

다중입출력 시스템에서 적응형 섭동을 이용한 기회적 프리코딩

남태환¹ · 안선화¹ · 이경천^{2*}

Opportunistic Precoding based on Adaptive Perturbation for MIMO Systems

Tae-Hwan Nam¹ · Sun-hoe An¹ · Kyungchun Lee^{2*}

¹Undergraduate Student, Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

^{2*}Associate Professor, Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

요 약

본 논문에서는 MIMO (Multiple-Input Multiple Output, 다중입출력) 시스템을 위한 적응형 섭동을 이용한 기회적 프리코딩(Adaptive Perturbation-aided Opportunistic Precoding) 방식을 제안한다. 제안 프리코딩 방식에서는 MIMO 시스템을 위한 프리코딩 행렬을 생성할 때 랜덤한 섭동 뿐 아니라 사용자로부터 받은 전송률 정보에 의해 결정되는 적응적 변화값을 함께 이용한다. 이전 시간의 랜덤 섭동이 전송속도를 상승시켰을 경우 적응형 섭동을 이전 랜덤 섭동과 동일하게 하고, 그렇지 않을 경우 이전 랜덤한 섭동 값의 음의 값에 해당하는 값을 적용시킨다. 또한 전송 속도 최적화를 위해 스케줄링에서 현재 생성된 프리코딩 행렬 뿐 아니라 메모리에 저장된 최근 프리코딩 행렬 정보도 함께 이용한다. 모의실험 결과에서 기존 프리코딩 방식에 비해 제안한 섭동 기반 기회적 프리코딩 방식이 높은 전송속도를 얻으며, 특히 사용자의 수가 적은 환경에서 전송 속도 이득이 큰 것을 확인할 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, we propose an adaptive-perturbation-aided opportunistic precoding (APOP) scheme for multiple-input multiple-output (MIMO) systems. To update a precoding matrix in MIMO systems, the proposed algorithm produces a random perturbation in each time slot. Then the additional adaptive perturbation is also applied, which depends on the reports of achievable data-rates from users. If the prior random perturbation increased the data rate, the adaptive perturbation is set to be the same as the prior random perturbation, otherwise the negative value of the prior random perturbation is applied for adaptive perturbation. Furthermore, to enhance the achievable data rates, the information on the stored precoding matrices in the memory as well as the currently generated precoding matrix is used for scheduling. Simulation results show that compared to conventional opportunistic precoding schemes, higher data rates are achieved by the proposed APOP scheme, especially when there are a relatively small number of users.

키워드 : 다중입출력, 프리코딩, 기회적 프리코딩, 빔형성, 섭동

Keywords : MIMO, precoding, opportunistic precoding, beamforming, perturbation

Received 21 October 2019, Revised 5 November 2019, Accepted 18 November 2019

* Corresponding Author Kyungchun Lee(E-mail:klee@seoultech.ac.kr, Tel:+82-2-970-6405)

Associate Professor, Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

※ 본 논문은 한국통신학회 추계종합학술대회(2019년 11월)에서 발표한 논문("적응형 섭동을 이용한 기회적 다중입출력 프리코딩 기법")을 확장한 논문임.

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2019.23.12.1638>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

이동통신 시스템의 다중입출력(MIMO: Multiple Input Multiple Output) 시스템은 송수신단에서 여러 개의 안테나를 사용함으로써 단일 안테나 시스템과 비교해 전송 속도를 향상시키고 링크 신뢰성을 높일 수 있다. MIMO 시스템의 전송 방법 중 빔형성(Beamforming) 또는 프리코딩(Precoding) 기술은 송신 안테나들을 이용해 원하는 방향으로 빔을 발생시켜 신호를 수신하는 사용자의 실질 채널 상태를 향상시킴으로써 전체 시스템 성능을 향상시키는 기술이다 [1-3].

이동통신 시스템의 하향링크에 프리코딩 기술을 적용할 경우 일반적으로 기지국이 사용자들의 채널 상태 정보 가지고 있다고 가정하여 이 채널 정보를 이용해 빔을 형성한다. 하지만 사용자의 수가 늘어날수록 기지국이 피드백 받거나 추정해야 하는 채널 정보 양이 많아지고 이를 위한 자원 소비 및 복잡도가 증가하게 된다. 이와 같은 문제의 해결 방법으로 다중 안테나를 이용한 기회적 프리코딩(Opportunistic Precoding) 방식이 제시되었다[4][5].

기회적 프리코딩에서는 채널정보를 고려하지 않고 다중 안테나를 이용하여 빔을 랜덤하게 생성한다. 그리고 각 사용자는 현재 생성된 빔에 대한 채널품질정보(Channel Quality Indicator)를 기지국에 보내고, 기지국은 이 채널품질정보를 이용해 단말을 스케줄링함으로써 프리코딩 이득과 다중사용자 다이버시티 이득(Multiuser Diversity Gain)을 얻는다. 여기서 다중사용자 다이버시티 이득은 여러 명의 사용자가 존재할 때 매 순간마다 채널 환경이 좋은 사용자를 우선적으로 스케줄링함으로써 전체 시스템 용량을 향상시키는 것을 의미한다.

다중사용자 다이버시티 이득은 시간에 따른 채널 변화가 클수록 증대되는데, 시간에 따른 채널 변화가 적은 느린 페이딩 채널(Slow Fading Channel)에서는 일반적으로 이 이득을 얻기 어렵다. 하지만 기회적 프리코딩에서는 빔을 랜덤하게 변화시킴으로써 채널이 변하는 것과 유사한 효과를 얻을 수 있으며, 이를 통해 다중사용자 다이버시티 이득을 높이고 사용자가 많을 경우 완벽한 채널 정보를 요구하는 기존 프리코딩에 가까운 성능을 얻을 수 있다[4]. 이때 채널 품질만을 이용해 사용자에게 자원을 할당할 경우 채널 환경이 좋은 특정 사용자 그룹만 계속 통신할 가능성이 크다. 이는 사용자간 자원

할당의 불공정을 가져오며, 이를 해결하고 여러 사용자가 기지국과 동등하게 통신할 기회를 갖게 하는 방법으로 비례 공정 스케줄링(PFS: Proportional Fairness Scheduling)이 적용된다[6][7].

기회적 프리코딩에서 많은 수의 사용자가 있을 환경에서는 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있지만, 적은 수의 사용자가 있을 경우에는 다중 사용자를 통한 이득을 충분히 얻기 힘들어 높은 성능을 기대하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 적응형 섭동을 이용한 기회적 프리코딩(APOP: Adaptive Perturbation-aided Opportunistic Precoding)이 제안되었다[8]. 이전의 기회적 프리코딩에서 단순히 랜덤한 프리코딩 벡터가 적용되었다면, APOP에서는 프리코딩 벡터에 랜덤한 변화와 함께 피드백 받은 채널 품질에 따른 적응적 변화를 더한다. 이를 통해 적은 수의 사용자로 인해 다중 사용자 이득이 적은 환경에서 기존 기회적 프리코딩 보다 높은 전송 속도를 제공할 수 있다.

기존 APOP에서는 사용자가 단일 안테나만을 가지는 환경을 가정하여 하나의 프리코딩 벡터만을 이용해 매 시간에 하나의 심볼만 보내는 시스템을 고려하였다. 그러나 5G 이동통신에서 요구하는 높은 전송 속도를 달성하기 위해서는 수신단에서도 여러 안테나를 사용하고 매 시간마다 다수개의 프리코딩 벡터를 이용하여 여러 신호를 동시에 송신하는 MIMO 방식이 필수적이다. 본 논문에서는 기존 단일 프리코딩 벡터를 사용하는 APOP를 MIMO를 위한 다중 프리코딩 벡터로 확장하는 방식을 제안한다.

본 논문의 II장에서는 기회적 프리코딩 시스템의 개요를 설명한다. 다음 III장에서 MIMO 시스템으로 확장된 APOP 방식을 제시한다. IV장에서 모의실험 결과를 통한 성능을 분석하며, 마지막으로 V장에서 결론을 서술한다.

II. 기회적 프리코딩 시스템 개요

K 개의 사용자가 각각 한 개의 수신 안테나를 가지고 있고, 기지국이 N 개의 송신 안테나를 이용해 신호를 송신하는 무선통신 시스템을 가정한다. 이 때 시간 t 에서 k 번째 사용자의 수신 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y_k[t] = \mathbf{h}_k[t]^T \mathbf{w}[t] x[t] + z_k[t], k = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{h}_k[t]$ 는 k 번째 사용자의 $N \times 1$ 크기의 채널 벡터로 $\mathbf{h}_k[t]$ 의 n 번째 원소는 기지국의 n 번째 안테나와 k 번째 사용자 사이의 시간 t 에서의 채널 계수를 의미한다. $\mathbf{w}[t]$ 는 $N \times 1$ 크기의 프리코딩 벡터이다. $x[t]$ 는 P 의 평균 전력을 가지는 송신 심볼을 의미하며, $z_k[t]$ 는 σ^2 의 분산을 갖는 백색 가우시안 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)을 의미한다. 또한 $(\cdot)^T$ 은 행렬 또는 벡터의 전치를 의미한다. 위 수신 신호 모델에서 k 번째 사용자의 SNR(Signal-to-Noise Radio, 신호 대 잡음비) 값은 다음과 같다.

$$SNR_k[t] = \frac{P |\mathbf{h}_k[t]^T \mathbf{w}[t]|^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

채널 용량 공식에 의해 k 번째 사용자의 획득 가능한 순시 전송률은 다음과 같이 표현된다.

$$R_k[t] = \log_2(1 + SNR_k[t]) \quad (3)$$

이 순시 전송률은 비례 공정 스케줄링을 통해 기지국에서 데이터를 전송할 사용자의 인덱스 $\bar{k}[t]$ 를 다음과 같이 선택할 때 사용된다.[6]

$$\bar{k}[t] = \arg \max_k \frac{R_k[t]}{T_k[t]} \quad (4)$$

여기서 $T_k[t]$ 는 다음 식과 같이 계산되는 시간 t 까지 사용자 k 의 평균 전송률을 의미한다.

$$T_k[t+1] = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k[t] + \frac{1}{t_c} R_k[t] & \text{if } k = \bar{k}[t] \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k[t] & \text{if } k \neq \bar{k}[t] \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)에서 t_c 는 비례 공정 스케줄러의 파라미터로서 다중사용자 이득과 스케줄링 지연을 결정한다.

기회적 프리코딩에서는 식 (1)의 프리코딩 벡터를 랜덤하게 생성하고 식 (4)의 스케줄링 방식을 사용함으로써 사용자 수가 많을 경우 기지국에서 채널 정보를 이용하여 프리코딩을 적용하는 시스템에 근접하는 높은 전송 효율을 보여 준다. 그러나 사용자 수가 적을 경우 효율이 급격하게 떨어지는 단점을 지닌다. 이를 보완하여 프리코딩 벡터를 생성할 때 피드백 정보를 활용해 적응

형 섭동을 추가한 것이 APOP 방식이다[8]. 그러나 기존 APOP 방식에서는 수신단에 하나의 안테나만을 가지는 MISO (Multiple-Input Single-Output) 시스템만을 가정하였다. 다음 장에서는 APOP를 MIMO 시스템으로 확장한 기술을 제안한다.

III. MIMO 시스템을 위한 APOP

K 명의 사용자가 각각 M 개의 수신 안테나를 가지고 있고, 기지국은 N 개의 송신 안테나를 가진 MIMO 시스템을 가정한다. 이 때 k 번째 사용자의 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{W} \mathbf{x} + \mathbf{z}_k \\ &= \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{N1} & \dots & w_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_M \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

위 식에서 표현의 편의성을 위해 시간 t 는 생략하였으며, 이해의 혼란이 없는 한 사용자 인덱스 k 도 각 원소에서는 생략하였다. 식 (6)에서 $\mathbf{y}_k = [y_1 \dots y_M]^T$ 은 k 번째 사용자가 M 개의 수신 안테나에서 수신한 신호로 이루어진 벡터이며, \mathbf{H}_k 는 k 번째 사용자의 채널 행렬, h_{mn} 는 n 번째 송신 안테나와 m 번째 수신 안테나 사이의 채널 계수를 나타낸다. \mathbf{W} 는 프리코딩 행렬이며, \mathbf{x} 는 P 의 평균 전력을 가지는 심볼들로 이루어진 송신 심볼 벡터, \mathbf{z}_k 는 σ^2 의 분산을 가지는 백색 가우시안 잡음 신호이다. 식 (6)에서 수신 안테나가 송신 안테나 보다 적은 환경을 가정하여 수신 안테나 수와 동일한 M 개의 심볼이 동시 전송된다고 가정하였다.

각 안테나가 동일한 전력으로 신호를 송신한다고 가정할 때 MIMO 시스템의 채널 용량 공식에 의한 k 번째 사용자의 획득 가능한 단위 대역폭당 순시 전송률은 다음과 같다.

$$R_k[t] = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I} + \frac{P}{\sigma^2} \mathbf{H}_k \mathbf{W} \mathbf{W}^* \mathbf{H}_k^* \right) \right] \quad (7)$$

이 식에서 \mathbf{I} 는 $M \times M$ 크기의 단위(Identity) 행렬이고 P/σ^2 는 송신 심볼과 잡음의 전력비, $(\cdot)^*$ 는 행렬 및 벡터의 에르미트 전치(Hermitian Transpose)를 의미

한다.

MIMO 시스템을 위한 적응형 섭동 기반 기회적 프리코딩에서는 각 사용자가 식 (7)로 계산되는 순시 전송률 정보를 기지국에서 보고하도록 한다. 기지국은 프리코딩 행렬을 시간에 따라 변화시킬 때 사용자로부터 받은 피드백 정보를 활용한다. 즉, 프리코딩 행렬은 현재의 프리코딩 행렬에 랜덤한 섭동과 함께 적응형 섭동 값을 더하여 생성하며, 이 때 적응형 섭동은 스케줄링된 사용자의 순시 전송률의 상승 또는 저하에 따라 결정된다. 만약 순시 전송률이 상승되었을 경우 동일한 섭동 값을 다음 시간에 적응 섭동으로 적용하여 전송 속도가 높아질 확률을 높인다. 반대로 섭동 값이 전송 속도를 낮췄을 경우 섭동값을 상쇄시키기 위해 기존 섭동의 음의 값을 적응 섭동으로 적용하여 전송 속도가 향상될 확률을 높인다. 알고리즘 진행 과정은 다음과 같다.

〈MIMO 시스템을 위한 적응형 프리코딩 행렬 생성〉

1. $t=0$ 에서 랜덤한 값의 프리코딩 행렬 $\mathbf{W}[0]$ 생성.
2. 시간 $t(>0)$ 에서의 랜덤한 섭동 행렬 $\Delta \mathbf{W}[t]$, 적응형 섭동 행렬 $\Delta \mathbf{W}'[t]$ 을 생성한다. 여기서 $\Delta \mathbf{W}'[t]$ 의 값은 $\Delta \mathbf{W}[t-1]$ 이 $t-1$ 에서 스케줄링된 사용자 $\bar{k}[t-1]$ 의 채널 용량 값을 증가시켰으면 $\Delta \mathbf{W}'[t] = \Delta \mathbf{W}[t-1]$ 로 설정되며, 그렇지 않은 경우 $\Delta \mathbf{W}'[t] = -\Delta \mathbf{W}[t-1]$ 로 설정된다.
3. $\tilde{\mathbf{W}}[t] = \frac{\mathbf{W}[t-1] + \alpha \Delta \mathbf{W}'[t] + \beta \Delta \mathbf{W}[t]}{\|\mathbf{W}[t-1] + \alpha \Delta \mathbf{W}'[t] + \beta \Delta \mathbf{W}[t]\|_F}$ 을 통해 새로운 프리코딩 행렬 $\tilde{\mathbf{W}}[t]$ 를 생성한다. 여기서 α 와 β 는 프리코딩 행렬 갱신에서 랜덤 섭동과 적응형 섭동의 영향 비중을 조정하는 계수들이며, $\|\cdot\|_F$ 는 프로베니우스 놈(Frobenius Norm)이다.
4. 기지국에서 새로운 프리코딩 행렬 $\tilde{\mathbf{W}}[t]$ 을 이용해 파일럿(Pilot) 신호를 각각의 사용자들에게 전송하고, 사용자들은 식 (2)을 통해 계산된 채널 용량을 기지국에 보고한다.
5. 모든 사용자로부터 채널 용량 값을 보고 받은 기지국은 사용자들의 채널 용량 값과 프리코딩 행렬 $\tilde{\mathbf{W}}[t]$ 을 메모리에 저장한다. 메모리는 최대 최근 L 시간동안 사용자로부터 보고받은 채널 용량 정보와 프리코딩 행렬을 저장한다.
6. 기지국은 메모리에 저장된 사용자들의 채널 용량 중

에서 식 (3)의 목표함수를 최대화하는 값을 선택하고, 그에 해당하는 사용자 $\bar{k}[t]$ 및 대응되는 프리코딩 행렬 $\mathbf{W}[t]$ 을 데이터 전송을 위해 선택한다.

7. $t \leftarrow t+1$ 로 시간을 갱신한 후 위 2-6의 과정을 반복한다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안한 프리코딩 방식의 성능을 확인하기 위해 모의 실험을 진행하였다. 제안한 APOP 방식을 기존 방식인 OBF (Opportunistic Beamforming)[4], TC-OBF (Time Coherent-Opportunistic Beamforming)[5] 방식과 전송 속도 및 공정성 측면에서 비교하였다. 모든 실험에서 $SNR = 0\text{dB}$, 주파수 $f_c = 2.1\text{GHz}$ 인 레일리 페이딩 (Rayleigh fading) 채널을 가정하였다. 프리코딩 행렬의 갱신 시간 단위는 1ms, 비례 공정 스케줄링 알고리즘의 파라미터 t_c 는 1000으로 설정하였다. 사용자들은 $v = 3\text{ km/h}$ 속도로 이동하며, 기지국과 사용자 간 피드백 과정에서 정보 오류는 없다고 가정하였다. 제안 알고리즘의 메모리 크기는 $L = 25$ 로 설정하였다. 또한 파라미터 α 와 β 는 모의실험을 통해 높은 성능을 보이는 $\alpha = 0.5, \beta = 0.2$ 를 선택하였다.

그림 1은 송신 안테나 16개, 수신 안테나 4개인 MIMO 시스템에서 사용자 수에 따른 전송 속도를 비교한 결과이다. 그림 1에서 보여지는 것과 같이 기존 방식과 비교해 적응형 섭동을 이용한 APOP 송신 방식이 더 높은 평균 전송 속도를 얻는 것을 볼 수 있다. 특히 사용

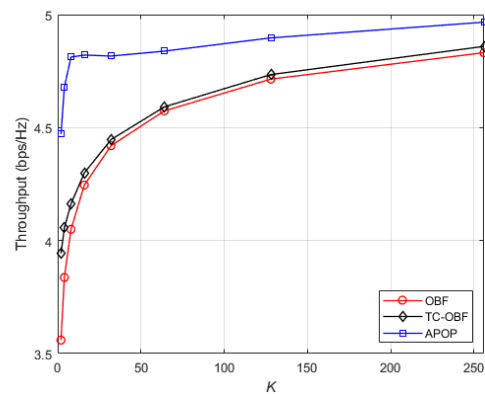


Fig. 1 Throughput comparison in MIMO systems. $N = 16, M = 4$.

자 수가 적은 환경에서 전송 속도 향상 이득이 크며, 약 15%의 전송 속도 향상을 제공함을 볼 수 있다.

그림 2는 송신 안테나 16개, 수신 안테나 8개인 MIMO 시스템에서의 실험 결과이다. 그림 1의 결과와 비교하여 수신 안테나 수가 늘어남에 따라 더 높은 전송 속도를 가짐을 확인할 수 있다. 또한 그림 1과 마찬가지로 제안 방식인 APOP가 사용자 수가 적은 환경에서 기존의 프리코딩 방식에 비해 상대적으로 높은 전송 속도를 가짐을 확인할 수 있다.

사용자간 자원할당의 공정성을 분석하기 위해 모의 실험을 통해 평균 시스템 공정성(Average System Fairness) 결과를 도출하였다. 사용자 k 의 자기공정성(Self-fairness)은 다음과 같이 정의된다 [7].

$$\xi_k = -\frac{\log(P_k)}{\log(K)} \quad (8)$$

여기서 P_k 는 총 시간동안 사용자 k 에게 할당된 자원의 비율을 뜻한다. 이에 따른 평균 시스템 공정성은 다음과 같이 정의된다.

$$\xi = \sum_{k=1}^K P_k \xi_k = -\sum_{k=1}^K P_k \frac{\log(P_k)}{\log(K)} \quad (9)$$

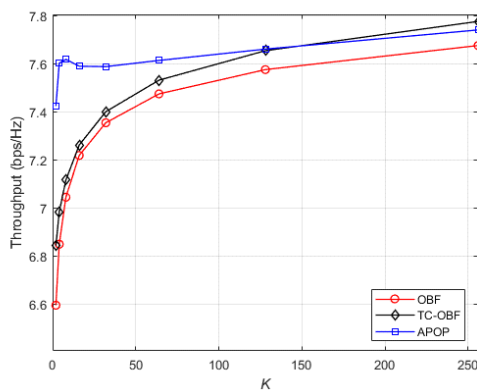


Fig. 2 Throughput comparison in MIMO systems. $N=16$, $M=8$.

모든 사용자가 거의 동일한 양의 자원을 할당받을 경우 평균 시스템 공정성은 1에 가까워지며, 이는 자원할당이 공정하게 이루어진 것을 의미한다.

그림 3, 4는 각각 그림 1, 2와 동일한 환경에서 모의 실험을 통해 평균 시스템 공정성을 평가한 결과이다.

OBF와 TC-OBF와 유사하게 제안된 APOP 방식에서도 1에 가까운 평균 시스템 공정성을 가짐을 확인할 수 있다. 즉, 제안 방식은 기존 방식과 비교해 자원 할당의 공정성을 유지하면서도 그림 1, 2에서 나타난 바와 같이 더 높은 전송 속도를 얻을 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 MIMO 시스템을 위한 적응형 기회적 프리코딩인 APOP 신호 송신 방식을 제안하였다. 제안 APOP 방식은 기존 기회적 프리코딩 방법에서 사용되는 랜덤한 프리코딩 행렬 변화와 함께 사용자의 피드백 정보에 따른 적응형 섭동을 적용한다. 이전 시간의 랜덤 섭동 행렬이 스케줄링된 사용자의 데이터 전송 속도를 상승시켰을 경우 적응형 섭동을 이 랜덤 섭동 행렬과 동일하게 설정하고 그렇지 않은 경우에는 랜덤 섭동 행렬의 음의 값으로 설정한다. 이와 같은 방법으로 생성된 새로운 프리코딩 행렬에 대해 각 사용자는 채널 용량 값을 기지국에 보고하고, 기지국은 이 정보를 이용해 단말을 스케줄링할 뿐 아니라 다음 시간의 적응 섭동을 결정한다. 또한 스케줄링에서 현재의 피드백 정보 뿐 아니라 메모리에 저장된 최근 피드백 정보를 함께 이용하여 전체 시스템의 전송 속도를 높이도록 한다. 모의 실험 결과를 기존의 프리코딩 방법과 비교해 제안 APOP 방식이 사용자 수가 적은 환경에서 사용자간 공정성을 유지하면서도 더 높은 전송속도를 얻음을 확인하였다.

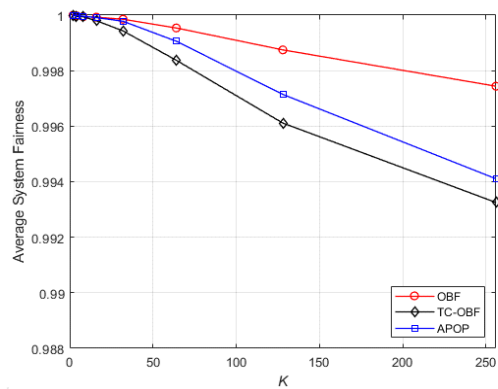


Fig. 3 Average System Fairness in MIMO systems. $N=16$, $M=4$.

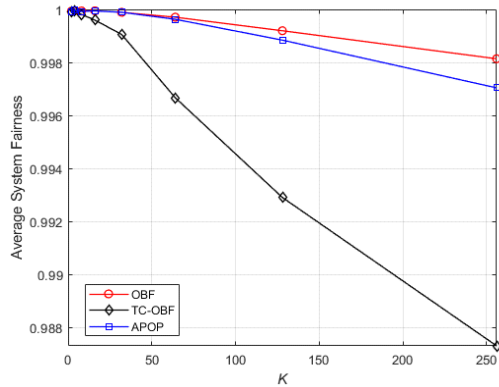


Fig. 4 Average System Fairness in MIMO systems. $N=16$, $M=8$.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2019R1F1A1061934).

REFERENCES

[1] C. Zhang and D. Yin, "A new multi-user transmit beamforming scheme for downlink MIMO channels," *IEEE/ACIS International Conference*, 2016.

[2] A. F. Molisch, V. V. Ratnam, S. Han, Z. Li, S. L. H. Nguyen, L. Li, and K. Haneda "Hybrid beamforming for massive MIMO: a survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 134-141, Sept. 2017.

[3] N. T. Nguyen and K. Lee, "Coverage and cell-edge sum-rate analysis of mmWave massive MIMO systems with ORP schemes and MMSE receivers," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 66, no. 20, pp. 5349-5363, Oct., 2018.

[4] 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, Jun. 2002.

[5] I. R. Baran and B. F. Uchoa-Filho, "Exploiting time coherence in opportunistic beamforming for slow fading channels," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*,

pp. 1753-1758, Apr. 2006.

[6] C. Eklund, "IEEE standard 802.16: A technical overview of the wireless MAN air interface for broadband wireless access," *IEEE Commun. Mag.* col. 40, no. 6, pp. 98-107, Jun. 2002.

[7] H. Li, Q. Guo, L. Fang, and D. Huang, "Fairness and capacity analysis of opportunistic feedback protocol with proportional fair or maximum throughput scheduling," in *Proc. Int. Conf. IEEE Wireless Commun. Signal Process.*, pp. 1-5, Oct. 2012.

[8] T. V. Le and K. Lee, "Adaptive Perturbation-Aided Opportunistic Beamforming," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 8, Aug. 2018.



남태환(Taehwan Nam)

2014.3 ~ 현재 서울과학기술대학교
전기정보공학과 학사
※관심분야: 이동통신



안선희(Sunhoe An)

2013.3 ~ 현재 서울과학기술대학교
전기정보공학과 학사
※관심분야: 이동통신



이경천(Kyungchun Lee)

2000.2 한국과학기술원 전기및전자공학전공 학사
2002.2 한국과학기술원 전기및전자공학전공 석사
2007.2 한국과학기술원 전기및전자공학전공 박사
2007.4 ~ 2008.6 University of Southampton,
U.K., 박사후연구원
2008.7 ~ 2010.8 삼성전자 책임연구원
2010.9 ~ 현재 서울과학기술대학교
전기정보공학과 부교수
※관심분야: 이동통신, Massive MIMO, 기계학습