

# 다중 안테나 브로드캐스트 채널에서의 기회적 단계적 피드백

민 문 식\*

## Opportunistic Multistage Feedback in MIMO Broadcast Channels

Moonsik Min\*

요 약

본 논문은 네트워크 내에 다수의 유저가 존재하는 다중안테나(MIMO) 시스템을 고려한다. 특히, 단일 기지국이 복수의 유저와 공간다중화를 기반으로 통신하는 하향링크 채널을 가정하며, MIMO-통신에 필요한 채널정보의 피드백 양을 효율적으로 줄일 수 있는 방법을 제안한다. 제안하는 기법은 시스템의 채널 이득을 기회적으로 활용하여, 스케줄링 될 잠재성이 높은 유저만 피드백에 참여할 수 있도록 함으로써 시스템 전체의 피드백 양을 효과적으로 줄인다.

**Key Words** : MIMO system, imited feedback, space division multiplexing, user scheduling

### ABSTRACT

This letter considers a multi-stage feedback and scheduling algorithm in multiple-input and multiple-output broadcast channels. To simultaneously communicate with multiple users, the base station considers space division multiplexing based on channel state information feedback from users. This letter mainly focuses on the number of feedback bits of the system, and proposes an opportunistic feedback method to effectively reduce the average number of feedback bits.

## I. 서 론

송수신부에 복수의 안테나를 활용하여 통신 자원을 늘리는 방식인 다중안테나(MIMO) 시스템은 시간-주파수 자원 외에 새로운 차원의 통신자원을 활용할 수 있다는 측면에서 수많은 연구가 진행되고 있다<sup>[1-4]</sup>. 특히, 상대적으로 많은 안테나를 활용하기 힘든 단말의 부담을 줄이기 위해 다중사용자 MIMO (MU-MIMO) 기법이 많은 주목을 받아 왔다. 하지만 MU-MIMO 기법은 높은 이득을 얻기 위해 기지국이 채널정보를 충분히 가지고 있어야 한다는 단점이 있다. 만약 주파수 분할 듀플렉싱 기반의 하향채널을 가정하면, 기지국이 채널정보를 얻기 위해 비현실적인 양의 피드백을 요구할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 MU-MIMO 시스템의 피드백 양을 실용적인 레벨로 유지하며, 기존과 비슷한 수준의 주파수 효율을 얻을 수 있는 기법을 제안하고자 한다. 제안하는 기법은 기존의 semi-orthogonal user selection (SUS)<sup>[1,3]</sup>을 기반으로 하며, SUS의 핵심 파라미터들을 기회적으로 활용한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 기지국이  $K$ 명의 유저와 통신하는 단일 셀 네트워크를 고려한다. 기지국은  $M$ 개의 안테나를 가지고, 각 유저는 하나의 안테나만을 보유한다. 유저는 1부터  $K$ 사이의 인덱스로 표현 되며, 기지국과 유저  $k \in T = \{1, \dots, K\}$  사이의 채널은  $M \times 1$  벡터  $\mathbf{h}_k$ 로 표현된다. 채널 벡터의 원소들은 상호 독립이며 동일하게 평균 0, 분산 1의 complex Gaussian distribution을 가진다. 따라서 유저  $k \in T$ 의 수신신호는

$$y_k = \mathbf{h}_k \mathbf{x} + n_k, \quad \mathbf{x} = \sum_{j \in S} \mathbf{w}_j s_j \quad (1)$$

와 같이 표현 된다. 식 (1)에서  $\mathbf{x}$ 는 송신벡터,  $n_k$ 는 평균 0, 분산 1의 complex Gaussian 잡음이다.  $S$ 는 스케줄링 된 유저들의 집합이고,  $\mathbf{w}_j$ 는 빔포밍 (beamforming) 벡터이다. 송신 파워는  $E\{\|\mathbf{x}\|^2\} = P$ 로 제한하고, 파워는 동일하게 분배된다.

\* First and Corresponding Author : Mokpo National University, Department of Electronics, Information and Communication Engineering, mnsk1min@mokpo.ac.kr, 정희원  
 논문번호 : KICS2017-09-263, Received September 25, 2017; Revised October 22, 2017; Accepted October 23, 2017

각 유저는 공간다중화를 위해 자신의 channel direction information (CDI)을 피드백한다<sup>[2,3]</sup>:

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \arg \max_{(\mathbf{c} \in C)} |\tilde{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{c}|^2, \tilde{\mathbf{h}}_k = \frac{\mathbf{h}_k}{\|\mathbf{h}_k\|}, \quad (2)$$

여기서  $C = \{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_B\}$ 는 양자화를 위한 코드북으로, 각 유저는  $\hat{\mathbf{h}}_k$ 의 인덱스를 송신부로 피드백 한다. 따라서 각 유저가 필요로 하는 피드백 비트 수는 주어진 코드북의 사이즈  $B$ 가 된다. 송신부는 피드백 정보를 바탕으로 zero-forcing beamforming (ZFBF)을 사용하여  $\mathbf{w}_j$ 를 구성한다<sup>[2,3]</sup>.

### 2.1 채널 품질 표시기(CQI)

본 논문에서는 SUS 알고리즘을 기반으로 높은 통신향이 기대되는 유저를 선택하기 위해서 다음과 같은 channel quality indicator (CQI)를 사용한다<sup>[3]</sup>:

$$\gamma_k = \frac{\rho \|\mathbf{h}_k\|^2 \cos^2 \theta_k}{1 + \rho \|\mathbf{h}_k\|^2 \sin^2 \theta_k}, \quad k \in T. \quad (3)$$

또한, 기존의 연구들과 동일하게 CQI정보는 송신부가 완벽히 알고 있다고 가정한다<sup>[2,3]</sup>.

## III. 조건부 multistage 피드백 기법

SUS 알고리즘의 장점은 유저들의 상호 직교성을 고려함으로써, ZFBF의 손실을 낮은 복잡도로 효율적으로 줄이고 이론적 최대치와 같은 다중사용자이득을 얻는 점이다<sup>[1]</sup>. 하지만 SUS는 직교성을 체크 하는 과정에서 필연적으로 모든 유저로부터 CDI를 피드백 받아야 한다. 즉, 시스템전체의 피드백양은  $KB$ 가 되어, 유저수가 증가하면 막대한 양의 피드백을 요구할 수 있다. SUS 알고리즘의 장점이 다중사용자 이득을 효과적으로 이끌어내는데 있다는 점을 고려하면 이러한 단점은 치명적일 수 있다.

본 논문에서는 상기한 SUS의 단점을 극복하기 위해 기회적(opportunistic) 피드백방식을 도입하여, 채널의 상태가 특정 임계치 조건을 넘는 유저만 피드백에 참여하는 방법을 제안한다. 제안하는 기회적방식은 SUS의 장점을 유지하기 위해 채널의 이득과 상호 직교성 양쪽에 임계치 조건을 반영한다. 하지만 유저간의 직교성은 앞선 단계에서 선택된 유저를 기준으로 결정되게 되므로, 기회적 피드백을 위해선 필연적으로

피드백의 단계를 나누어야 한다. 실제로 피드백을 두 단계로 나누어 효율적으로 전체 피드백 비트 수를 줄이는 방식이 제안 된 바 있으며<sup>[5]</sup>, 본 논문에서는 이러한 방식을 두 단계 이상으로 확장하여 피드백 비트수를 보다 효율적으로 줄이는 방식을 제안하고자 한다.

### 3.1 제안하는 피드백 및 유저 선택 기법

Step 1) 초기화:  $i = 1, S = \emptyset$ . 아래의 집합  $T_1$ 에 포함되는 유저들로부터 CDI를 피드백 받는다.

$$T_1 = \{k \in T : \gamma_k > \tau_1\}.$$

만약  $T_1$ 이 공집합이면, outage로서 모든 유저가 피드백에 참여 한다.

Step 2)  $i$ 번째 유저를 선택하여  $S$ 를 갱신한다.

$$\pi_i = \arg \max_{(k \in T_i)} \gamma_k, S = S \cup \pi_i.$$

Step 3) 아래의  $T_{i+1}$ 에 포함되는 유저로부터 CDI를 피드백 받는다. :

$$T_{i+1} = \{k \in T_i : \gamma_k > \tau_i, |\hat{\mathbf{h}}_k^H \hat{\mathbf{h}}_{\pi_i}| \leq \epsilon\}.$$

Step 4) 아래와 같이 스케줄링을 반복한다.

- IF:  $T_{i+1}$ 이 공집합이 아니고  $i < M$  이면,  $i$ 를 1 증가 시키고 Steps 2)-4)를 반복
- ELSE: 스케줄링을 마무리한다. ■

제안하는 방식은 CDI를 매 단계(인덱스  $i$ )마다 유저들이 기회적으로 피드백한다. 매 단계에서 각 유저는 분산(distributed)방식으로 판단하여, 본인이  $T_i$ 에 포함될 조건을 만족시키면  $\hat{\mathbf{h}}_k$ 을 피드백하고 그렇지 않으면 피드백을 포기한다, 이를 위해 기지국은 기 선택된 유저의  $\hat{\mathbf{h}}_{\pi_i}$ 를 피드포워드 해야 한다 (이 과정은 시스템에 가해지는 부담이 크지 않기 때문에 본 논문에서는 생략하였다). 스케줄링 될 가능성이 높은 일부의 유저만 피드백에 참여함으로써, 기존의 SUS에 비해 훨씬 적은 피드백 양으로 비슷한 수준의 주파수 효율을 얻을 수 있다.

임계치  $\tau_i$ 값은 목표로 하는 평균 피드백 유저수를 얻을 수 있도록 적응시킨다. 즉,  $i$ 번째 단계의 목표 피

드백 유저수가  $u_i$ 라고 하면,  $T_i$ 의 유저수가 목표치보다 적으면 임계치를 낮추고, 많으면 올리는 방식으로 long-term 평균 피드백 유저수를  $u_i$ 에 맞출 수 있다. 예를 들어, 본 논문에서는  $\tau_i(f+1) = \tau_i(f) - \frac{u_i - |T_i(f)|}{10u_i}$  와 같이 임계치를 적응시킨다; 여기서  $f$ 는 프레임 인덱스이다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 제안된 기법의 성능을 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 검증한다. 모든 결과는  $M = 4$ ,  $B = 12$ ,  $P = 10$ 을 가정하였다. 그림 1은  $K$ 의 변화에 따른 시스템의 평균 피드백 비트수를 보여주고 있다. 기존의 기법은  $KB$ 의 피드백을 요구하는 반면, 제안된 기법은 평균 피드백 비트수를 임계치를 통해 조절할 수 있다. 본 실험에서는 목표 피드백 유저 수를  $u_1 = \ln K$ ,  $u_i = 3, i \geq 2$ 로 설정한다.  $u_1$ 만 비교적 높게 설정한 이유는  $T_1$ 이 공집합이 되는 outage 상황의 확률을 낮추기 위함이다. 결과적으로 전체 피드백 유저 수는  $\ln K + 3(M - 1)$ 이 되므로, 제안된 기법의 피드백 비트 수는 log-scale로 증가하게 된다 (그림 1). 또한, 그림 1은 제안하는 기법이 기존의 SUS는 물론 [5]에서 제안된 두 단계 피드백 방식보다도 낮은 평균 피드백 비트 수로 동작함을 보여준다.

그림 2는 제안된 기법과 기존의 SUS기법의 주파수 효율을 비교하고 있다. 제안된 기법을 통해 얻을 수 있는 피드백 감소효과(그림 1)에 비해 제안된 기법이 가지는 성능 손실은 크지 않다. 공정한 비교를 위해

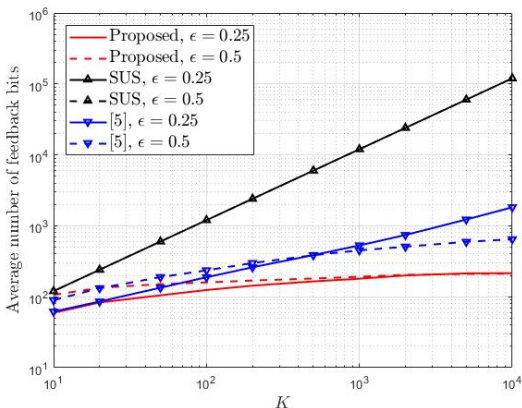


그림 1. 평균 피드백 비트수.  
Fig. 1. Average number of feedback bits.

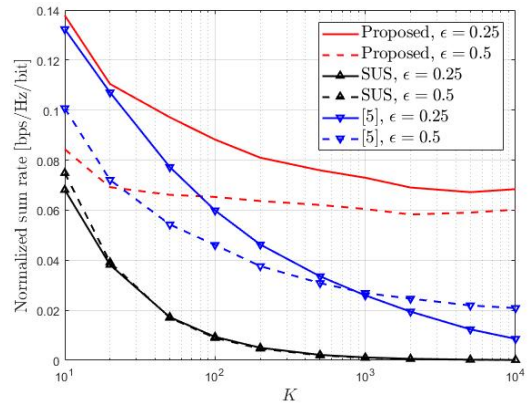


그림 2. 주파수 효율/평균 피드백 비트수  
Fig. 2. Sum rate normalized by average number of feedback bits.

그림 2에서는 주파수효율을 피드백 비트수에 대해 정규화(normalize)하였다.  $K$ 가 증가하면 SUS기법은 단위 비트의 주파수 효율이 0으로 수렴하는데 반해, 제안하는 기법은 일정 레벨의 주파수 효율을 보장한다. 극단적인 경우로  $K$ 가 무한대로 발산한다고 가정하면, 제안하는 기법이 기존의 SUS에 비해 무한대의 이득을 보임을 알 수 있다. 또한, 그림 2는 제안하는 기법이 [5]에서 제안된 두 단계 기법에 비해서도 높은 효율을 보임을 보여준다. 유저 수가 20명 이하인 부분에서 [5]의 두 단계 기법이 가장 높은 효율을 보이는 구간이 있으나, 스케줄링 기법이 높은 다중 사용자 이득을 얻기 위한 것임을 감안하면,  $K$ 가 클 때의 성능이 보다 중요한 의미를 가진다.

#### V. 결론

본 논문에서는 기회적 피드백 방법을 기반으로 MU-MIMO 시스템의 피드백 양을 효율적으로 줄이는 방법을 제안하였다. 본 논문에서는 비교적 간단한 구조를 실험적으로(heuristic)고려하여 알고리즘을 제안하고 있다. 제안하는 알고리즘은 시스템 전체의 피드백 양을 효율적으로 줄여, 기존의 기법들에 비해 단위 피드백 비트 대비 높은 주파수 효율을 얻을 수 있었다. 하지만 제안하는 기법은 매 단계마다 기지국으로부터 유저로 피드포워드(feed forward)되는 정보가 필요하기 때문에, 기존에 비해 많은 회수의 handshaking을 요구 한다. 즉, 제안하는 기법은 보다 상위 계층에서 추가적인 컨트롤 정보의 교환이 필요하며, 이 과정에서 지연 등의 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 향후에는 프로토콜 측면에서 제안하는 기

법의 성능 및 장단점을 분석할 필요가 있다. 또한, 본 논문에서 제안하는 구조를 활용하면 제안하는 기법의 이론적인 성능분석이나 임계치의 최적화 등도 고려해 볼 수 있다.

## References

- [1] 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, Mar. 2006.
- [2] N. Jindal, "MIMO broadcast channels with finite-rate feedback," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 11, pp. 5045-5060, Nov. 2006.
- [3] T. Yoo, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Multi-antenna downlink channels with limited feedback and user selection," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 7, pp. 1478-1491, Sept. 2007.
- [4] M. Jung and S. Choi, "Optimal numbers of base station antennas and users in multiuser massive MIMO systems with pilot overhead," *J. KICS*, vol. 41, no. 11, pp. 1630-1638, Nov. 2016.
- [5] M. Min, D. Kim, and G. H. Im, "Opportunistic two-stage feedback and scheduling for MIMO downlink systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 1, pp. 312-324, Jan. 2013.