

논문 2009-46TC-7-2

다중 사용자 다중 입출력 시스템에서 고유값 기반 스케줄링을 위한 선택적 채널 정보 피드백 기법

(Opportunistic Channel State Information Feedback for Eigen based
Scheduling in Multiuser MIMO Systems)

김 성 태*, 홍 대 식**

(Sungtae Kim and Daesik Hong)

요 약

본 논문에서는 다중 사용자 환경 다중 안테나 시스템에서 고유값 기반 스케줄링을 수행하기 위한 채널 정보(CSI: channel state information)를 각 사용자의 채널 상태에 따라 선택적(opportunistic)으로 피드백하기 위한 기법을 제안하고 있다. 3GPP(3rd generation partnership project) SMC(spatial multiplexing channel) 채널 모델에 의하면 도심지역에서 다중 사용자 다중 입출력(MU-MIMO: multiuser multiple input multiple output) 시스템은 안테나간의 높은 상관도(correlation)에 의해 시스템 용량(capacity)이 크게 저하된다^[1]. 이를 해결하기 위해 제안된 고유값 기반 스케줄링 기법의 경우 상관도에 의한 시스템 용량 저하를 완화시킬 수 있지만, 다중 사용자 다이버시티 이득(multiuser diversity gain)을 충분히 얻지 못하는 단점이 있다^[2]. 본 논문에서는 고유값 기반 스케줄링 기법을 바탕으로 다중 사용자 다중 입출력 시스템에서 평균적인 피드백 용량의 증가가 크지 않으면서, 다중 사용자 다이버시티 이득을 크게 향상시킬 수 있는 선택적 채널 정보 피드백 기법을 제안하고 있다. 컴퓨터 모의 실험 결과를 통해서 본 논문에서 제안한 선택적 피드백 기법을 통해 시스템 용량 개선 효과를 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, we propose the opportunistic channel state information feedback scheme for eigen based scheduling in multiuser MIMO systems. According to 3GPP SMC channel model, the system capacity of MU-MIMO systems is severely degraded, since the antennas are highly correlated in urban macro cell^[1]. Although the eigen based scheduling scheme mitigates the adverse effect of the antenna correlation, it achieves only small amount of the multiuser diversity gain^[2]. Since the opportunistic channel state information scheme can achieve sufficient multiuser diversity gain, the system capacity of MU-MIMO systems can be improved. The system capacity improvement is verified by the computer simulation results

Keywords : opportunistic feedback, MU-MIMO, eigen-based scheduling)

I. 서 론

3GPP SMC 채널 모델에 의하면 도심지역의 경우 기
지국 송신 안테나간의 상관도가 매우 높은 환경임을 알

수 있다^[1]. 송신 안테나간의 상관도가 높은 환경에서는
사용자가 수신한 공간적 채널의 구조가 상관도의 영향
에 의해 채널 용량이 하나의 공간적 채널로 집중되는
경향이 발생한다^[3]. 공간적 채널은 SVD(Singular Value
Decomposition)나 EVD(Eigen Value Decomposition)를
통해 채널의 랭크 개수만큼의 병렬 단일 입출력(SISO)
채널로 분리가 가능하다. 그러나 안테나간의 상관도가
발생하면 병렬 단일 입출력 채널들의 용량이 가장 큰
채널에 집중되는 현상을 볼 수 있다^[4]. 이러한 현상은

* 정희원, ** 평생회원, 연세대학교 전기전자 공학부
(Yonsei University)

※ 이 논문은 한국과학재단이 주관하는 국가지정연구
실사업(NRL:ROA-2007-000-20043-0)의 지원을 받
아 연구되었음.

접수일자: 2009년4월17일, 수정완료일: 2009년7월9일

각 단일 입출력 채널의 용량을 대표하는 고유값(singular value)의 크기를 통해 확인할 수 있다. 또한, 채널의 용량이 하나의 단일 입출력 채널에 집중되면 전체 다중 입출력 시스템의 용량이 저하됨을 알 수 있다^[5]. 뿐만 아니라 다중 사용자 다중 입출력 시스템에서 안테나 상관도가 높아지게 되면 각각의 사용자의 채널들 사이의 상관도 역시 높아지게 된다. 고유값 기반 스케줄링 기법에서도 확인할 수 있듯이, 서로 다른 사용자의 채널들 사이의 상관도가 높아지게 되면 간섭을 제거하기 위해 구성된 프리코딩(precoding) 행렬에 의해 각 사용자들의 시스템 용량이 크게 감소하게 된다^[2]. 이와 같은 상관도의 증가에 의한 시스템 용량 저하 문제를 해결하기 위해서 고유값 기반 스케줄링 기법에서는 피드백된 사용자의 최대 고유값들끼리의 상관도를 구하여 상관도값이 가장 낮은 사용자의 순서대로 신호를 송신할 사용자를 선택한다^[2]. 따라서 고유값 기반 스케줄링 기법은 상관도 증가에 의한 성능 저하를 완화시킬 수 있다.

그러나, 고유값 기반 스케줄링 기법은 사용자간의 상관도를 낮추는 방향으로 사용자들을 선택하는 것을 기본으로 하고 있으며, 이를 위해 각각의 사용자들은 SVD를 통해 채널의 최대 고유값을 찾고 이에 해당하는 첫번째 오른쪽 고유값 벡터만을 기지국으로 전송하는 피드백 구조를 갖고 있다. 이와 같은 구조로 인해 상관도가 증가하게 되면 시스템 용량이 증가하다가 포화되는 것을 알 수 있는데 이는 사용자간의 상관도를 완전히 제거할 수 없기 때문이다. 뿐만 아니라 각각의 사용자들은 항상 첫 번째 오른쪽 고유값 벡터를 전송하는데, 이는 모든 사용자들에게 항상 동일한 기회를 부여하는 결과를 가져오게 되므로 서로 다른 사용자들 간의 독립적인 채널의 변화에 의한 다중 사용자 다이버시티 이득을 충분히 얻지 못하게 된다.

따라서 본 논문에서는 고유값 기반 스케줄링 기법의 단점을 개선하기 위해서, 새로운 피드백 정보 선택 기법을 제시하고 있다. 본 논문에서 제시한 피드백기법은 피드백 정보의 평균적인 양은 기존의 기법과 거의 동일하게 유지하면서 다중 사용자 다이버시티 이득 역시 충분히 얻을 수 있는 장점을 갖고 있다.

II. 시스템 모델

다중 입출력 시스템은 송신 안테나의 그룹과 수신 안

테나의 그룹을 조합하여 각 사용자의 전송률이나 성능을 향상시킬 수 있는 신호처리 기술이다. 여기서 전자는 전송 다이버시티(transmit diversity) 기술이라고 하고 후자는 공간적 다중화(spatial multiplexing) 기술이라고 한다. 본 논문에서는 다중 사용자 다중 입출력 시스템의 공간적 다중화 기술을 기반으로 한다^[5].

단일 입출력과 비교하여 다중 입출력 채널은 공간적 상관도를 갖는 특징이 있다. 공간적 상관도는 AS(angle spread), DOA(direction of arrival)과 같은 어레이 안테나의 특성에 의해서 발생하게 되며, 이로 인해 다이버시티 이득이나 다중화 이득이 감소되므로 다중 입출력 시스템을 고려할 때 중요한 요인이 된다^[6].

본 논문에서는 M_t 개의 전송 안테나와 M_r 개의 수신 안테나를 갖는 다중 입출력 시스템을 고려한다. 이와 같은 시스템에서 j 번째 송신 안테나와 i 번째 수신 안테나 사이의 채널 응답으로 (i, j) 의 원소를 갖는 행렬을 갖는 가우시안 채널 $M_r \times M_t$ 를 정의한다. 이와 같은 다중 입출력 채널에서 공간적 채널 상관도는 DOA, AS 그리고 안테나와 파장 사이의 비에 의해 표현 가능한 안테나 이격에 의하여 모델링 될 수 있다^[7-8].

다중 입출력 시스템의 다중화 이득(Multiplexing Gain)은 “다중 입출력 채널이 R 개의 병렬적이고 독립적인 채널로 구분될 수 있다”라는 근거로부터 비롯한다. 이들 독립적인 채널에 각각의 독립적인 데이터가 다중화되어 단지 한 개씩의 송수신 안테나를 사용하는 시스템과 비교하여 R 배의 전송률을 얻을 수 있게 된다. 이와 같이 증가된 전송률을 다중화 이득이라고 한다.

$M_r \times M_t$ 행렬로 구성된 채널 행렬 H 를 송수신단에서 알고 있으며 H 의 rank를 R_H 라 놓자. 채널 H 에 SVD를 수행하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$H = U \Sigma V^H \quad (1)$$

여기서 U 는 $M_r \times M_r$ 그리고 V 는 $M_t \times M_t$ 의 단위 행렬(unitary matrix)이며 Σ 는 H 의 특이값 $\{\sigma_i\}$ 로 구성된 $M_r \times M_t$ 대각행렬이다. 여기서의 특이값은 HH^H 의 i 번째 고유값인 λ_i 에 대해 $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$ 의 특성을 갖고 있다.

III. 선택적 채널 상태 정보 피드백 기법

1. 기존 기법들의 문제점

앞에서 언급했듯이, 고유값 기반 스케줄링 기법은 사용자간의 상관도($|\rho_{k,i}|^2 = |v_k^H v_i|^2$, v_k 는 k 번째 사용자의 최대 오른쪽 고유값 벡터)를 낮추는 방향으로 사용자들을 선택하게 된다. 이는 아래 수식에서 볼 수 있듯이 프리코딩을 적용한 공간적 상관도가 있는 다중 사용자 다중 입출력 시스템에서 사용자들 사이의 상관도가 유효 SNR에 많은 영향을 미치며, 시스템 용량 성능을 좌우하기 때문이다.

$$SINR_{eff,k} = \frac{\lambda_{k,1}^2}{\left[\frac{E_b}{N_0 M_t}\right]^{-1} + \sum_{j=1, j \neq k}^M \lambda_{k,1}^2 |\rho_{k,j}|^2} \quad (2)$$

$$C_{EBM} = \sum_{m=1}^{M_t} \left(1 + \frac{\lambda_{k,1}^2}{\left[\frac{E_b}{N_0 M_t}\right]^{-1} + \sum_{j=1, j \neq k}^{M_t} \lambda_{k,1}^2 |\rho_{k,j}|^2} \right) \quad (3)$$

위의 식에서 $\lambda_{k,1}$ 는 k 번째 사용자의 채널 H_k 의 최대 고유값이며 이때 $SINR_{eff,k}$, C_{EBM} 은 각각 k 번째 사용자의 유효 SNR과 고유값 기반 스케줄링의 시스템 용량 성능이다. 고유값 기반 스케줄링 기법에서 각각의 사용자들은 SVD를 통해 채널의 최대 고유값을 찾고 이에 해당하는 첫 번째 오른쪽 고유값 벡터만을 기지국으로 전송하는 피드백 구조를 갖고 있다. 각각의 사용자들은 하나의 고유값 벡터만을 전송하므로 피드백에 대한 부담이 낮으며, 기지국에서는 피드백된 고유값 벡터중에서 상관도의 합($\sum |\rho_{k,i}|^2$)이 가장 낮은 사용자들의 집합이 선택된다. 따라서 상관도가 있는 다중 사용자 다중 입출력 방송 채널 환경에서도 기존의 Best user selection(BS), Proportional fair(PF) 스케줄링 기법과는 달리 충분한 시스템 성능을 보인다^[2]. 그러나 E_b/N_0 가 증가하게 되면 시스템 용량이 증가하다가 포화되는 것을 알 수 있는데 이는 사용자간의 상관도($\sum |\rho_{k,i}|^2$)를 완전히 제거할 수 없기 때문이다. 뿐만 아니라 각각의 사용자들은 항상 첫 번째 오른쪽 고유값 벡터를 전송하는데, 이는 모든 사용자들에게 항상 동일한 기회를 부여하는 결과를 가져오게 되므로 서로 다른 사용자들 사이의 독립적인 채널의 변화에 의한 다중 사용자 다이버시티 이득을 충분히 얻지 못하게 된다.

다중 사용자 다중 입출력 시스템에서 사용자들 사이의 상관도를 완전히 제거하는 것은 불가능하므로, 본 논문에서는 새로운 피드백 판단 기준 제시를 통해 선택

적으로 고유값 벡터를 피드백하여 다중 사용자 다이버시티 이득을 증가시킬 수 있는 선택적 채널 정보 피드백 기법을 제안한다.

2. 선택적 채널 정보 피드백 기법

가. 다중 사용자 다이버시티 이득을 위한

첫 번째 고유값 벡터 선택

각각의 송신 안테나 사이에 상관도가 있는 다중 사용자 다중 입출력 방송 채널 환경에서 각각의 사용자들의 채널 변화에 의한 다중 사용자 다이버시티 이득을 충분히 얻는 가장 간단한 방법은 고유값의 크기에 관한 정보를 피드백하는 것이다. 그러나 이는 피드백 정보의 양을 증가시키므로 적절한 해결책이라 할 수 없다. 따라서 채널 값의 크기에 대한 피드백을 하지 않으면서 순서적으로 좋은 채널 환경에 있는 사용자를 선택해야 하는 방법이 요구된다. 즉, 모든 채널 정보를 알고 중앙 집중적(centralized) 기법으로 사용자를 선택하는 것이 아니라 분산적(distributed) 기법을 이용한 사용자 선택만으로 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻어야 하는 것이다.

이를 위해서 착안한 방법은 다음과 같은 판정기준을 부여하여 판정기준에 부합되는 경우에만 각 사용자들이 고유값 벡터를 피드백 하는 것이다.

$$\begin{cases} \frac{|\lambda_1|^2}{|\lambda_1|_{mean}^2} > 1 : \text{transmit 1st vector} \\ \text{otherwise} : \text{do not transmit 1st vector} \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)가 의미하는 바는 순서적인 최대 고유값의 절대값이 최대 고유값의 절대값의 평균값을 넘는 경우에 전송한다는 것이다. 즉, 해당 채널의 순서적인 채널 이득이 그 채널의 평균값보다 좋은 경우(다중 사용자 다이버시티를 추구함)에만 피드백 하는 것이다. 일반적으로 다중 사용자 다이버시티를 얻기 위해서는 모든 채널 정보를 집중적 기법으로 처리해야 하는데 비해서, 위와 같은 판정 방법에 의한 선택적 피드백은 일종의 분산적 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 기법이라 할 수 있다.

나. 상관도가 낮은 경우를 위한

두 번째 고유값 벡터 선택

위에서 제시한 것과 같이 첫 번째 고유값 벡터를 선택적으로 전송 하는 경우 기지국의 입장에서는 선택할

수 있는 사용자의 후보가 줄어드는 것이라 할 수 있다. 선택할 수 있는 사용자의 후보가 줄어드는 경우 기존의 방법(항상 첫 번째 고유값을 피드백하는 경우)에 비하여 사용자간의 상관도가 낮은 사용자끼리 선택될 확률이 줄어들게 되고, 이는 곧 다중 안테나 간섭의 증가로 이어지므로 다중 사용자 다이버시티에 의한 이득은 얻을 수 있지만 다중 안테나 간섭의 증가로 인해 오히려 시스템 용량 성능이 떨어지는 결과를 가져올 수 있다. 따라서 피드백된 사용자들의 고유값 벡터 선택에 있어서 상관도가 낮은 후보의 수를 늘릴 필요가 있다. 이를 위해서 다음과 같은 방법을 사용한다.

첫 번째 고유값 벡터를 전송하기로 결정된 사용자에 한하여 해당 사용자의 두 번째 고유값 벡터를 특정한 판정기준을 적용하여 피드백 여부를 결정하게 된다. 이러한 방법이 의미하는 바는 상관도가 낮은 고유값 벡터 후보의 수를 늘리는 것으로, 동일 사용자의 첫 번째 고유값 벡터와 두 번째 고유값 벡터간에는 상관도가 0이라는 점에서 착안하였다.

특히, 이러한 피드백이 의미를 가질 수 있는 이유는 다음과 같다. 기존의 고유값 기반 스케줄러에서 밝히고 있는 바와 같이 고유값 기반 스케줄러와 고유값 벡터를 이용한 프리코딩을 적용한 시스템의 경우 다중 안테나 간섭의 증가로 인해 전체 가능한 병렬 단일 입출력 채널의 절반 정도만 사용이 가능하다^[2]. 따라서 본 논문에서 가정하고 있는 것과 같이 송신 안테나와 수신 안테나가 4개씩인 경우($M_t = M_r = 4$), 실질적으로 그 절반인 2개의 채널만 사용 가능하다는 것이다.

그렇다면, 두 번째 고유값 벡터를 선택하는 기준을 정하기 위해 다음과 같은 경우를 생각해보자. 위와 같은 환경($M_t = M_r = 4$)을 바탕으로 2명의 사용자가 있다고 가정하고, 1번 사용자가 첫 번째 고유값 벡터와 두 번째 고유값 벡터를 모두 전송하였고, 2번 사용자가 첫 번째 고유값 벡터만을 전송했다고 가정하자. 이 경우 시스템 용량이 최대화되도록 선택하기 위해서는 각각의 벡터의 상관도 값과 각각의 고유값의 크기 그리고 각 사용자의 E_b/N_0 등의 정보가 필요하다. 그러나 실제로 피드백되는 것은 고유값 벡터뿐이므로 얻을 수 있는 정보는 상관도뿐이므로 각각의 고유값 벡터에 의해 얻을 수 있는 유효 시스템 용량을 정확히 계산할 수 없다. 따라서 상관도 정보만으로 피드백 여부를 결정하기 위해서 두 사용자의 E_b/N_0 이 거의 같다고 가정하면, 시스템 용량은 두 개의 선택된 벡터들의 크기와

상관도에 의해 결정된다. 따라서 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$\begin{cases} \left(1 + \left(\frac{E_s}{N_0 + \rho_{d1,d2}}\right)_{d1} \frac{|\lambda_{d11}|^2}{2}\right) \left(1 + \left(\frac{E_s}{N_0 + \rho_{d1,d2}}\right)_{d2} \frac{|\lambda_{d21}|^2}{2}\right) & : V_{d11}^H, V_{d21}^H \text{ selected} \\ \geq \left(1 + \left(\frac{E_s}{N_0}\right)_{d1} \frac{|\lambda_{d11}|^2}{2}\right) \left(1 + \left(\frac{E_s}{N_0}\right)_{d1} \frac{|\lambda_{d12}|^2}{2}\right) & : V_{d11}^H, V_{d12}^H \text{ selected} \\ \text{otherwise} & \end{cases} \quad (5)$$

즉, 상관도가 큰 경우 동일 사용자의 첫 번째와 두 번째 벡터들이 선택될 가능성이 높고, 그렇지 않은 경우 각각의 사용자의 첫 번째 벡터끼리 선택될 가능성이 높은 것이다. 그러나 실제로 피드백 여부의 판단은 사용자의 단말에서 결정해야 하므로 다른 사용자의 채널 정보를 알 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 위와 같은 판정 기준 대신 아래와 같이 자신의 첫 번째 벡터만 전송되는 경우의 시스템 용량과 첫 번째와 두 번째 벡터가 모두 전송되는 경우의 시스템 용량의 차를 판단기준으로 삼는다.

$$\begin{cases} \left(1 + \left(\frac{E_s}{N_0}\right)_{d1} |\lambda_{d11}|^2\right) > \left(1 + \left(\frac{E_s}{N_0}\right)_{d1} \frac{|\lambda_{d11}|^2}{2}\right) \left(1 + \left(\frac{E_s}{N_0}\right)_{d1} \frac{|\lambda_{d12}|^2}{2}\right) & : \text{feedback } V_{d11}^H \text{ only} \\ \text{otherwise} & : \text{feedback } V_{d11}^H, V_{d12}^H \end{cases} \quad (6)$$

위와 같은 판정 기준을 적용하여 첫 번째 벡터만 전송되는 경우의 시스템 용량이 높을지 첫 번째와 두 번째 벡터가 모두 전송되는 경우의 시스템 용량이 높을지

```

If  $|\lambda_1|^2 > |\lambda_{mean}|^2$ 
    if  $\left(\frac{E_s}{N_0}\right)_{d1} \frac{|\lambda_{d1,1}|^2 |\lambda_{d1,2}|^2}{2} + |\lambda_{d1,2}|^2 - |\lambda_{d1,1}|^2 > 0$ 
        feedback  $V_{d1,1}^H, V_{d1,2}^H$ 
    else
        feedback  $V_{d1,1}^H$ 
    end
else
    no feedback
end
    
```

그림 1. Mt=Mr=4인 경우의 선택적 채널 정보 피드백 알고리즘의 pseudo 코드

Fig. 1. pseudo code of opportunistic channel state information feedback algorithm for Mt=Mr=4.

유추할 수 있게 된다. 이러한 선택적 피드백 기법은 안테나 수에 따라서 동일한 원리로 확장이 가능하다. 참고로, 4개의 안테나가 있는 환경에서 2개의 채널만 가용한 경우 세 번째, 네 번째 고유값 벡터는 두 번째 벡터와 비교하여 시스템 용량의 이득이 발생하지 않으므로 판정할 의미가 없다.

결과적으로 $M_t = M_r = 4$ 이고 2개의 채널이 가용한 경우에 대해서 제안하는 선택적 채널 정보 피드백 기법의 pseudo 코드는 그림 1과 같다.

다. 선택적 채널 정보 피드백 기법의 일반적인 경우에 대한 확장

위에서 예를 든 송신 안테나와 수신 안테나의 개수가 모두 4의 경우를 좀 더 일반적인 경우로 확장하면 본 연구에서 제안하는 선택적인 채널 정보 피드백 기법의 일반적인 형태를 얻을 수 있다. 그림 2는 제안하는 일반적인 선택적 채널 정보 피드백 기법의 블록 다이어그램이다. 그림 2의 블록 다이어그램에서 M 은 한 명의 사용자에 대한 최대 피드백의 수이다. M 의 값에 제한을 두지 않아도 실제로 모든 고유값 벡터가 피드백 되는 일은 상관도가 전혀 없는 경우를 제외하고는 거의 발생하지 않는다. 이는 상관도가 있는 경우에는 최대 고유값과 나머지 값들 간의 차이가 매우 크기 때문이다. 그러나, 판정의 복잡도를 낮추기 위해서 M 을 특정 값으로 제한하는 것도 좋은 선택이라 할 수 있다. 실험적으로 볼때, 고유값 기반 스케줄링 기법과 같이 적용

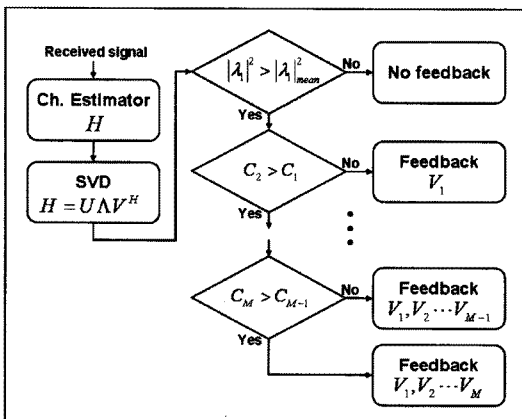


그림 2. 일반적인 형태의 선택적 채널 정보 피드백 기법의 블록 다이어그램

Fig. 2. block diagram of opportunistic channel state information feedback scheme.

표 1. 실험환경

Table 1. Simulation environment.

Parameters	Values
Antennas (Tx, Rx)	4, 4
Number of Users	10
Modulation Scheme	QPSK
Channel Model	Rayleigh channel model, flat fading
Pathloss Model	3GPP SCM V6.0 PL = 34.5 + 35log10(distance(m))
Shadowing	Log normal shadowing, 8dB
Antenna Spacing (d)	4λ, 10λ
Angle Spread (AS)	2, 5, 180

되는 경우에는 $M = M_t/2$ 가 적절함을 확인했다. 그림 2에서 C_1, C_2, \dots, C_M 은 각각의 vector의 feedback 판정에 쓰이는 cost로 다음과 같다.

$$C_M = \prod_{i=1}^M \left(1 + \left(\frac{E_s}{N_o} \right)_{d1} \frac{|\lambda_{d1,i}|^2}{M} \right) \quad (7)$$

따라서 제안하는 선택적 피드백 기법은 각 사용자들의 채널의 상태가 평균보다 좋은 경우에만 피드백을 하므로 항상 다중 사용자 다이버시티 이득을 충분히 얻을 수 있다. 또한 시스템 용량 이득이 있다고 판단되는 경우에는 첫 번째 고유값 벡터뿐만 아니라 다른 고유값 벡터도 전송하므로 기존의 고유값 기반 스케줄링 기법에서 발생하는 시스템 용량 손실을 개선하면서 상관도가 낮은 후보들을 얻을 수 있다. 따라서 기지국 송신 안테나간의 상관도가 높은 환경에서도 기존의 고유값 기반 스케줄링 기법보다 높은 시스템 용량 성능을 얻을 수 있다.

IV. 실험 결과

본 논문에서는 안테나 correlation의 변화에 따른 시스템 용량 성능 변화와 평균 피드백 벡터 개수의 변화를 살펴보았다. 사용된 실험 환경은 표 1과 같다.

그림 3은 모든 사용자가 동일한 E_b/N_0 를 갖는 경우에 대해서 E_b/N_0 를 변화시켜가며 실험한 결과이다. 제안된 기법과 기존의 고유값 기반 스케줄링 기법, BS, PF 스케줄링 기법에 관해서 각각 AS = 5, d = 10 인 경우와 AS = 2, d = 4 인 경우에 대해 실험하였다. 이를 통해 상관도가 증가하게 되면 각각의 기법들을 적용한 경우에서 시스템 용량 성능의 변화가 어떻게 변

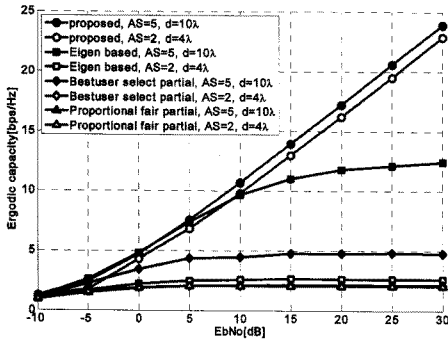


그림 3. AS=2, 5, d=4λ, 10λ, users= 10
 Fig. 3. AS=2, 5, d=4λ, 10λ, users= 10.

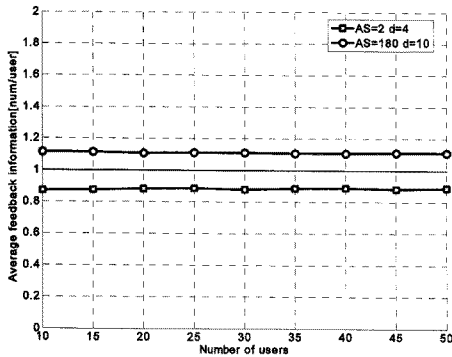


그림 4. 사용자의 수와 상관도에 따른 평균 피드백 양
 Fig. 4. Average amount of feedback information with the number of users and correlation among users.

화하는지 살펴봐왔다. 그림에서 볼 수 있듯이 BS, PF 스케줄링 기법의 경우에는 상관도가 높은 경우에는 사용자들간의 간섭에 의해 E_b/N_0 이 증가해도 성능이 증가하지 않음을 알 수 있다. 마찬가지로 고유값 기반 스케줄링의 경우에는 상관도를 낮추기 위한 스케줄링 기법이 적용되었으므로 BS, PF 스케줄링 기법보다는 상관도가 높아져도 좋은 성능을 보이지만, 다중 사용자 다이버시티 이득을 충분히 얻지 못하여 E_b/N_0 이 증가하면 성능이 포화되며, 일정이상 상관도가 증가하게 되면 시스템 용량 성능이 급격하게 저하된다. 그러나 제안한 선택적 피드백 기법은 상관도가 크게 증가하여도 시스템 용량 성능이 거의 저하되지 않음을 알 수 있다. 이는 선택적 피드백 기법의 상관도가 높아지면 상관도

가 낮아지는 방향으로 프리코딩하기 위하여 한 사용자의 고유값 벡터들을 선택하기 때문이다. 따라서 상관도가 높은 경우에도 성능의 저하가 없으면서도 상관도가 낮을 때에는 각각의 최대 고유값 벡터가 선택되어 다중 사용자 다이버시티 이득을 충분히 얻으므로 기존의 고유값 기반 스케줄링 기법과는 다르게 시스템 용량 성능이 E_b/N_0 증가에 대해서 포화되는 경향이 발생하지 않는다.

그림 4는 제안한 피드백 기법의 피드백 정보량의 평균에 대한 실험 결과이다. 제안한 피드백 기법의 성능 이득을 가져오는 부분이자 가장 문제가 되는 점이 피드백하는 정보의 양이 일정치 않다는 것이다. 이 경우 일정한 양의 피드백을 하는 기존의 기법보다 평균적인 피드백의 양이 많을 수도 있다. 그러나 위의 실험에서 보면 피드백 정보의 양은 평균적으로 거의 1에 가까움을 알 수 있다. 또한 피드백의 평균적인 양은 사용자의 수에 관계없이 상관도에만 영향을 받는데, 위의 실험에서 볼 수 있듯이, 상관도가 적은 환경에서는 평균적인 피드백의 양이 증가하고 상관도가 높은 환경에서는 평균적인 피드백의 양이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 두 번째 고유값의 크기가 상관도와 반비례하고 첫 번째 고유값의 크기는 상관도에 비례하기 때문이다. 위의 실험에서는 상관도가 가장 높은 경우와 가장 낮은 경우에 대해 실험하였으므로 두 값이 곧 피드백 양의 상한값과 하한값이 된다. 따라서 제안하는 피드백 기법의 피드백 정보량은 항상 1에 가깝게 나타난다.

V. 결 론

앞선 실험 결과를 통해 알 수 있듯이, 본 연구에서 제안하고 있는 선택적 채널 정보 피드백 기법을 적용하면 평균적인 피드백의 양을 증가시키지 않으면서 기존의 기법보다 더 높은 다중사용자 다이버시티 이득을 통해 시스템 용량을 증가시킬 수 있다. 특히 제안하고 있는 기법은 기존의 피드백 기법과 달리 각각의 고유값 벡터에 서로 다른 판정기준을 적용하여 피드백 여부를 결정하며, 전체 정보 피드백을 통한 중앙 결정형 다중 사용자 다이버시티 기법이 아닌 부분 정보 피드백을 이용한 사용자 주관 분산형 다중 사용자 다이버시티 기법이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] "Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations", 3GPP TR 25.996 V6.1.0, Sep. 2003
- [2] H. Lee, M. Shin, C. Lee, "An eigen-based MIMO multiuser scheduler with partial feedback information," IEEE Comm. Letters, vol. 9, Issue 4, April 2005 pp. 328 - 330
- [3] 이학주, 박승일, 이충용, 박현철, 홍대식, "공간적 채널 상관도에 따른 통계적인 채널 특성을 이용한 다중 안테나 선택 및 스위칭 시스템의 성능 분석." 전자공학회논문지 제42권. TC편. 제4호. pp.15~20. 2005년 4월.
- [4] D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication, Cambridge University Press, 2005
- [5] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, Introduction to space-time wireless communications, Cambridge university press, UK, 2003
- [6] D. Shiu, G. J. Foschini, M. J. Gans, and J. M. Kahn, "Fading correlation and its effect on the capacity of multi-element antenna systems," IEEE Trans. On Communication, vol. 48, no. 3, pp. 502-513, Mar. 2000
- [7] J. Salz and J. H. Winters, "Effect of fading correlation on adaptive arrays in digital mobile radio," IEEE Trans. On Vehicular Technology, vol. 43, no. 4, pp. 1049-1057, Nov. 1994
- [8] 고균병, 강창언, 홍대식, "Rich-Scattering 페이딩 채널에서 RBF Network를 이용한 MIMO 수신기," 전자공학회논문지, 제40권, TC편, 제8호, pp.1-6, 2003년 8월.

저 자 소 개



김 성 태(정회원)
2002년 연세대학교
전기전자공학과 학사졸업
2004년 연세대학교
전기전자공학과 석사졸업
2004년~현재 연세대학교
전기전자공학과 박사과정

<주관심분야 : Cognitive radio system, 이동통신 시스템, MIMO, OFDM(A) 시스템 >



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

<주관심분야 : 디지털통신, 통신신호처리, 4G시스템, OFDM 시스템>