

FDD 기반 상향링크 다중사용자 MIMO 시스템 상에서의 낮은 복잡도의 스케줄링 기법

A Low Complexity Scheduling of Uplink Multiuser MIMO/FDD System

조성윤*, 김요한*, 김동구*

Sung-Yoon Cho*, Yohan Kim* and Dong-Ku Kim*

요 약

본 논문에서는 FDD를 기반으로 한 상향링크 다중사용자 MIMO 시스템을 가정하였다. 실제 시스템 구현을 고려한 전송 기법으로 안테나 선택 기법과 송신 빔포밍 기법을 제시하였다. 본문에서는 두 가지 전송 기법에 대한 시스템 모델을 설명하고 각각의 전송 기법에 대하여 최대 전송률에 도달하는 동시에 낮은 복잡도를 나타내는 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 실험 결과를 통해 제안된 스케줄러는 낮은 복잡도를 갖는 동시에 최대 전송률을 나타내는 Brute-force 스케줄러와 비교하여 성능이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, we assume the uplink multiuser MIMO system based on FDD. Considering the implementation of practical system, Antenna selection and Transmit Beamforming scheme are suggested. System model of both two schemes are introduced and the scheduling algorithm which approaches the optimal performance with affordable computational complexity is proposed for each transmission scheme. Simulation results show that the sum-rate of the proposed low complexity scheduler approaches the performance of brute-force scheduler which is believed to be the optimal scheme.

Key words : multiuser MIMO, Antenna selection and Transmit Beamforming scheme scheduling

I. 서 론

높은 데이터 전송률을 요구하는 차세대 통신 시스템에서는 다중사용자 환경에서의 MIMO 기술과 이와 연동된 효율적인 데이터 전송 기법에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구 동향에 따라 최근 상향 링크와 하향링크 모두에 대한 다중 사용자 MIMO 시스템에서의 용량 한계(Capacity Bound)가 밝

혀짐으로써 기존의 단일 안테나 시스템에 비하여 월등한 채널 용량의 향상이 입증되었다[1]-[3]. 이를 바탕으로 실제 시스템 구현 가능성을 위해 기존에 연구된 MIMO 기술들과 스케줄러의 효율적 결합에 관한 연구가 요구되었고 이에 따라 높은 수준의 데이터 전송률이 요구되는 하향링크 상에서는 정보 이론적 관점에서의 용량지역(Capacity Region)을 바탕으로 한 효율적인 스케줄러의 연구가 활발하게 진행되어 왔

* 연세대학교 전기전자공학과 (Electrical & Electronic Eng, Yonsei University)

· 제1저자 (First Author) : 조성윤

· 접수일자 : 2007년 11월 22일

다[4],[5]. 반면 상향링크의 경우 하향링크에 비해 스케줄러에 관한 연구 진행 결과가 미비하다. 하지만 차세대 통신 시스템에서는 상향링크에서 요구되는 트래픽 양이 증가할 것으로 예상되므로 실제적인 시스템을 고려한 적절한 스케줄링 기법의 연구가 요구된다.

상향링크 상에서의 최대 용량은 기본적으로 MMSE-SIC(Minimum Mean Square Error-Successive interference Cancellation) 수신단 구조 하에 송신단과 수신단 모두 모든 사용자의 채널 정보를 완벽히 알고 있다는 전제 하에서 도달이 가능하다[1]. 하지만 이러한 최대 용량에 도달하기 위해서는 기지국은 각 사용자들에 대한 채널 정보 및 반복적 워터필링(Iterative Waterfilling) 방식에 의해 계산된 송신 공분산 행렬의 정보를 전체 사용자에게 모두 케환해 주어야 한다. 이러한 케환 정보의 양을 전송하기 위해서는 매우 큰 대역폭이 요구되기 때문에 실제적인 시스템 구현의 관점에서는 매우 어렵다. 따라서 케환 정보를 줄이는 동시에 효율적인 전송률을 나타내는 시스템에 대한 고려 및 스케줄링 기법의 연구가 필요하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 상향링크 가정 하에 시스템의 구현 가능성을 고려하여 케환 정보를 실제 전송될 사용자의 안테나 색인만으로 제한하는 안테나 선택(Antenna Selection) 기법을 제시하고 낮은 복잡도를 갖는 스케줄링 방식을 제안한다. 또한, 3장에서는 안테나 선택 기법과 비교하여 각각의 사용자가 송신 빔포밍(Transmit Beamforming)을 사용함으로써 SNR 이득(SNR Gain)을 얻을 수 있는 송신 빔포밍 기법을 고려하였고 이 기법에서도 역시 낮은 복잡도를 갖는 효율적인 스케줄링 방식을 제안한다. 4 장에서는 실험 결과를 토대로 제안된 스케줄러를 적용한 안테나 선택 기법 및 송신 빔포밍 기법의 성능을 비교 하고 제안된 스케줄러 간의 복잡도에 대해서 분석한다. 5장에서는 결론을 짓는다.

II. 안테나 선택 기법

2-1. 시스템 모델

본 논문에서는 FDD(Frequency Division Duplexing) 기반의 상향링크 MIMO 시스템을 고려하였다. FDD 가정하에서 각 사용자들은 모든 송신 안테나들로부터 프로빙(Probing) 신호를 기지국으로 전송하고, 이를 바탕으로 기지국은 모든 사용자들의 송신 안테나에 대한 채널 정보를 추정한다. 안테나 선택 기법의 경우 이렇게 추정된 채널 정보를 토대로 기지국에서 스케줄링을 수행하여 데이터를 전송을 할 사용자와 그 사용자에 대한 안테나를 결정하고 이를 케환 채널을 통해 사용자에게 알려준다. 즉, 시스템의 케환 정보가 선택된 안테나의 색인(Index)으로 제한된다. 그림 1은 FDD 기반 상향링크 MIMO 시스템을 도시하였다.

총 K 명의 사용자가 존재할 때 각 사용자는 N_T 개의 송신 안테나를 가지고 있고, 기지국은 N_R 개의 수신 안테나를 가지는 시스템을 가정한다. k 번째 사용자와 기지국과의 채널이 $N_R \times N_T$ 인 채널 행렬 \mathbf{H}_k 로 표시할 때 각 사용자에 대한 송신 안테나에 해당하는 채널 벡터를 $\mathbf{H}_k = [\mathbf{h}_{k,1} \ \mathbf{h}_{k,2} \ \dots \ \mathbf{h}_{k,N_T}]$ 와 같이 재배열 한다. 여기서 $l = 1, \dots, N_T$ 인 $\mathbf{h}_{k,l}$ 의 원소들은 평균이 0이고 분산이 1인 $N_R \times 1$ 복소 가우시안 채널 벡터를 나타내고 모든 사용자들에 대하여 신호 대 잡음 비(SNR: Signal to Noise Ratio)가 동일하다고 가정하였다. 이를 바탕으로 모든 사용자에 대한 채널 행렬 $\{\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_K\}$ 은 다음의 $\{\mathbf{h}_{1,1}, \mathbf{h}_{1,2}, \dots, \mathbf{h}_{K,N_T}\}$ 와 같이 총 KN_T 개의 채널 벡터들의 집합으로 나타낼 수 있다.

$K \gg N_R$ 인 가정 하에서 수신 단에서 구별 가능한 신호 스트림의 개수는 수신 안테나의 개수 N_R 로 제한 된다[6]. 따라서 본 논문에서는 동시에 전송되는 사용자 수를 수신 안테나 개수로 제한하였고 이러한 경우 MMSE-SIC 수신기 구조하에 도달할 수 있는 최대 합 전송률(Sum Rate)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_s = \max_q \log \det \left(\mathbf{I}_{N_R} + SNR \sum_{k=1}^{N_R} \mathbf{h}_{q(k)} \mathbf{h}_{q(k)}^H \right) \quad (1)$$

$$= \max_q \log \det \left(\mathbf{I}_{N_R} + SNR \mathbf{H}_q \mathbf{H}_q^H \right)$$

여기서 q 는 총 채널 벡터의 집합 $\{\mathbf{h}_{1,1}, \mathbf{h}_{1,2}, \dots, \mathbf{h}_{K,N_T}\}$ 에서 동시에 N_R 명의 사용자가 선택되는 스케줄링 알고리즘을 의미한다. 안테나 선택 기법의 스케줄링 알고리즘은 다음 장에서 제시한다.

3-2 스케줄링 알고리즘

스케줄러를 설계하는데 있어서 다음과 같은 두 가지 관점이 고려되어야 한다. 첫째는 합 전송률을 최대화할 수 있도록 설계 하는 것이고 다음으로 스케줄링 알고리즘의 복잡도가 낮도록 설계해야 한다. 결국 가장 효율적인 스케줄링 기법은 낮은 복잡도를 유지 하는 동시에 시스템 상에서 도달할 수 있는 최대 합 전송률에 근접할 수 있도록 설계하는 것이다. 본 장에서는 안테나 선택 기법의 스케줄링 방식으로 최대 합 전송률에 도달 하는 N_R 명의 사용자 벡터를 고르는 브루트포스 스케줄링(BFS : Brute-Force Scheduling) 방식을 제시하였고 브루트포스 방식의 성능에 접근하는 동시에 낮은 복잡도를 갖는 준 직교 안테나 선택 스케줄링(QOAS : Quasi-Orthogonal Antenna Scheduling) 기법을 제시하였다.

BFS는 모든 사용자들의 송신 안테나 채널 벡터 $\{\mathbf{h}_{1,1}, \mathbf{h}_{1,2}, \dots, \mathbf{h}_{K,N_T}\}$ 에 대하여 가능한 모든 N_R 개의 안테나 채널의 조합을 구하고 이들 조합 중에서 최대 용량을 갖는 안테나들의 집합을 선택하는 스케줄링 방식이다. 이러한 방식의 스케줄러를 통해 각 사용자 별로 주어진 채널에 대하여 최대 합 전송률에 도달하는 사용자 및 안테나를 선택할 수 있다. BFS 방식은 표 1에 설명되어 있다.

BFS 의 경우 최대 합 전송률에 도달하는 사용자들 선택할 수 있는 반면, 실제 전송가능한 모든 채널 벡터들에 대한 조합을 고려해야 하기 때문에 스케줄링 복잡도가 K, N_T 그리고 N_R 의 개수에 따라 지수적으로 증가한다. 이에 반해 QOAS의 경우는 BFS의 성능에 근접하면서 그 복잡도가 현저하게 떨어진다. QOAS의 설계는 다음과 같은 수학적 접근을 통해이

루어진다.

식 (1)에서 언급한 합 전송률은 다음과 같이 정리 할 수 있다.

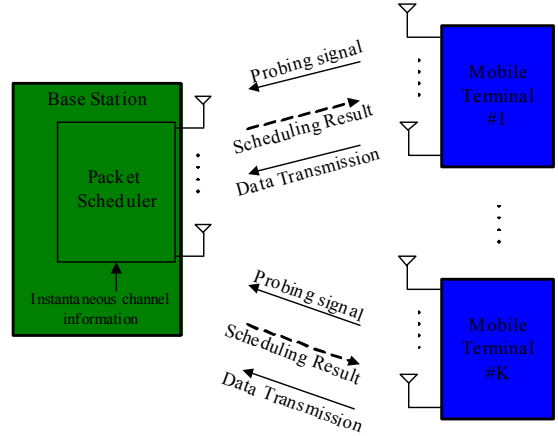


그림 1. FDD 방식의 상향링크 MIMO 시스템 모델
Fig. 1. Uplink MIMO/FDD System Model

$$R_s = \log \det \left(\mathbf{I}_{N_R} + SNR \mathbf{H}_q \mathbf{H}_q^H \right) \quad (2)$$

$$= \log \det \left(\mathbf{I}_{N_R} + SNR \mathbf{H}_q^H \mathbf{H}_q \right)$$

여기서 $\mathbf{A} = \mathbf{H}_q^H \mathbf{H}_q$ 와 같이 나타낼 때 행렬 \mathbf{A} 의 대 각 원소(Diagonal Element)는 선택된 안테나들의 채널에 대한 놈(Norm) 이 되고 그 외의 원소들의 값은 서로 다른 안테나들의 채널에 대한 내적을 한 값이 된다. 합 전송률을 최대화 시킬 수 있는 스케줄러를 제시하기 위해 하다마드 부등식 (Hadamard inequality) 성질을 이용할 수 있다. 하다마드 부등식은 음이 아닌 정부호(Non-Negative Definite) 행렬 \mathbf{X} 에 대하여 $\det(\mathbf{X}) \leq \prod_i \mathbf{X}_{i,i}$ 와 같고 등호는 \mathbf{X} 가 대각 행렬인 경우이다. 따라서 식(2)에서 최대 합 전송률을 얻기 위해서는 행렬이 대각 행렬화 되도록 하는 채널 행렬 \mathbf{H}_q 를 선택해야 한다. 즉, \mathbf{H}_q 를 구성함에 있어서 서로 간의 직교 성이 최대인 채널 벡터를 선택함으로써 $\mathbf{H}_q^H \mathbf{H}_q$ 의 대각 원소를 제외한 다른 원소들이 0에 가까운 값을 지니도록 스케줄링 하는 것이다. QOAS는 이러한 성질을 이용하여 채널간의 직교 성이 최대화 되도록 하는 사용자의 안테나들을 스케줄링 하는 것으로 표 2는 그람 슈미트(Gram-Schmit) 직교화 방식을 이용한 QOAS 방식을 나타내었다.

표 1. 안테나 선택 기반 Brute-Force 스케줄러
Table 1. Antenna Selection based Brute-Force Scheduler.

안테나 선택 기반 Brute-Force 스케줄러
<p>a. 초기화 총 사용자가 K명이고 각각의 송신 안테나가 N_T개 일 때 스케줄링 집합 $\mathbf{S} = \{\mathbf{h}_{1,1}, \mathbf{h}_{1,2}, \dots, \mathbf{h}_{K,N_T}\}$ 를 구성한다.</p> <p>b. 스케줄링 1). 스케줄링 집합 \mathbf{S}에 대하여 총 N_R개를 선택하는 조합은 $C_{N_R}^{KN_T}$ 개수 만큼 존재한다. 이 때, 각각의 조합에 해당하는 안테나의 집합을 G로 나타낼 때 다음과 같이 채널 행렬을 구성한다. $\mathbf{H}_G = [\mathbf{h}_{G(1)}, \mathbf{h}_{G(2)}, \dots, \mathbf{h}_{G(N_R)}]$ 2). 1)에서 발생시킨 모든 조합에 대한 채널 \mathbf{H}_G에 대하여 $\log \det(\mathbf{I}_{N_R} + SNR \mathbf{H}_G \mathbf{H}_G^H)$를 최대화 시키는 $\mathbf{H}_{G,MAX}$를 선택한다.</p> <p>c. 선택된 채널 $\mathbf{H}_{G,MAX}$에 해당하는 데이터 스트림이 동시에 전송된다.</p>

표 2. Quasi-Orthogonal Antenna 스케줄러
Table 2. Quasi-Orthogonal Antenna Scheduler

Quasi-Orthogonal Antenna 스케줄러
<p>a. 초기화 총 사용자가 K명이고 각각의 송신 안테나가 N_T개 일 때 스케줄링 집합 $\mathbf{S} = \{\mathbf{h}_{1,1}, \mathbf{h}_{1,2}, \dots, \mathbf{h}_{K,N_T}\}$ 를 구성한다. 선택될 안테나들의 집합인 T를 설정한다.</p> <p>b. 스케줄링 ($T \leq N_R$ 까지 반복) 1) 모든 $\mathbf{h}_k \in \mathbf{S}, k = 1, \dots, \mathbf{S}$에 대하여 $\mathbf{g}_k = \mathbf{h}_k - \sum_{j \in T } \mathbf{g}_j^H \mathbf{h}_k \mathbf{g}_j / \ \mathbf{g}_j\ ^2$을 계산한다. 2) 최대 $\ \mathbf{g}_k\ ^2$을 갖는 채널 벡터 $\mathbf{h}_{\tilde{k}}$를 선택한다. 3) $T = T \cup \mathbf{h}_{\tilde{k}}, \mathbf{S} = \mathbf{S} / \mathbf{h}_{\tilde{k}}$</p> <p>c. 선택된 안테나들의 집합인 T에 해당하는 데이터 스트림이 동시에 전송된다.</p>

III. 송신 빔포밍 기법

3-1. 시스템 모델

각 사용자들이 단일 스트림을 전송하는 안테나 선택 기법에 비하여 송신 빔포밍 기법을 시스템에 적용함으로써 SNR 이득(SNR Gain)을 추가로 획득할 수 있다. FDD 가정 하의 송신 빔포밍 기법은 각 사용자들이 데이터 전송에 앞서서 모든 송신 안테나에 대해서 프로빙 신호를 기지국으로 전송한다. 기지국에서는 이를 바탕으로 각 사용자들의 채널을 고려한 적절한 스케줄링을 수행하여 데이터 전송에 참여할 사용자를 선택하고 이들에 대한 가중치 벡터를 계산하여 쾌한 채널을 통하여 알려준다.

기지국에서 동시에 전송 받을 수 있는 사용자 수를 수신 안테나의 개수 N_R 명으로 제한할 때, k 번째 사용자에게 대한 송신 빔포밍 벡터를 $N_T \times 1$ 인 $\mathbf{w}_k = [w_1, w_2, \dots, w_{N_T}]^T$ 으로 정의한다. 이 때의 송신 빔포밍 기법의 합 전송률은 다음과 같다.

$$R_s = \max_q \log \det \left(\mathbf{I}_{N_R} + SNR \sum_{k=1}^{N_R} \mathbf{h}_{eff,q(k)} \mathbf{h}_{eff,q(k)}^H \right) \quad (3)$$

$$= \max_q \log \det \left(\mathbf{I}_{N_R} + SNR \mathbf{H}_{eff} \mathbf{H}_{eff}^H \right)$$

여기서 q 는 총 K 명의 사용자 채널 $\{\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_K\}$ 중에서 스케줄링 결과에 따른 실제 데이터 전송을 수행한 N_R 명의 사용자 집합을 나타낸다. 선택된 사용자의 집합 q 에 대하여 k 번째로 선택된 사용자의 채널과 이 때 형성된 가중치 벡터를 통해 실효 채널 벡터(Effective Channel Vector) $\mathbf{h}_{eff,q(k)} = \mathbf{H}_{q(k)} \mathbf{w}_{q(k)}$ 가 생성되고 선택된 N_R 개의 실효 채널 벡터를 통해 $N_R \times N_T$ 인 실효 채널 행렬 $\mathbf{H}_{eff} = [\mathbf{H}_{q(1)} \mathbf{w}_{q(1)}, \dots, \mathbf{H}_{q(N_R)} \mathbf{w}_{q(N_R)}]$ 을 구성할 수 있다.

식 (3)은 MMSE-SIC 수신 단의 가정 하에 N_R 명의 사용자들이 동시에 전송 가능하고 각각 송신 빔포밍을 사용할 때 도달할 수 있는 합 전송률을 나타낸다. 여기서 시스템이 최대 합 전송률을 갖기 위해서는 각각의 사용자들이 할당된 전력을 모두 사용한다는 조건 하에 반복 해(iterative solution) 방식을 통해 가중치 벡터를 결정할 수 있다. 표 3은 반복 해 방식을 통한 가중치 벡터식을 기술하였다.

표 3. 가중치 벡터 계산
Table 3. Computation of Weight Vector

반복 해 방식을 통한 가중치 벡터 계산
<p>a. 총 K 명의 채널 집합 $S = \{H_1 H_2 \dots H_K\}$ 에 대하여 N_R 명의 사용자 대한 채널 집합 $G = \{H_1 H_2 \dots H_{N_R}\}$ 을 구성하고 l_{max} 의 값을 정의한다.</p> <p>b. 채널 집합 G 에 대하여 다음의 과정을 l_{max} 만큼 반복하여 가중치 벡터를 구한다.</p> <p>While($l \leq l_{max}$)</p> <p>for $i = 1 : N_R$</p> $H_{eff,i} = \left(I_{N_R} + SNR \sum_{j=1+1}^{N_R} H_j w_j^H w_j^H \right)^{-1/2} H_i$ $H_{eff,i}^H H_{eff,i} = U_i \Lambda_i U_i^H$ <p>(Eigenvalue Decomposition)</p> <p>$\therefore w_i = \mathbf{u}_{argmax \lambda}$</p> <p>end</p> <p>$l = l + 1$</p> <p>end</p>

3-2. 스케줄링 알고리즘

송신 빔포밍 기법에서 모든 사용자에 대하여 총 N_R 명의 사용자가 동시에 전송된다고 할 때, 발생한 채널에 대하여 최대 합 전송률을 구하기 위해서는 K 명의 사용자 중에서 N_R 명을 고를 수 있는 모든 조합을 고려하여 최대의 합 전송률을 가지는 사용자들을 선택하는 것이다(표 4. 브루트포스 방식). 하지만 이러한 경우 사용자 수가 증가함에 따라 고려해야 할 조합의 수가 지수적으로 증가하며 가중치 벡터의 계산에 있어서 반복적인 해 방식을 적용하였기 때문에 계산 상의 복잡도가 매우 크다. 따라서 실제 시스템의 구현을 고려할 때 최대 용량에 근접하면서 동시에 복잡도가 낮은 스케줄링 기법이 필요하다. 준-직교 사용자 선택 스케줄러(QOUSS : Quasi-Orthogonal User Selection Scheduler)는 가중치 벡터를 계산하는 방식에 있어서 반복적인 계산을 피하기 위해 각 사용자에 해당하는 가중치 벡터를 개별적인 사용자의 채널을 고려한 최대 고유값을 갖는 고유벡터로 설정한

다. 이러한 과정을 통해 구해진 가중치 벡터를 각 사용자들의 채널에 적용시킴으로써 새로운 실효 채널 벡터를 형성하고 이를 바탕으로 안테나 선택 기반 시스템에서 이용한 그람 슈미트 직교화 알고리즘을 적용함으로써 서로 직교 성이 가장 큰 사용자들을 스케줄링 한다. 표 5는 QOUSS 알고리즘을 설명하였다.

표 4. 송신 빔포밍 기반 Brute-Force 스케줄러
Table 4. Transmit Beamforming based Brute-Force Scheduler

송신 빔포밍 기반 Brute-Force 스케줄러
<p>a. 초기화</p> <p>총 사용자가 K 명일 때 스케줄링 집합 $S = \{H_1 H_2 \dots H_K\}$ 를 구성한다.</p> <p>b. 스케줄링</p> <p>1). 스케줄링 집합 S 에 대하여 총 N_R 개를 선택하는 조합은 $C_{N_R}^K$ 의 개수가 존재한다. 이 때 각각의 조합에 해당하는 사용자의 집합을 G 로 나타낼 때 다음과 같이 사용자 채널 조합을 결정한다.</p> $H_G = [H_{G(1)} H_{G(2)} \dots H_{G(N_R)}]$ <p>2). 1) 에서 발생시킨 모든 조합에 대한 채널 H_G 에 대하여 표 3을 통해 가중치 벡터를 구하고 합 전송률을 최대화 시키는 $H_{G,MAX}$ 를 선택한다.</p> <p>c. 선택된 채널 $H_{G,MAX}$ 에 해당하는 사용자들이 데이터 스트림을 동시에 전송된다.</p>

표 5. Quasi-Orthogonal 사용자 선택 스케줄러
Table 5. Quasi-Orthogonal User Selection Scheduler

Quasi-Orthogonal 사용자 선택 스케줄러
<p>a. 초기화</p> <p>1) 기저국: i 번째 사용자 채널 H_i 에 대하여 $H_i^H H_i = U_i \Lambda_i U_i^H$ 와 같이 고유분해(Eigen Decompositon)를 통해 최대 고유치를 가지는 고유벡터 $w_i = \mathbf{u}_{argmax \lambda}$ 을 가중치 벡터로 결정한다.</p> <p>2) K 명의 사용자에 대하여 스케줄링 집합 $S = \{H_1 w_1 H_2 w_2 \dots H w_K\}$ 를 구성한다.</p> <p>b. 스케줄링</p> <p>집합 S 에 대하여 QOAS 알고리즘의 b 과정에 적용시켜서 직교성이 가장 큰 N_R 명의 사용자를 스케줄링 한다.</p> <p>c. 선택된 사용자들이 데이터 스트림을 동시에 전송한다.</p>

IV. 실험 결과

본 장에서는 제안된 스케줄러를 적용한 안테나 선택 기법과 송신 빔포밍 기법의 합 전송률의 성능을 실험을 통해 도시하였다. 또한 제안된 스케줄러에 대한 복잡도를 표 6을 통해 비교하였다. 본 논문에서의 스케줄러의 복잡도는 알고리즘 계산에 관련된 연산의 복잡도로 정의 한다. 즉, 행렬 곱셈, 행렬식 연산, 조합 생성, 정렬의 복잡도로 한정하여 절대적인 복잡도가 아닌 연산 복잡도의 차수를 이용하여 제시된 스케줄링 알고리즘을 상대적으로 비교한다.

그림 2는 총 사용자가 12명일 때 안테나의 개수가 $N_R = N_T = 2$ 와 $N_R = N_T = 4$ 인 안테나 선택 기법에서 BFS와 QOAS를 적용시켰을 때의 합 전송률에 대한 CDF(Cumulative Density Function)을 도시한 것이다. 이 때 각 사용들의 SNR은 5dB로 동일하다. 그림에서와 같이 $N_R = N_T = 2$ 와 $N_R = N_T = 4$ 인 경우 모두 BFS와 QOAS를 적용시킨 경우 시스템 성능이 거의 근접함을 확인할 수 있다. 반면 복잡도 측면에서 BFS의 경우는 총 N_R 명의 사용자 수를 선택하는데 있어서 전체 채널 벡터에 영향을 미치는 사용자 수 K 와 N_T 의 개수에 대하여 복잡도가 지수적으로 증가한다. 이에 반해 QOAS의 경우는 표 6과 같이 복잡도가 $O(N_R(KN_T)^2)$ 으로 나타나므로 K, N_T 그리고 N_R 의 개수가 증가하여도 그 복잡도는 지수적으로 증가하지 않는다.

그림 3의 경우는 총 사용자 수가 12명인 상황에서 각 사용자들이 동일한 SNR인 5dB를 가질 때 송신 빔포밍 기법에서 $N_R = N_T = 2$ 와 $N_R = N_T = 4$ 에 따른 BFS와 QOUSS를 적용시킨 합 전송률에 대한 CDF를 도시한 것이다. $N_R = N_T = 2$ 와 같이 송, 수신 안테나의 개수가 적은 시스템의 경우 합 전송률의 CDF가 BFS와 QOUSS를 적용시켰을 때 거의 일치함을 확인할 수 있다. 반면, $N_R = N_T = 4$ 와 같이 안테나의 수를 증가시킨 경우 두 스케줄링 기법을 적용했을 때 어느 정도의 성능 차이가 존재함을 확인할 수 있다. 하지만 복잡도 측면에서는 BFS의 경우 사용자의 수 K 에 대하여 지수적으로 증가하는데 비하여 QOUSS는 $O(N_R^4 K^2)$ 으로 나타나므로 매우

낮은 복잡도를 지님을 알 수 있다.

표 6. 본 논문의 스케줄러의 복잡도 비교

Table 6. Comparison of Scheduler Complexity

	안테나 선택	송신 빔포밍
BFS	$O(N_R^3 (KN_T)^{N_R})$	$O(l_{\max} N_R^6 K^{N_R})$
QOAS/ QOUSS	$O(N_R (KN_T)^2)$	$O(N_R^4 K^2)$

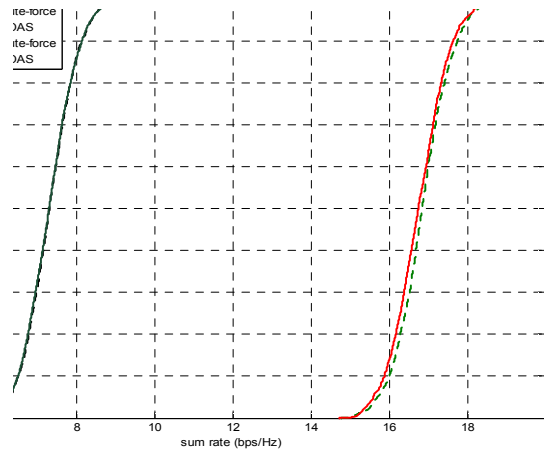


그림 2. BFS와 QOAS를 적용시킨 안테나 선택 기법의 합 전송률에 대한 CDF

Fig. 2. CDF of sum rate in Antenna Selection scheme applying BFS and QOAS

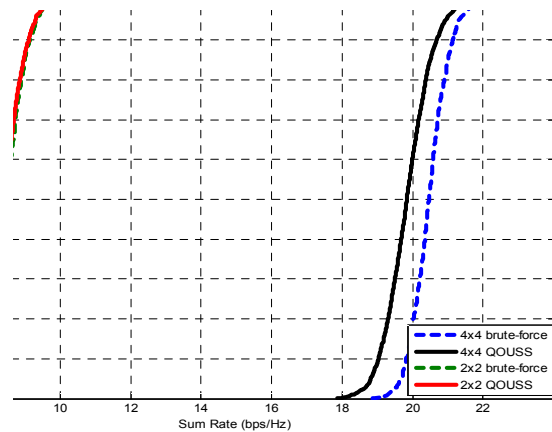


그림 3. BFS와 QOUSS를 적용시킨 송신 빔포밍 기법의 합 전송률에 대한 CDF

Fig. 3. CDF of sum rate in Transmit Beamforming scheme applying BFS and QOUSS

V. 결 론

본 논문에서는 다중 사용자 상향링크 MIMO 환경에서 실제 시스템 구현을 위한 효율적인 전송 기법을 제시하였다. FDD 기반을 가정한 경우, 안테나 선택 기법을 통해 제한된 궤환량에 적합한 전송 기법을 제시하였다. 이 때 최대 합 전송률을 나타낼 수 있는 스케줄링 기법으로서 BFS를 제시하고 이와 비교하여 복잡도가 낮은 QOAS를 제시하였다. 실험 결과를 통해 QOAS를 적용시킨 시스템의 경우 낮은 복잡도를 갖지만 BFS를 적용한 시스템의 최대 합 전송률과 거의 근접한 성능을 보였다. 또한 송신 빔포밍 기법을 적용하여 안테나 선택 기법에 비하여 SNR 이득을 추가로 얻을 수 있는 시스템을 제시하였으며 이 경우도 마찬가지로 BFS와 QOASS와 같은 스케줄러를 제안하여 송신 빔포밍 기법에서의 합 전송률의 성능을 비교하였다.

참 고 문 헌

[1] W. Yu, W. Rhee, S. Boyd, and J. M. Cioffi, "Iterative Water-Filling for Gaussian Vector Multiple-Access Channels," *IEEE Trans. On Infor. Theory.*, vol. 50, no. 1, pp. 145-152, Jan. 2004.

[2] P. Viswanath and D. N. C. Tse, "Sum Capacity of the Vector Gaussian Broadcast Channel and Uplink-Downlink Duality," *IEEE Trans. On Infor. Theory.*, vol. 49, no. 8, pp. 1912-1921, Aug. 2003.

[3] G. Caire and S. Shamai (Shitz), "On the Achievable Throughput of a Multiantenna Gaussian Broadcast Channel," *IEEE Trans. On Infor. Theory.*, vol. 49, no. 7, pp. 1691-1706, Jul. 2003.

[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, June 2002.

[5] W. Ajib, and D. Haccoun, "An Overview of Scheduling Algorithms in MIMO-based Fourth-Generation Wireless Systems," *IEEE Network Magazine*, Sep/Oct 2005.

[6] Y. Kim, S. Cho, D. Kim, "Low Complexity Antenna Selection based MIMO Scheduling Algorithms for Uplink Multiuser MIMO/FDD System," *IEEE Vehicular Technology Conference*, April. 2007

조 성 윤(趙盛胤)



2006년 2월 : 연세대학교
전기전자공학과 (공학사)
2006년 3월~현재 : 연세대학교
전기전자공학과 석사과정
관심분야 : 이동통신, 다중사용자 MIMO 시스템 및 스케줄링

김 요 한



2002년 2월 : 연세대학교
기계전자공학부(공학사)
2004년 2월 : 연세대학교
전기전자공학과(공학석사)
2004년 3월~현재 : 연세대학교
전기전자공학과 박사과정
관심분야 : 정보이론, 다중사용자

MIMO 시스템

김 동 구(金東九)



1983년 2월 : 한국항공대학교
통신공학과(공학사)
1985년 : U.S.C. Dept. of
Electrical Engineering(공학석사)
1992년 : U.S.C. Dept. of
Electrical Engineering(공학박사)
1999년~현재 : 연세대학교 공과대

학 전기전자공학과 교수

관심분야 : CDMA 이동통신, 다중접속 기술, 변조 및 채널 부호화 기술, 스케줄링/MAC 기술, 순방향링크 빔성형 기술 및 MIMO 기술, UWB, Binary CDMA