

논문 2010-47TC-2-4

사용자 제한을 이용한 양자화된 채널 상태 정보를 갖는 공간 분할 다중 접속 방식의 되먹임 감소 기법

(Feedback Reduction Scheme of SDMA with Quantized CSI using User Restriction)

서우현**, 박성수*, 민현기*, 홍대식***

(Woohyun Seo, Sungsoo Park, Hyunkee Min, and Deasik Hong)

요약

양자화된 채널 상태 정보를 이용하는 공간 분할 다중 접속 방식은 제한된 되먹임 정보로도 다중 송신의 이득을 가질 수 있다. 그러나 되먹임 정보의 양은 사용자에게 따라 선형적으로 증가하기 때문에, 공간 분할 다중 접속 방식은 제한된 되먹임 방식을 사용하더라도 여전히 높은 신호처리 부담을 갖게 된다. 그러므로 본 논문에서는 대상이 되는 사용자 수를 효과적으로 제어할 수 있는 새로운 되먹임 방식을 제안한다. 제안하는 방식에서는 성능 열화 없이 되먹임 정보량을 줄이기 위해, 되먹임 요청 기준 조건을 제시하고 이에 미치지 못하는 열악한 통신 환경의 사용자들을 제한한다. 본 논문의 모의 실험에서는 제안하는 방식이 전송 효율 이득을 높일 뿐만 아니라 되먹임 정보를 합리적으로 감소시킬 수 있음을 보여준다.

Abstract

Introducing the quantized channel state information (CSI), space division multiple access (SDMA) can extract the multiplexing gain with the limited feedback burden. However, huge signaling burden of feedback can still suffer SDMA system because the total feedback data of SDMA is linearly dependent on the number of users. Hence, we propose a new feedback scheme to control the feedback load decided by the number of users. In this scheme, the cut-off level, which restricts the feedbacks of poor conditioned users, is suggested for the reduction of the feedback burden without the performance loss. From simulation results, then, we show that the proposed feedback scheme can achieve not only the sum-rate gain but also the reasonable feedback reduction.

Keywords : SDMA, Feedback reduction, User restriction

I. 서론

공간 분할 다중 접속 기법은 다중 사용자의 데이터를 하나의 채널로 동시에 전송할 수 있는 장점을 갖고 있기 때문에 스펙트럼 효율을 증대시키기 위한 최적의 기

법 중 하나로 주목 받고 있다^[1]. DPC(Dirty Paper Coding)는 공간 분할 다중 접속 기법에 있어서 최상의 채널 용량을 얻을 수 있는 방식으로 알려져 있지만^[2], 이 방법은 높은 복잡도로 인해 실제 시스템에서 구현이 불가능하다^[3]. 이러한 이유로 인해, Tomlinson-Harashima 프리코딩과 같은 복잡도가 줄어든 방식이 공간 분할 다중 접속 기법의 구현을 위해 제안되었다^[4]. 하지만, 이러한 기법의 성능은 채널 상태 정보의 정확도에 매우 민감하기 때문에 우수한 성능을 얻기 위해서는 채널 상태 정보의 정확도 또한 높아야 한다. 따라서 주파수 혹은 시간 자원의 엄격한 제약 조건이 존재하는 이동통신 시스템에서는 이와 같은 기법을 활용하기 때

* 학생회원, ** 정회원, *** 평생회원, 연세대학교 전기전자공학부

(Dept. of Electrical and Electronic Engin., Yonsei University)

※ 이 논문은 한국과학재단이 주관하는 국가지정연구실사업(NRL:ROA-2007-000-20043-0)의 지원을 받아 연구되었음.

접수일자: 2009년10월12일, 수정완료일: 2010년2월17일

우 어렵게 된다^[5].

만약 기지국과 사용자가 미리 디자인 된 동일한 코드 북을 보유 할 수 있다면, 양자화된 채널 상태 정보의 되먹임 기법을 되먹임 데이터의 감소 방식으로 사용하여 공간 다중 분할 접속 기법의 좀 더 실제적인 활용을 도모할 수 있다^[6-9]. 이 기법에 있어서 사용자들은 채널 벡터와 가장 유사한 코드 벡터의 번호와 SINR(signal-to-interference and noise ratio)정보를 전송하게 된다. 동시에 빔포밍과 스케줄링을 사용하여 다중 사용자 다이버시티를 얻을 수 있으며, 사용자가 많을수록 이 기법의 성능은 DPC에 접근하게 된다.

사용자가 증가한다는 가정은 스케줄링을 포함한 공간 다중 분할 접속 기법의 성능을 높이는데 유리하지만, 되먹임 데이터의 합이 사용자 수에 선형적으로 증가하기 때문에 되먹임 데이터의 양을 크게 증폭시킬 가능성이 있다. 다시 말해서 양자화된 채널 상태 정보 되먹임 방식을 이용하게 되면 사용자 당 데이터는 줄일 수 있다 하더라도, 사용자가 너무 많게 되면 총 되먹임 데이터는 여전히 큰 역방향 자원을 필요로 하게 된다는 것이다. 더군다나 열악한 통신 환경에 있는 사용자들은 되먹임 채널의 사용으로 인해 역방향 자원을 소비하고 있음에도 불구하고 시스템의 전송 효율을 증가시키는데 별 도움을 주지 못한다. 따라서 좀 더 효율적인 통신 시스템 구축을 위해서는 통신 환경이 매우 열악한 사용자들의 되먹임 정보를 제어하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 공간 분할 다중 접속 방식의 성능 열화 없이 되먹임 데이터를 줄일 수 있는 새로운 기법을 제안하고자 한다. 제안하는 되먹임 기법에서는 되먹임 요청 기준을 정의하는데, 이것은 채널 벡터와 코드 벡터 사이의 큰 왜곡을 갖는 사용자들의 되먹임을 제한하는 데에 이용된다. 이 때 제시된 기준의 사용을 통해 공간 분할 다중 접속 방식의 전송 효율을 증가시킬 수 있도록, 성능을 결정하는 주요 인자들로부터 합리적인 되먹임 요청 기준을 유도하게 된다. 이러한 되먹임 요청 기준을 이용할 때 통신 환경이 크게 열악한 사용자들의 되먹임 요청을 제한할 수 있으므로, 공간 분할 다중 접속 방식의 성능 개선뿐만 아니라 되먹임 데이터 감소의 효과도 기대할 수 있게 된다.

II. 시스템 모델 및 스케줄링 알고리즘

1. 시스템 모델

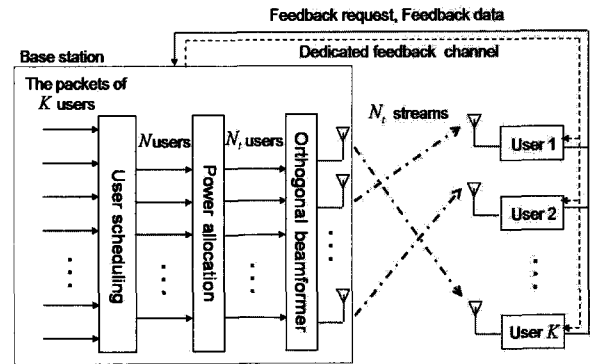


그림 1. 양자화된 채널 상태 정보를 되먹임 하는 유니터리 기반의 공간 분할 다중 접속 방식의 시스템 모델

Fig. 1. The system model of unitary matrix based SDMA with the quantized CSI feedback.

그림 1은 N 개의 안테나를 갖는 매크로 기지국에 대한 FDD(frequency division duplex) 시스템의 순방향 빔포밍 전송 구조를 보여주고 있다. 여기에서는 1개의 안테나를 갖는 K 명의 사용자를 고려하며, 모든 사용자는 주파수와 시간 축에 관한 스케줄링을 사용하고 있다고 가정한다. $K > N$ 의 조건을 가정할 때, 기지국은 일반적으로 최대 N 명에게 독립적인 공간적 채널을 제공할 수 있기 때문에, 스케줄링 기법은 빔포밍 기법과 함께 K 명의 사용자 중에서 가장 좋은 채널 상태에 있는 N 명의 사용자를 선택해야 한다. 이를 위해서는 채널 상태 정보의 전송을 위한 역방향 되먹임 채널이 필요하게 된다. 하지만, 역방향 되먹임 채널은 스펙트럼 효율을 높이는데 큰 걸림돌이 될 수 있으므로, 본 논문은 되먹임 정보에 대한 데이터를 감소시킬 수 있는 새로운 기법의 제안을 주목적으로 한다.

역방향 자원을 효율적으로 관리하기 위해, 기지국은 각 사용자에게 되먹임을 위한 특정 채널을 할당한다고 가정한다. 따라서 각 사용자는 기지국에 자신의 채널 상태 정보를 전송하기 위해 자신만의 특정 채널을 요청해야 한다. 각 사용자당 β 의 되먹임 데이터가 필요하다고 할 때, 성능 열화 없이 β 를 감소시키는 것은 공간 분할 다중 접속 방식의 설계에 있어서 해결해야 할 가장 중요한 문제 중 하나이다. 이 때 유니터리 행렬을 바탕으로 한 양자화된 채널 상태 정보의 되먹임 방식은 위와 같은 시스템 설계에 대한 문제의 해결점 중 하나로서 제시할 수 있다^[12]. 이 방식에서는 N 개의 채널이 직교 빔 가중치를 이용하기 때문에 빔 사이의 간섭을 최소화 할 수 있다. 가장하고 있는 방식 하에서 적은 복

잡도로 높은 성능을 얻기 위하여 본 논문에서는 RVQ(Random vector quantization)를 코드북 발생 방식으로 선택한다^[6].

만약 x 와 \mathbb{K} 가 각각 사용자들의 모든 전송 신호의 합과 스케줄링 된 사용자들의 집합이라고 한다면, 사용자 k 의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_k = h_k \cdot x + z_k, \quad k \in \mathbb{K} \quad (1)$$

여기에서 z_k 는 0과 N_o 를 평균과 분산으로 갖는 AWGN이다. $h_k \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 는 기지국과 사용자 k 사이의 채널 벡터이고, 각 채널을 사용자에게 대해서 분산 1을 갖는 i.i.d.(independent and identical distribution) 블럭 레일리 페이딩으로 모델링 한다. 그래서 채널 이득의 평균은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E[\alpha_k] = N \quad (2)$$

위의 식에서 α_k 는 $\|h_k\|^2$ 로 정의한다.

스케줄링 기법을 사용하는 시스템에서 동일 전력 할당 방식은 water-filling을 기반으로 한 최적의 전력 할당 방식과 비교할 때 거의 유사한 채널 용량을 갖게 된다^[13-14]. 이러한 이유로 본 논문에서는 복잡도가 적은 동일 전력 할당 방식을 사용한다. 이를 바탕으로 사용자 k 의 전송 전력과 전송 데이터 심볼을 각각 P 와 s_k 라 할 때, 전송 신호는 다음과 같다.

$$x = \sqrt{\frac{P}{N_t}} \sum_{u \in \mathbb{K}} w_u s_u \quad (3)$$

여기에서 N_t 는 \mathbb{K} 에 존재하는 사용자의 수이고, $w_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 사용자 k 의 프리코딩 가중치 벡터를 의미한다. (3)에서 데이터 심볼과 프리코딩 가중치 벡터는 $E[|s_k|^2] = 1$ 뿐만 아니라 다음과 같은 제한 조건을 갖게 된다.

$$|w_u^\dagger \cdot w_k| = \begin{cases} 1, & k = u \\ 0, & k \neq u \end{cases} \quad (4)$$

위의 식에서 \dagger 는 켈레 전치 벡터 혹은 행렬의 연산을 뜻한다. 이 때 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_k = \sqrt{\frac{P}{N_t}} h_k w_k s_k + \sqrt{\frac{P}{N_t}} h_k \sum_{\substack{u \in \mathbb{K} \\ u \neq k}} w_u s_u + z_k \quad (5)$$

2. 유니터리 행렬 기반 공간 분할 다중 접속 방식의 스케줄링

본 소파트에서는 몇 개의 잘 알려진 논문들^[7-9]을 바탕으로 양자화된 채널 상태 정보 되먹임 방식을 사용하는 유니터리 행렬 기반의 공간 분할 다중 접속 방식과 그에 따른 스케줄링 알고리즘에 대해 간단히 리뷰하려고 한다. 이를 좀 더 간단히 서술하기 위해서 먼저 세 가지에 부분을 대해 가정한다. 우선 본 소파트에서는 채널 추정 오류에 대한 분석 보다는 공간 분할 다중 접속 방식의 스케줄링에 대해 알아보는 것이 주목적이므로, 사용자들은 채널 추정을 오류 없이 할 수 있다고 가정한다. 더불어 채널 상태 정보는 에러와 지연 없이 기지국으로 되먹임 될 수 있다고 가정한다. 마지막으로 기지국과 사용자들은 동일한 코드북을 갖고 있다는 것을 고려한다.

일반적으로 유니터리 행렬 기반의 공간 분할 다중 접속 방식에서는 코드북이 M 개의 유니터리 행렬로 구성되어 있다고 할 수 있고, 이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_M] \quad (6)$$

(6)에서 각각의 유니터리 행렬은 N 개의 정규화된 직교 벡터들로 구성되어 있으므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_m = [c_1^m, c_2^m, \dots, c_N^m] \quad (7)$$

여기에서 $c_n^m \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 번째 유니터리 행렬의 번째 코드 벡터이다. (6)과 (7)로부터 코드북의 크기는 $|C| = NM$ 가 된다. 이 때 h_k 의 정의를 이용하여 사용자 의 채널은 다음과 같이 분리될 수 있다.

$$h_k = \sqrt{\alpha_k} \cdot \bar{h}_k \quad (8)$$

위의 식에서 \bar{h}_k 는 채널 형상 벡터로서 $h_k / \|h_k\|$ 로 표현된다.

양자화된 채널 상태 정보를 되먹임 하는 방식에 있어서 각각의 사용자는 기지국으로 1개의 코드 벡터 번호만을 전송할 수 있고, 기지국은 사용자로부터 지정된 코드 벡터를 이용해 복소수로 표현되는 채널 벡터 정보를 대체해서 전송 가중치 벡터를 생성하게 된다. 만약 \bar{h}_k 와 c_n^m 사이의 왜곡을 양자화 오류라고 정의한다면, 양자화 오류는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta_{\bar{h}_k, c_n^m} = 1 - |\bar{h}_k \cdot c_n^m| \quad (9)$$

위의 식에서 $\Delta_{\bar{h}_k, c_n^m}$ 가 0이 아닐 때, 사용자 k 는 연제나 간섭 신호를 겪게 되고, 본 논문에서는 이것을 비연접 간섭이라고 정의한다. 비연접 간섭의 크기는 $\Delta_{\bar{h}_k, c_n^m}$ 에 의해 결정되므로^[8], \bar{h}_k 에 가장 근접한 코드 벡터의 선택은 이 간섭을 줄이는 데 매우 효과적인 방법이 된다. 그러므로 사용자는 스케줄링에 사용될 되먹임 정보를 전송하기 전에 $\Delta_{\bar{h}_k, c_n^m}$ 를 최소화 하기 위한 최적의 코드 벡터의 선택을 다음과 같이 하게 된다.

$$\forall k, \Delta_{\bar{h}_k, c_n^{\hat{m}}} = \min_{\substack{1 \leq m \leq M \\ 1 \leq n \leq M}} \Delta_{\bar{h}_k, c_n^m} \\ l_k \leftarrow \arg \min_{\substack{1 \leq m \leq M \\ 1 \leq n \leq M}} \Delta_{\bar{h}_k, c_n^m} \quad (10)$$

식 (10)에서 l_k 는 사용자 k 에 의해 선택된 최적의 코드 벡터 $c_n^{\hat{m}}$ 에 대한 인덱스를 의미한다.

양자화된 채널 상태 정보의 되먹임 데이터는 l_k 와 함께 SINR이나 채널 이득과 같은 추가적인 정보를 포함할 수 있다. 되먹임의 데이터 양이 고정되어 있다고 한다면, 위의 정보들 중에서 SINR을 포함할 때 공간 분할 다중 접속 방식은 더 높은 전송률을 얻을 수 있게 된다^[8]. 만약 안테나 당 SNR(signal-to-noise ratio)가 $\eta = P/(N \cdot N_o)$ 라면, 사용자 k 의 SINR은 식 (10)의 l_k 를 이용해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$SINR_k = \frac{\eta \cdot \alpha_k \cdot (1 - \Delta_{\bar{h}_k, c_n^{\hat{m}}})}{1 - \eta \cdot \alpha_k \cdot \Delta_{\bar{h}_k, c_n^{\hat{m}}}}, \hat{n}, \hat{m} \in l_k \quad (11)$$

SINR 정보의 양자화에 필요한 비트 크기를 b 라고 할 때, l_k 와 $SINR_k$ 를 전송하기 위해 필요한 사용자당 데이터 량은 다음과 같다.

$$\beta = \log_2(NM) + b \quad (12)$$

일단 l_k 와 $SINR_k$ 가 모든 사용자로부터 기지국으로 전송되고 나면, 기지국은 사용자 k 의 되먹임 데이터에서 l_k 에 의해 지정된 코드 벡터의 SINR을 복구하게 된다. 이 정보를 $\gamma_{\hat{n}, k}^{\hat{m}}$ 로 정의하면, 스케줄링 알고리즘에 의해 기지국은 각 코드 벡터마다 가장 큰 SINR을 갖는 사용자를 다음과 같은 방법으로 찾아낸다.

$$\forall k, \gamma_{\hat{n}, \kappa_n^{\hat{m}}}^{\hat{m}} = \max_{1 \leq k \leq K} \gamma_{\hat{n}, k}^{\hat{m}}, \\ \kappa_n^{\hat{m}} \leftarrow \arg \max_{1 \leq k \leq K} \gamma_{\hat{n}, k}^{\hat{m}} \quad (13)$$

여기에서 $\kappa_n^{\hat{m}}$ 는 \hat{m} 번째 유니터리 행렬의 \hat{n} 번째 코드 벡터에서 가장 큰 SINR을 갖는 사용자 인덱스를 뜻한다. 유니터리 기반 공간 분할 다중 접속 방식에서는 하나의 유니터리 행렬을 사용할 때에만 빔 간의 직교성을 유지할 수 있기 때문에, achievable sum-rate를 최대화시킬 수 있는 하나의 유니터리 행렬을 다음과 같이 선택한다.

$$\bar{m} = \arg \max_{1 \leq \hat{m} \leq M} \left[\sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \gamma_{\hat{n}, \kappa_n^{\hat{m}}}^{\hat{m}} \right) \right] \quad (14)$$

최종적으로 기지국은 \bar{m} 번째 유니터리 행렬의 모든 코드 벡터에서 선택된 사용자 $\kappa_n^{\bar{m}}$ 에게 전송 전력을 할당한다.

다중 안테나 시스템에서 스케줄링 된 사용자의 수 N_t 는 최대 N 까지 증가할 수 있지만, 실질적으로 이것은 되먹임 하는 사용자의 수에 따라 달라지게 된다. 만약 되먹임 사용자의 수가 작다면, 각 유니터리 행렬에서 일부의 코드 벡터들만 사용자들의 되먹임 정보를 갖고 있을 가능성이 높다. 이 경우에 되먹임 정보가 없는 코드 벡터에는 전송 전력을 할당하지 않는 것이 좀 더 현명한 방법이라 할 수 있고^[9], N_t 는 줄어들게 된다. 반대로 되먹임 사용자 수가 많다면, 모든 코드 벡터에서 사용자로부터 되먹임 된 정보가 충분히 존재하고, N_t 는 N 이 되는 조건에서 achievable sum-rate가 최대화된다.

III. 공간 분할 다중 접속 방식을 위한 사용자 제한 방식

양자화된 채널 상태 정보를 이용하는 공간 분할 다중 접속 방식에 관한 한 되먹임 데이터를 줄이는 것은 스펙트럼 효율성을 높이는 데에 매우 중요한 부분이 된다. 그래서 본 논문에서는 되먹임 데이터를 줄이기 위한 사용자 제한 방식을 제안한다. 이를 위해 많은 되먹임 사용자가 존재한다는 가정하에 공간 분할 다중 접속 방식의 achievable ergodic sum-rate를 먼저 유도하고, 이것을 증대시킬 수 있는 되먹임 방식에 대해 전개한다.

1. 양자화된 채널 상태 정보 되먹임을 이용하는 공간 분할 다중 접속 방식의 achievable ergodic sum-rate

양자화된 채널 상태 정보 되먹임을 이용하는 공간 분할 다중 접속 방식의 achievable ergodic sum-rate을 간단히 유도 하기 위해 먼저 2가지 가정을 한다. 첫 번째로 기지국으로 되먹임 하는 사용자가 많이 존재한다고 가정한다. 위에서 언급하였듯이 이 가정을 통해 N_t 는 N 과 동일하게 된다. 또한 α_k 와 $\Delta_{\bar{h}_k, c_n^m}$ 는 연관성이 없다는 것을 가정한다. 이는 식 (8)에서 h_k 로부터 \bar{h}_k 가 독립적으로 α_k 와 분리되고, 식 (9)에서 $\Delta_{\bar{h}_k, c_n^m}$ 는 \bar{h}_k 와 c_n^m 로 부터 계산되기 때문이다.

식 (14)에서 스케줄링 된 사용자 κ_n^m 에 대해서, \bar{m} 번째 유니터리 행렬의 번째 코드벡터에서 SINR이 다음과 같다면,

$$SINR_{\kappa_n^m} = \frac{\eta \cdot \alpha_k \cdot \left(1 - \Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m}\right)}{1 - \eta \cdot \alpha_k \cdot \Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m}} \quad (15)$$

achievable sum-rate는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R = \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{\eta \cdot \alpha_k \cdot \left(1 - \Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m}\right)}{1 - \eta \cdot \alpha_k \cdot \Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m}} \right) \quad (16)$$

식 (16)을 바탕으로 achievable ergodic sum-rate는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbb{R} &= E \left[\sum_{n=1}^N \log_2 \left(\frac{1 + \eta \cdot \alpha_k}{1 - \eta \cdot \alpha_k \cdot \Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m}} \right) \right] \\ &= N \cdot E \left[\log_2 \left(\frac{1 + \eta \cdot \alpha_k}{1 - \eta \cdot \alpha_k \cdot \Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m}} \right) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)은 쉽게 다음의 식으로 변환된다.

$$\begin{aligned} \mathbb{R} &= N \cdot E \left[\log_2(1 + \eta \cdot \alpha_k) \right] \\ &\quad - N \cdot E \left[\sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 - \eta \cdot \alpha_k \cdot \Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m} \right) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)로부터 Jensen's inequality를 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbb{R} &\leq N \cdot \log_2(1 + \eta \cdot E[\alpha_k]) \\ &\quad - N \cdot \log_2 \left(1 + \eta \cdot E \left[\alpha_k \cdot \Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m} \right] \right) \\ &\leq N \cdot \log_2(1 + \eta \cdot E[\alpha_k]) \\ &\quad - N \cdot \log_2 \left(1 + \eta \cdot E[\alpha_k] \cdot E \left[\Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m} \right] \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$\alpha_{\kappa_n^m}$ 와 $\Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m}$ 는 연관성이 없다고 이미 가정하였기 때문에 식 (19)의 두 번째 줄은 쉽게 유도가 가능하다. 위의 식에서 $\alpha_{\kappa_n^m}$ 에 관한 기대값은 다중 사용자 다이버시티에 관한 근사적 분석 결과^[15~16]를 이용하여 간단히 표현 가능하므로, 식 (18)은 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbb{R} &\leq N \cdot \log_2(1 + N \cdot \eta \cdot \ln(k)) \\ &\quad - N \cdot \log_2 \left(1 + N \cdot \eta \cdot \ln(k) \cdot E \left[\Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m} \right] \right) \end{aligned} \quad (20)$$

만약 $E[\Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m}]$ 가 0으로 접근한다면, 공간 분할 다중 접속 방식은 N 개의 직교 다중 채널을 갖고 있는 다중 사용자 시스템의 채널 용량과 동일한 achievable ergodic sum-rate를 갖게 되고, 이것이 이 방식으로 얻을 수 있는 최적의 채널 용량이라 할 수 있다. 더군다나, K 와 η 는 식 (20)의 sum-rate에서 공통적으로 포함되어 있는 반면에, $E[\Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m}]$ 는 sum-rate의 뒷 부분에만 포함되어 있다. 이것은 SNR과 다중 사용자 다이버시티 이득이 크다 할지라도 $E[\Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m}]$ 가 크면, 그 사용자는 좋은 sum-rate를 기대하기 힘들다는 것을 의미한다. 결과적으로 새로운 되먹임 방식이 $E[\Delta_{\bar{h}_{\kappa_n^m}, c_n^m}]$ 를 제어할 수 있다면, 되먹임 데이터 양을 줄이면서도 성능 열화를 방지할 수 있다.

2. 공간 분할 다중 접속 방식을 위한 되먹임 제한 기법

식 (20)으로부터 언급된 것과 같이, 큰 양자화 오류를 갖게 되는 사용자는 다른 환경 조건과 상관없이 낮은 achievable ergodic sum-rate을 얻을 가능성이 높게 된다. 따라서 이 사용자가 되먹임 채널에 대한 요청을 기지국으로 하지 않는다면 공간 분할 다중 접속 방식의 성능을 열화 시키지 않으면서도 되먹임 데이터를 줄일 수 있게 된다. 그러므로 본 논문에서는 이와 같은 원리를 이용하여 새로운 기법을 제안하고자 한다. 이 기법

에서 모든 사용자는 Ω_c 로 정의되는 양자화 오류에 대한 되먹임 요청 기준을 갖게 된다. 만약 식 (10)으로부터 $\Omega_c < \Delta_{\hat{h}_k, \hat{c}_k^m}$ 의 조건이 만족한다면, 사용자 k 는 기지국에 되먹임을 위한 채널을 요청하지 않게 된다. 다시 말해서 제안하는 기법에서는 각 사용자는 큰 비연접 간섭이 예상될 경우 채널 상태 정보를 전송하기 위한 되먹임 채널의 요청 자체를 하지 않는 것이다.

제안하는 기법에서 Ω_c 를 결정하는 것은 무엇보다 중요하다 할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 비연접 간섭으로부터 성능이 열화 되는 것을 방지하기 위한 개념적이고 기본적인 조건을 제시한다. 공간 분할 다중 접속 방식의 경우, 큰 $\Delta_{\hat{h}_k, \hat{c}_k^m}$ 로 인해 비연접 간섭 또한 커진다면, 공간 분할 다중 접속 방식은 다른 직교 분할 전송 방식보다 열화 된 성능을 얻을 수 있고, 이 경우 다중 사용자의 동시 전송에 대한 장점이 사라지게 된다. 다시 말해서 공간 분할 다중 접속 방식의 achievable ergodic sum-rate가 단일 사용자 전송을 지원하는 다른 직교 분할 전송 방식의 achievable ergodic sum-rate보다 커야 한다는 것이다. 특히 되먹임 대상이 되는 사용자의 수가 적을 경우 비연접 간섭이 급격히 커질 수 있기 때문에, 제안하는 되먹임 기법은 되먹임 데이터를 줄일 뿐만 아니라 성능 개선의 효과도 얻을 수 있게 된다.

위의 조건을 만족시키는 Ω_c 를 유도하기 위해 공간 분할 다중 접속 방식과 다른 직교 분할 다중 접속 방식의 achievable ergodic sum-rate에 대해 비교해보는 것이 필요하다. 이 때 식 (19)를 이용하여 Ω_c 는 다음과 같은 식으로 결정될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \log_2(1 + N \cdot \eta \cdot \ln(k)) \\ & \leq N \cdot \log_2(1 + N \cdot \eta \cdot \ln(k)) \\ & - N \cdot \log_2(1 + N \cdot \eta \cdot \ln(k) \cdot \Omega_c) \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)을 만족하는 Ω_c 는 다음과 같다.

$$\Omega_c = \frac{\left[(1 + N \cdot \eta \cdot \ln(k))^{\frac{N-1}{N}} - 1 \right]}{N \cdot \eta \cdot \ln(k)} \quad (22)$$

식 (22)의 Ω_c 를 바탕으로 $\Delta_{\hat{h}_k, \hat{c}_k^m}$ 를 갖는 사용자 k 의 되먹임 요청은 아래의 식이 만족할 때 제한된다.

$$\Omega_c < \Delta_{\hat{h}_k, \hat{c}_k^m}, \quad \hat{n}, \hat{m} \in l_k \quad (23)$$

위의 식에서 l_k 는 식 (11)에서 결정된다. 만약 모든 사용자의 되먹임 요청이 식 (24)에 의해서 컷-오프 되면 기지국은 공간 분할 다중 접속 방식을 배제하고 직교 분할 다중 접속 방식을 적용하게 된다.

IV. 모의 실험

본 모의 실험에서는 되먹임 요청 기준을 갖는 되먹임 방식의 성능을 기존의 방식과 비교하여 평가한다. 이 모의 실험을 위해 기지국은 4개의 안테나를 갖고, SINR 정보는 3bit로 양자화 되는 것을 가정한다. 실험의 편의를 위해서 모든 사용자는 갖는 SNR을 갖는다고 가정한다. 또한 본 모의 실험에서는 제안한 기법과 기존 기법을 각각 FRS(Feedback request criterion scheme)과 PRS(Previous scheme)로 줄여서 표현한다.

그림 2는 코드북의 크기 $|C|$ 가 4와 32이고 SNR이 10dB일 때, FRS와 PRS를 갖는 공간 분할 다중 접속 방식들의 성능을 사용자의 수에 대해 비교해 본 그래프이다. 본 모의 실험의 모든 결과에서 실선과 점선은 각각 $|C|$ 가 4와 32임을 의미한다. 그림 2에서 FRS는 Ω_c 에 의해 되먹임 양이 제한되고 있다 하더라도 PRS의 성능과 비교하였을 때 우수하거나 거의 동일한 결과를 갖고 있다. 이것은 FRS가 Ω_c 를 통해 비연접 간섭이 큰 사용자를 효율적으로 차단시키기 때문이다. $|C|$ 가 커질 때 FRS와 PRS의 성능이 동일한 것은 비연접 간섭은

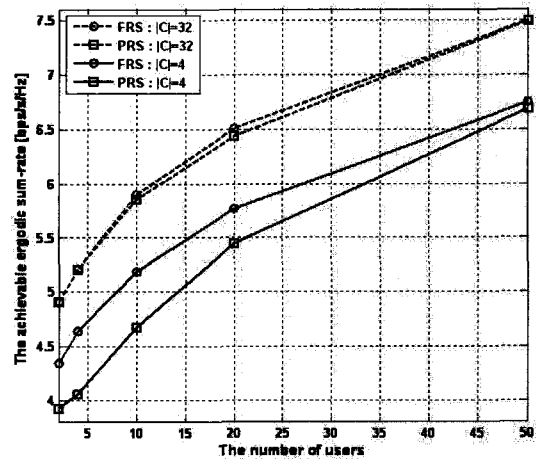


그림 2. 10dB SNR에서 $|C|=4, 32$ 일 때, 사용자의 수에 따른 FRS와 PRS의 achievable ergodic sum-rate

Fig. 2. Achievable ergodic sum-rates of FRSs and PRSs with $|C|=4, 32$ over K in 5dB SNR.

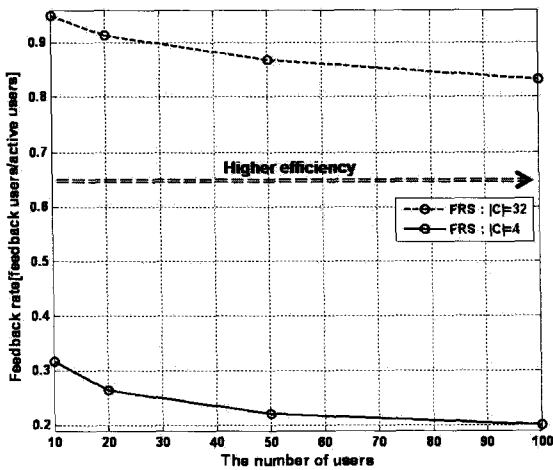


그림 3. 10dB SNR에서 $|C|=4, 32$ 일 때, 사용자의 수에 따른 FRS의 되먹임 비율
 Fig. 3. The feedback ratios of FRSs with $|C|=4, 32$ over K in 5dB SNR.

$|C|$ 가 커짐에 따라 점차적으로 줄어들기 때문이다. 앞에서 Ω_c 의 유도를 위해 되먹임 대상이 되는 사용자의 수가 많은 것을 가정하였지만, FRS는 PRS에 대해 작은 사용자 수에서도 향상된 achievable ergodic sum-rate를 얻는 것을 볼 수 있다.

그림 3은 그림 2와 동일한 조건에서 사용자의 수에 따른 제안하는 FRS의 되먹임 비율을 보여주고 있다. 여기에서 되먹임 비율이란 전체 사용자 중 실제로 되먹임 요청을 하는 사용자의 비율을 뜻한다. 식 (23)을 고려할 때, 사용자의 수가 커지게 되면 Ω_c 은 $\ln(K)$ 의 영향으로 인해 크기가 작아지게 된다. 그 결과 사용자의 양자화 오류는 더 엄격히 제한되고, 되먹임 비율 또한 줄어들게 된다.

그림 4는 $|C|$ 가 4와 32이고 사용자의 수가 50명 일 때, SNR에 따른 FRS와 PRS의 성능을 비교하고 있다. SNR이 증가할수록 시스템은 간섭에 더 큰 영향을 받는 환경이 되고 공간 분할 다중 접속 방식의 성능은 잡음 보다 비연접 간섭에 민감한 반응을 보이게 된다. 식 (23)으로부터 FRS의 Ω_c 는 SNR이 커질수록 더 엄격한 기준이 되므로, 되먹임 채널을 요청하는 사용자들은 더 작은 비연접 간섭만을 겪게 된다. 이러한 이유로 인해 PRS의 성능은 SNR이 커지더라도 비연접 간섭으로 인한 한계에 도달하는 반면에 FRS의 achievable ergodic sum-rate는 SNR과 동시에 증가하게 된다.

그림 5는 그림 4와 동일한 조건에서 SNR에 따른 되

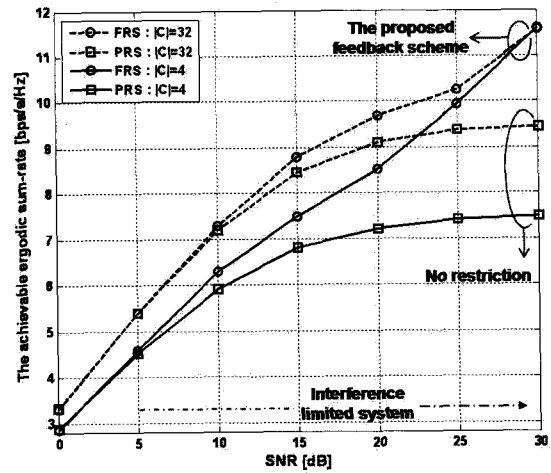


그림 4. $|C|=4, 32$ 에서 사용자가 50명일 때, SNR에 따른 FRS와 PRS의 achievable ergodic sum-rate
 Fig. 4. Achievable ergodic sum-rates of FRSs and PRSs with $|C|=4, 32$ over SNR in $K=40$.

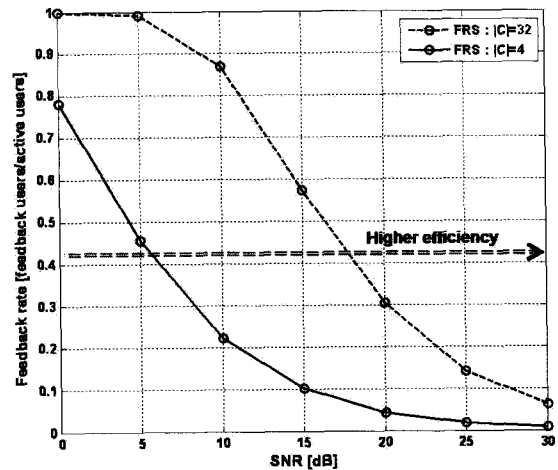


그림 5. $|C|=4, 32$ 에서 사용자가 50명일 때, SNR에 따른 FRS의 되먹임 비율
 Fig. 5. The feedback ratios of FRSs with $|C|=4, 32$ over SNR.

먹임 비율을 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이, SNR이 증가할수록 FRS는 식 (23)에 따라 더 엄격하게 사용자의 되먹임을 제한하게 된다. SNR이 5dB보다 큰 구간에서 제안 기법의 되먹임 비율은 급격하게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 특히 SNR이 25dB보다 크다면 사용자의 15%이하만이 되먹임 요청을 하게 된다.

위의 결과들은 종합해볼 때 제안 기법인 FRS는 기존 기법인 PRS에 비해 되먹임 데이터 량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 성능 개선의 효과도 가질 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 스펙트럼 효율을 증가시키기 위한 효율적인 되먹임 방식을 제안하였다. 제안된 FRS은 공간 분할 다중 접속 방식의 achievable ergodic sum-rate의 유도를 바탕으로 하여 양자화 오류로 인한 비연접 간섭과 되먹임 데이터 양을 동시에 제어할 수 있었다. 모의 실험을 통해 FRS의 성능은 기존 기법인 PRS의 성능에 비해 크게 줄어든 되먹임 데이터로도 개선될 수 있음을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] P. Viswanath and D. Tse, "Sum capacity of the vector Gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality", *IEEE Trans. on Info. Theory*, vol. 49, no. 8, pp.1912-1921, Aug. 2003.
- [2] M. Costa, "Writing on dirty paper", *IEEE Trans. on Info. Theory*, vol. 29, no. 3, pp.439-441, May 1983.
- [3] N. Jindal and A. Goldsmith, "Dirty-paper coding versus TDMA for MIMO broadcast channels", *IEEE Trans. on Info. Theory*, vol. 51, no. 5, pp.1783-1794, May 2005.
- [4] Q. H. Spencer, C. B. Peel, A. L Swindlehurst, and M. Haardt, "An introduction to the multi-user MIMO downlink", *IEEE Comm. Magazine*, vol. 42, no. 10, pp.60-67, Oct. 2004.
- [5] W. Seo, M. Cho, T. Yu, and D. Hong, "A new full-band feedback scheme using the adaptive grouping method in OFDMA systems", *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 7, no. 6, pp.1982-1986, June 2008.
- [6] N. Jindal, "MIMO broadcast channels with finite-rate feedback", *IEEE Trans. on Info. Theory*, vol. 52, no. 11, pp.5045-5060, Nov. 2006.
- [7] M. Sharif and B. Hassibi, "On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information", *IEEE Trans. on Info. Theory*, vol. 51, no. 2, pp.506-522, Feb. 2005.
- [8] T. Yoo, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Multi-antenna downlink channels with limited feedback and user selection", *IEEE Journal on Sel. Areas in Comm.*, vol. 25, no. 7, pp.1478-1497, Sept. 2007.
- [9] K. Huang, J. G. Andrews, and R. W. Heath Jr., "Performance of orthogonal beamforming for SDMA with limited feedback", *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 58, no. 1, pp.152-164, Jan. 2009.
- [10] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming", *IEEE Journal on Sel. Areas in Comm.*, vol. 24, no. 3, pp.528-541, Mar. 2006.
- [11] L. Yang, M. S. Alouini, "Performance Analysis of Multiuser Selection Diversity", *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, Vol. 55, Issue 3, pp.1003-1018, May 2006.
- [12] D. J. Love, R. W. Heath Jr., W. Santipach, and M. L. Honig, "What is the value of limited feedback for MIMO channels?", *IEEE Comm. Magazine*, vol. 42, no. 10, pp.54-59, Oct. 2004.
- [13] A. J. Goldsmith and P. P. Varaiya, "Capacity of fading channels with channel side information", *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 43, no. 6, pp.1986-1992, Nov. 1997.
- [14] W. Rhee and J. M. Cioffi, "Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation", *IEEE VTC '05*, vol.2, pp.1085-1089, May 2000.
- [15] G. Song, Y. Li, "Asymptotic Throughput Analysis for Channel-Aware Scheduling", *IEEE Trans. on Comm.*, Vol. 54, No. 10, pp.1827-1834, Oct. 2006.
- [16] W. Seo, H. Song, J. Lee, and D. Hong, "A New Asymptotic Analysis of Throughput Enhancement from Selection Diversity Using a High SNR Approach in Multiuser Systems", *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 8, no. 1, pp.55-59, Jan. 2009.

저 자 소 개



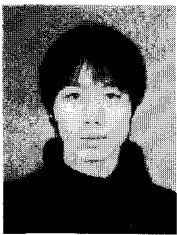
서 우 현(정회원)
2004년 연세대학교 전기전자
공학과 학사 졸업.
2007년 3월~현재 연세대학교
전기전자공학과 석박사
통합 과정.

<주관심분야 : 이동통신시스템, OFDM, MIMO,
HCS 시스템>



박 성 수(학생회원)
2006년 연세대학교 전기전자
공학과 학사 졸업.
2008년 연세대학교 전기전자
공학과 석사 졸업.
2008년 3월~현재 연세대학교
전기전자공학과
박사 과정.

<주관심분야 : 펌토셀, 멀티홉 릴레이, MIMO,
OFDM>



민 현 기(학생회원)
2005년 연세대학교 전기전자
공학과 학사 졸업.
2007년 연세대학교 전기전자공학
과 석사 졸업.
2007년 3월~현재 연세대학교
전기전자공학과 박사
과정.

<주관심분야 : 이동통신시스템, OFDM, MIMO,
멀티홉 시스템>



홍 대 식(평생회원)
1990년 Purdue University
Electrical Engineering
박사 졸업
1991년~현재 연세대학교 전기
전자공학과 교수

<주관심분야 : 디지털통신, 통신신호처리, 4G시스
템, OFDM, 멀티홉 시스템>