최적의 다중사용자 이득을 얻는 사용자 스케쥴링 방법이 아직 제안되지 않았다.

본 논문에서는 임계값 기반으로 송신 전력을 조절하는 분산 기회주의적 스케쥴링 기법을 제안한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 2 절에서는 시스템 모델을 정의한다. 3 절에서는 제안된 전력제어 및 임계값 기반 분산 사용자 스케쥴링 기법을 제안하고 4 절에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 방식의 기법을 분석하고 기존의 기법과 비교함으로써 제안된 기법의 우수성을 확인한다.

## Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서는 TDD 기반의 단일 셀 상향링크 공간 분할 다중 접속(SDMA) 시스템을 고려한다. 하나의 셀에 기지국은 $M$ 개의 수신 안테나를 가지고 있으며, 셀 내에 $N$ 명이 사용자가 존재한다. 각 사용자는 단일 송신 안테나를 가진자. 따라서, 각 사용자별 상향링크 채널은 single-input multiple-output (SIMO) MAC 로 모델링 된다. 여기서 $N$ 이 $M$ 보다 훨씬 크다면 무선 채널의 무작위성(randomness)을 이용하여 기회주의적 이득을 얻을 수 있다. 단위 전송 블록(프레임) 동안은 채널 이득은 고정이며 매 전송 블록 별로 채널 이득이 독립적으로 변하는 블록 페이딩 채널 가정한다. 블록 단위로 채널 기간과 채널 코딩을 구성할 수 있고 모든 전송 블록들이 독립적으로 변하게 된다. 기지국은 $M$ 개의 안테나를 가지고 최대 $M$ 명의 사용자 신호를 수신 할 수 있고, 이때 $M \times M$ 크기의 빔포밍 행렬 $U$ 를 이용하여 수신단 랜덤 빔포밍을 수행한다. 기지국의 수신 신호 벡터 $\boldsymbol{y} \in \mathbb{C}^{M}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\boldsymbol{y} = \sum_{n=1}^{M} \boldsymbol{h}_n \sqrt{P_n} x_n + \boldsymbol{z} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{U} = [\boldsymbol{u}_1, \boldsymbol{u}_2, \cdots, \boldsymbol{u}_M] \quad (2)$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}\mathbf{y} \qquad (3)$$

식 (1)에서 $\mathbf{h}_n \in \mathbb{C}^{M\times 1}$ 는 n 번째 사용자로부터 기지국까지의 상향링크 채널 벡터로 각 채널 원소는 Rayleigh 분포로 가정된다. $x_n \in \mathbb{C}$ 는 $n$ 번째 사용자로부터 송신 신호를 나타내고 $P_n$ 은 $n$ 번째 사용자는 송신전력 나타낸다. $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{M\times 1}$ 는 평균이 0 이고 $N_0\mathbf{I}_M$ 의 공분산 매트릭스를 갖는 독립적이고 동일한 분포의 순환적 대칭인 복소수 AWGN 벡터이다. 기지국은 식 (2)와 같이 $M \times M$ 크기의 랜덤 빔포밍 벡터 $\mathbf{U}$ 를 생성한다. $\mathbf{U}$ 는 수신 안테나 수 $M$ 에 따라 생성되고 이는 $\mathbf{u}_m \in \mathbb{C}^{M\times 1}$ 의 원소로 이루어져 있다. ( $m = 1, 2, ..., M$ ). (3)는 기지국에서 받은 신호를 랜덤 빔포밍 행렬 $\mathbf{U}$ 를 이용하여 선택된 $M$ 명의 수신 신호 벡터가 변형된다.

그리고 각 사용자는 채널의 상호 호환성 특성으로 인해 하향링크 파일럿 신호를 이용하여 자신의 상향링크 무선 채널 $\mathbf{h}_n$ 에 대한 정보를 미리 알 수 있고 수신단에서 수행되는 랜덤 빔포밍 행렬 $\mathbf{U}$ 에 대한 정보도 이미 알 수 있다. 각 사용자는 이 정보를 기반으로 제 3 장에서 제안할 다양한 스케쥴링을 위한 기준 값 (scheduling criterion)을 생성한다.

## Ⅲ. 제안된 전력제어 및 임계값 기반 분산 사용자 스케쥴링

임계값 기반 분산 사용자 스케쥴링 (Threshold-Based Distributed User Scheduling, TDUS) 알고리즘은 다음과 같이 각 사용자가 발생시키는 간섭의 양이 미리 결정된 임계치보다 작으면서 신호의 크기가 가장 큰 사용자를 선택하는 방법이다 [3].

$$S_{TDUS}^m = \text{argmax}_n |\sqrt{P}\mathbf{u}_m^T\mathbf{h}_n|^2 \quad \text{for } n = 1,2,...,N,\ m = 1,2,...,M, \qquad (4)$$

$$s.t. \sum_{j=1, j\neq m}^{M} |\sqrt{P}\mathbf{u}_j^T\mathbf{h}_n|^2 \le \eta_I \qquad (5)$$

각 사용자는 식 (5)에 따라서 간섭의 양을 미리 결정된 임계값 $\eta_I$ 의해 사용자 선택 범위를 제한하는 식이다. 각 사용자가 발생시키는 간섭의 양이 임계값 $\eta_I$ 보다 클 경우 기지국으로 피드백을 수행하지 않게 되고 스케쥴링에서 제외되는 경우가 발생한다. 즉, 스케쥴링 이득이 감소한다. 따라서 임계값은 신중히 결정되어야 한다.

본 논문에서는 간섭을 일정수준으로 조절하면서 스케쥴링 이득을 극대화 할 수 있는 송신 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 (5) 식에 기반한 간섭의 임계값 조건을 만족하는 사용자는 자신의 최대 전력으로 데이터를 전송하게 하고 만약 (5)식의 조건을 만족하지 못하면 자신의 송신 전력을 낮추어 (5)식을 만족하도록 하는 것이다. 다음의 식에 따라 전력 조절을 수행하고 $m$ 번째 수신 빔을 사용할 사용자는 결정된다.

$$S_{TDUS-PC}^m = \text{argmax}_n |\sqrt{\tilde{P}^m}\mathbf{u}_m^T\mathbf{h}_n|^2 \quad \text{for } n = 1,2,...,N,\ m = 1,2,...,M, \qquad (6)$$

$$\tilde{P}^m = \min\left\{P, \eta_I \Big/ \left(\sum_{j=1, j\neq m}^{M} |\mathbf{u}_j^T\mathbf{h}_n|^2\right)\right\} \qquad (7)$$

식 (6)에서 각 사용자 별로 사용할 수신 빔에 따라서 송신 전력이 달라질 수 있음에 주목하라. 각 사용자는

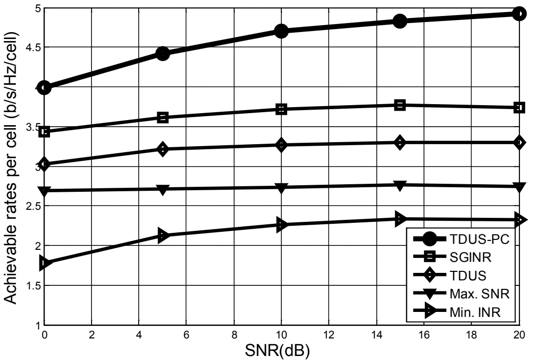


그림 1. 제안된 기법의 SNR 에 따른 데이터 전송률

자신의 채널을 알고 있으므로 각 사용자가 사용할 전력은 기지국의 개입 없이 각 사용자에서 분산적으로 계산된다.

## Ⅳ. 컴퓨터 시뮬레이션

그림 1 은 제안된 스케쥴링 기법을 컴퓨터 시뮬레이션으로 분석하고 기존 스케쥴링 방식과 비교하였다. 먼저 TDUS 알고리즘과 TDUS-PC 알고리즘이 최적의 성능을 갖도록 임계값 $\eta_I$ 을 최적화하였다. $M = 4, N = 100$ 이고 제안된 TDUS-PC 기법이 기존의 Max SNR, Min INR, SGINR 그리고 TDUS-PC 기법에 비하여 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있다.


## ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by the MSIP(Ministry of Science, ICT & Future Planning), Korea in the ICT R&D Program 2013.


## 참 고 문 헌


[1] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, " Opportunistic beamforming using dumb antennas," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 48, no. 6, pp.1277- 1294, Aug. 2002.

[2] M. Sharif and B. Hassibi, " On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 51, no. 2, pp. 506- 522, Feb. 2005.

[3] W.-Y. Shin, D. Park, and B. C. Jung, " Can One Achieve Multiuser Diversity in Uplink Multi-cell Networks?," IEEE Trans. on Commun., Vol. 60, No. 12, pp. 3535-3540, Dec. 2012.