멀티유저 MIMO 시스템에서 효과적인 스케쥴링 정책 연구
Study on efficient scheduling strategies for multiuser MIMO systems

김재홍, 김세헌
대전광역시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 산업공학과
E-mail : jkim@tmlab.kaist.ac.kr;shkim@kaist.ac.kr

Abstract

In this paper, we propose efficient scheduling strategy for Multi-user MIMO systems that find advantageous trade off solution between multiuser diversity and spatial diversity, spatial multiplexing technique. Specifically, we suggest P-SFS(Pseudo-SNR Fair scheduling) algorithm that consider throughput and fairness problem. also we propose channel aware Antenna deployment that decide how to use assigned multiple antennas by the information of each user's channel condition.

I. 서론

MIMO(multiple input multiple output)는 송신측과 수신측에 다수의 안테나를 사용하여, 전송 안정성과 높은 데이터 전송속도를 제공할 수 있는 각광받는 통신 기술이다[1].

MIMO에서 사용되는 전송 기술은 크게 두 가지, 공간 다중화와 공간 다이버시티 기술로 구분할 수 있다[2].

먼저 공간 다중화(spatial multiplexing)는 하나의 큰 데이터 스트림을 작은 여러 개의 데이터 스트림으로 쪼개어 다 수의 안테나를 통해 전송함으로써, 기존보다 훨씬 높은 전송속도를 얻을 수 있는 전송기술이다[3].

공간 다이버시티(spatial diversity) 기술은 데이터 전송 시에 채널 환경이 좋지 않은 경우 BER(bit error rate)를 줄여, 전송 안정성을 높이기 위한 것으로 다수의 안테나를 통해 같은 데이터를 동시에 보내는 전송 기술이다[4].

최근 들어 여러 사용자가 함께 여러 개의 안테나를 공유하는 Multiuser MIMO system에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[5],[6],[7].

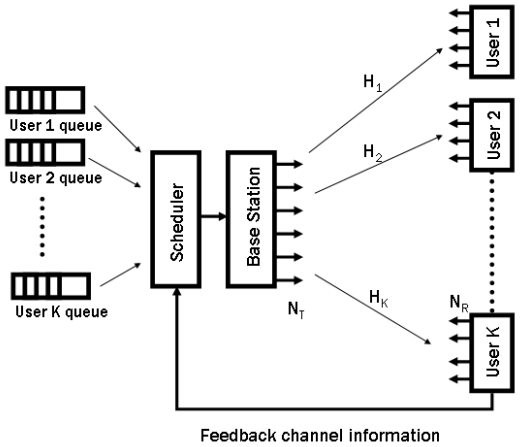
본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음

하지만 이런 대부분의 연구는 각 유저마다 다양한 채널환경을 갖고 있는 것을 이용한 다중 사용자 다이버시티(multiuser-diversity)를 활용하는 데 중점을 두었기 때문에, 기존의 한 사용자가 사용하는 MIMO 시스템의 장점인 공간 다중화와 공간 다이버시티의 활용성을 간과하고 있는 경우가 많았다.

따라서 본 논문을 통해 다양한 채널환경의 사용자가 다수의 안테나를 공유하는 Multiuser MIMO 시스템에서 멀티유저 다이버시티와 더불어 공간 다중화 및 공간 다이버시티의 특성을 최대한 활용할 수 있는 효율적인 스케줄링 기법을 제안하고자 한다.

II. 연구 배경 및 문제 정의

본 연구는 아래의 [그림 1]과 같이 Multiuser MIMO의 다운링크 시스템을 가정하였다.



[그림 1] Multiuser MIMO 다운링크 시스템

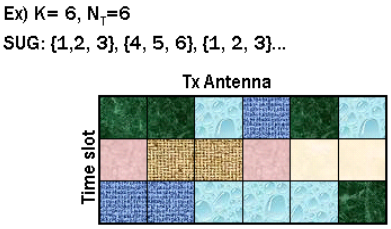
기지국에는 총 N_T개의 전송 안테나가 있고, 각각의 사용자 단말기는 N_R개의 수신 안테나가 있다. 스케줄러는 피드백을 통해 각각의 사용자에게 CSI(Channel State Information)을 받게 된다. 그 다음 스케줄러는 이 정보를 가지고, 각각의 사용자에게 매

타임 슬롯마다 할당할 안테나의 수와 종류를 결정하게 된다. 본 연구에서는 각각 사용자가 보내고자 하는 데이터가 항상 존재한다고 가정하고 스케줄링을 실행하였다.

III. P-SF(Pseudo-SNR fair) 스케줄링

기존에 제안되었던 AA-RRS(Antenna Assisted Round Robin Scheduling)의 경우, 각각의 유저들을 SUG(Scheduled User Group)으로 나누어서 매 타임 슬롯마다 라운드 로빈 형식으로 안테나를 사용할 수 있도록 할당한 다음, 할당된 SUG내에서 각각의 유저들의 채널환경을 고려한 다중 사용자 다이버시티를 활용하는 방안을 채택하였다[8].

예를 들어 총사용자 K가 6명이고 안테나의 개수 N_T가 6개인 경우 SUG를 {1, 2, 3}, {4, 5, 6}과 같은 형태로, 사용자 그룹을 세 명씩 분류한 다음 [그림 2]와 같이 채널환경에 맞추어 안테나를 할당하여 주는 방법이다.

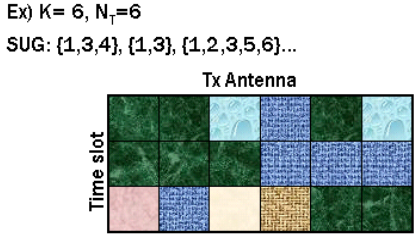


[그림 2] AA-RRS의 경우

위의 스케줄링 방법의 경우, 사용자를 채널환경을 고려하지 않고 SUG 그룹을 정하기 때문에 상당히 제한적인 다중 사용자 다이버시티만 이용할 수 있었다.

따라서 본 논문에서는 이런 AA-RRS의 단점을 보완한 P-SFS(Pseudo-SNR Fair Scheduling)을 제안하고자 한다.

P-SFS는 매 타임 슬롯마다 Pseudo-SNR 값을 통해, 장기적인 관점에서 볼 때 각 사용자간의 평등한 안테나의 사용을 일정수준 보장하면서도, 좋은 채널환경에 있는 사용자의 경우 최대한 안테나를 할당받을 수 있도록 SUG를 설정하는 방법으로, [그림 3]과 같이 매 타임 슬롯마다 안테나를 사용할 수 있는 사용자 수에 제한이 없기 때문에 더 효율적인 다중 사용자 다이버시티의 활용이 가능하다.

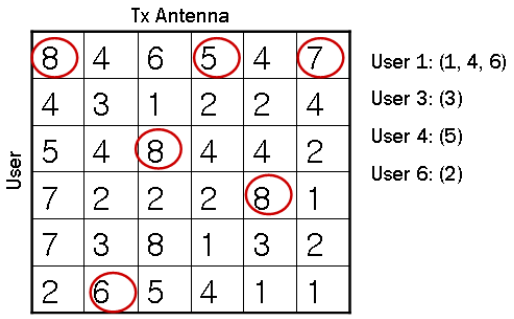


[그림 3] P-SFS의 경우

본 논문에서 제시한 P-SFS의 알고리즘은 다음과 같다.

step1)초기 안테나 할당

각 사용자들의 각각의 안테나에 대한 SNR값을 피드백 받은 후 가장 좋은 채널환경에 있는 사용자에게 한 타임 슬롯동안 안테나를 할당한다. [그림 4]와 같이 N_T가 6개 K가 6명인 경우의 채널환경을 매트릭스 형태로 표현할 수 있다.



[그림 4]6 X 6 채널 매트릭스

step2)채널 매트릭스의 업데이트

다음 타임 슬롯에서 fairness를 고려한 안테나 할당을 위해서 본 논문에서는 Pseudo-SNR을 사용하였다. Pseudo-SNR을 구하는 방법은 다음과 같다.

t번째 타임 슬롯에서 안테나를 할당받은 사용자의 경우, (1)와 같은 수식으로 t+1번째 타임 슬롯에서의 Pseudo SNR을 구할 수 있다.

$$PSNR_{ij}(t+1) = SNR_{ij}(t+1) - \alpha \cdot s_i(t) \quad (1)$$

$PSNR_{ij}(t+1)$은 t+1번째 타임 슬롯에서 I번째 사용자의 j번째 안테나에 대한 Pseudo SNR 값으로, t+1번째 타임 슬롯에서 실제 SNR값인 $SNR_{ij}(t+1)$에서 fairness 조절 변수인 α와 전 타임 슬롯에서 할당받았던 안테나의 개수인 $s_i(t)$를 곱해준 값을 빼어준 값으로 표현할 수 있다.

또한 마찬가지로 t번째 타임 슬롯에서 안테나를 할당받지 못한 경우에는 (2)와 같은 수식으로 표현이 가능하다.

$$PSNR_{ij}(t+1) = SNR_{ij}(t+1) + \beta \cdot u_i(t) \quad (2)$$

(1)과 비슷한 형태로 fairness 조절변수인 β와 연속적으로 안테나를 할당받지 못한 횟수인 $u_i(t)$를 곱해주어 더해준 값으로 t+1번째 타임 슬롯에서의 Pseudo SNR값의 표현이 가능하다.

이처럼 이전 타임 슬롯에서 안테나를 할당받은 경우에는 $\alpha \cdot s_i(t)$만큼 다음 타임 슬

롯에서 실제 SNR값을 빼주고, 그렇지 않은 경우에는 $\beta \bullet u_i(t)$만큼 더해주도록 하여, 실제 스케줄링을 할 때에 적절하게 α, β값을 설정하여 시스템의 효율성을 높이고 싶은 경우에는 α, β을 되도록 적게 설정하고, fairness를 높이기 위해서는 α, β을 높게 설정하여 빠르게 변화하는 시스템의 요구사항에 맞추어 유연한 대처가 가능하다.

IV. 채널환경을 고려한 안테나 활용

P-SFS를 통해 안테나가 각각의 사용자들에게 할당되면 다음으로 사용자에게 할당된 안테나를 어떤 방식으로 사용할 것인지 결정해야 한다.

대부분 기존의 논문에서는 다중 사용자 다이버시티를 위해서 대부분 한 사용자가 하나의 안테나를 할당받았기 때문에 공간 다중화와 공간 다이버시티의 활용이 가능하지 않았다. 하지만 본 논문에서 제안한 P-SFS의 경우, 채널환경이 좋다면 한 사용자가 다수의 안테나를 사용하는 것이 가능하기 때문에, 공간 다중화와 공간 다이버시티의 효율적인 사401용이 가능하다.

본 논문에서는 한 사용자에게 할당된 다수의 안테나를 효율적으로 활용하기 위해서 BER(Bit error rate)를 기준으로 사용하였다.

MIMO 시스템 상에서 BPSK 방식으로 데이터를 전송하고, 전송 시의 채널환경이 AWGN이라고 가정하면, BER는 다음의 (3)와 같이 표현이 가능하다[9].

$$P_e = Q(\sqrt{2SNR}) \tag{4}$$

Q(x)는 N(0,1)을 따르는 랜덤 확률변수의 ccdf(complementary cumulative distribution function)로, x^2에 따라 지수 함수적으로 감소하는 값으로 (5)와 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{cases} Q(x) < e^{-x^2/2}, & x > 0 \\ Q(x) > \dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\,x}(1-\dfrac{1}{x^2})e^{-x^2/2}, & x > 1 \end{cases} \tag{5}$$

만일 시스템 상에서 수용 가능한 BER 수준이 10^{-3}수준이라면 이때의 필요한 SNR값을 위의 (4)를 통해 구하면 약 7dB임을 알 수 있다[9].

이처럼 일정 수준의 BER를 위한 SNR값을 얻으면 이 SNR값에 따라서 공간 다중화를 사용하여 더 높은 전송속도를 얻을 것인지, 아니면 더 나은 전송 안정성을 구할 것인지를 결정해야 한다. [그림 4]에서 들었던 예와 같은 경우, 첫 번째 사용자에게 1, 4, 6번째 안테나가 할당되었었는데, 위의 기준에 의하면 1번째 안테나와 6번째 안테나의 경우에는 각각 8dB와 7dB로 기준 BER를 만족하기 위한 SNR값인 7dB를 만족하기 때문에 공간 다중화를 사용하여 전송속도를 높일 수 있다. 하지만 4번째 안테나의 경우, 5dB로 낮기 때문에, 공간 다중화를 통해 다른 데이터를 보내기에는 적절하지 않다. 따라서 공간 다이버시티를 통해 다른 안테나의 데이터 전송 안정도를 높여주어야 하는데, 6번째 안테나의 경우에 SNR값이 더 좋지 않기 때문에(8dB > 7dB), 6번째 안테나와 같은 데이터를 전송하도록 하는 방안이 사용될 것이다.

이처럼 본 논문에서는, 다수의 안테나를 할당받은 사용자가 효율적으로 안테나를 사용할 수 있는 방안을 제시하고 있다.

V. 결 론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는, multiuser MIMO 시스템에서 여러 명의 사용자가 다수의 안테나를 효율적으로 사용하기 위한 새로운 전략을 제시하였다.

P-SFS를 통해서 좋은 채널환경의 사용자가 안테나를 사용할 수 있도록 AA-RRS방법의 SUG 설정에 제한을 없앰으로써, 시스템 자원의 효율적인 사용을 가능케 하였고, Pseudo-SNR의 개념을 도입하여, 다양한 채널환경 속에 있는 사용자들 사이에 fairness를 해결할 수 있는 방안도 제시하였다. 또한 시시각각 변화하는 시스템의 요구사항에 따라 fairness 조절 변수를 변경하여, 유연하게 대처할 수 있도록 하였다.

그리고 다수의 안테나를 할당받은 한 사용자에 대해서는, 채널 환경에 따라 공간 다중화와 공간 다이버시티를 효율적으로 사용하기 위해서 BER를 이용한 적정수준의 SNR값을 얻어냄으로써, 이 SNR 값에 따라서 안테나의 활용 방법을 선택하는 방안을 제시하였다. 이를 통해 좋은 채널환경에 있으면 공간 다중화를 통해 더 나은 전송 속도를 얻을 수 있고, 채널 환경이 좋지 않은 경우에는 공간 다이버시티를 이용하여 데이터 전송 시의 에러확률을 줄여주는 방안을 제시하였다.

이처럼 본 연구를 통해 우리는 기존 논문들이 중요하게 다루었던 다중 사용자 다이버시티의 적절한 활용과 더불어, 간과되었던 공간 다중화 및 공간 다이버시티의 효율적인 활용방안을 제시하였다.

향후에 이 논문에서 제시한 스케줄링 전략과 기존에 사용되었던 AA-RRS, PFS(Proportional Fair Scheduling), Greedy 알고리즘 등과 시스템의 효율성과 fairness 측면을 시뮬레이션을 통해 비교 분석하여, 얼마만큼의 성능의 개선을 보일 수 있을지 검토해 보아야 할 것이다. 또한 fairness 조절 변

수에 대한 성능 변화의 민감도 분석을 통해 시스템 효율성 향상과 fairness 사이의 trade-off 관계 규명을 통해 실제 시스템 상에서 본 논문에서 제시한 전략을 효과적으로 활용할 수 있도록 해야 할 것이다.

< 참 고 문 헌 >

[1]G. J. Foschini, 1996, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas", Bell Labs technical Journal.

[2] L. Zheng and D. N. C. Tse, 2003, "Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels", IEEE Transactions on Information Theory 49(5), pp.1073-1096.

[3] R. W. Heath Jr., M. Airy and A. J. Paulraj, 2001, "Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers", IEEE Communications letters 5(4), pp.142-144.

[4] S. M. Alamouti, 1998, "A simple transmit diversity technique for wireless communications", IEEE Journal on Selected Areas in Communications 16(8), pp.1451-1458.

[5] W. Ajib and D. Haccoun, 2005, "An Overview of Scheduling Algorithms in MIMO-Based Fourth-Generation Wireless Systems", IEEE Network 19(5), pp.43-48.

[6] P. Ting, J. C. Chen, C. K. Wen, and J. T. Chen, 2004, "Efficient Multiuser MIMO Scheduling Strategies", Vehicular Technology Conference 2, pp.1139- 1142.

[7] Y. J. Choi, J. Kim and S. Bahk, 2004, "Downlink Scheduling with Fairness and Optimal Antenna Assignment for MIMO Cellular Systems", IEEE Communications society Globecom 5, pp.3165-3169.

[8] O. S. Shin and K. B. Lee, 2003, "Antenna-Assisted Round Robin Scheduling for MIMO Cellular Systems", IEEE Communications letters 7(3), pp.109-111.

[9] D. Tse and Viswanath P, 2005, "Fundamentals of Wireless Communication", Cambridge, pp.49-59.