

MIMO OFDM 다중사용자 시스템 사용자간 공평성을 고려한 스케줄링 기법

준회원 안 세 현*, 정회원 유 명 식*, 이 원 철*, 신 요 안*

Fairness-aware Scheduling Scheme for MIMO OFDM Multiuser Diversity System.

Sehyun An* Associate Member, Myungsik Yoo*, Woncheol Lee*, Yoan Shin* Regular Member

요 약

본 논문에서는 MIMO OFDM (Multi Input Multi Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서 다중사용자 다이버시티 (Multiuser Diversity) 이득을 최적화함과 동시에 일부 사용자가 전송대역을 독점하는 현상을 방지하는 무선자원 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 물리계층과 MAC (Media Access Control) 계층이 연동하는 형태의 시스템 구조를 기반으로 MIMO OFDM 수신단으로부터의 무선채널상태 제환정보의 중복도 및 전송 큐(Queue) 크기를 동시에 고려하는 무선자원 분배 알고리즘이다. 모의 실험을 통하여 다중사용자 다이버시티 시스템을 위한 기존 스케줄링 방식인 RR, K&H 방식과 성능을 비교 평가하였다.

Key Words : MIMO, OFDM, Multiuser Diversity, Fairness, Scheduling

ABSTRACT

In this paper, we present a new scheduling scheme for MIMO OFDM Multiuser Diversity System. This scheduling scheme maximizes the system throughput, and at the same time fairly shares the resources based on the feedback information from the receivers and the queue information. To show the effectiveness of the proposed algorithm, we evaluate the performance of the proposed algorithm as compared to K&H and RR algorithms.

1. 서 론

고품질, 고용량 멀티미디어 데이터 전송을 필요로 하는 차세대 이동통신 및 휴대 인터넷 시스템을 위한 다양한 무선 전송 기술들이 연구되고 있다. MIMO(Multi Input Multi Output) 기술은 다수의 송신 및 수신 안테나를 사용하여 대역폭의 증대 없이 물리적인 전송용량의 증대, 커버리지 증대, 다중 사용자 기법을 통한 전송이득 등의 효과를 얻을 수 있는 차세대 무선 전송 시스템을 위한 기술이다 [1~3]. 이와 더불어 OFDM(Orthogonal Frequency

Division Multiplexing) 방식은 다중경로에 의해 발생하는 심각한 주파수 선택적 페이딩 채널에 쉽게 대처할 수 있고, 심볼 간 간섭이 적으므로 고속전송에 유리하다. 현재 IEEE 802.11a, IEEE 802.16e (Wibro) 등의 무선 접속기술에서 표준방식으로 채택되었다[4]. 이 두 가지 방식이 접목된 MIMO OFDM 방식에 대한 연구는 주로 물리계층에서의 단순한 전송용량의 증대를 위한 스케줄링 방식이 주를 이루고 있으며, MAC 계층과의 연계를 통하여 보다 효과적인 전송을 위한 MIMO OFDM 시스템의 Cross Layer 설계 관련연구도 발표되고 있다[5].

* 숭실대학교 네트워크 설계 및 분석 연구실 (myoo@ssu.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-04-167, 접수일자 : 2005년 4월 18일

※ 본 연구는 학술진흥재단 협동연구과제 (KRF-2003-042-D00141)에 의하여 수행되었음.

그러나 단순한 시스템 전송용량의 증대를 위한 스케줄링 방식은 일부 무선채널 환경이 좋은 사용자가 전체 시스템 전송용량을 독점하는 현상이 발생한다. 반면 전송용량의 최대화를 고려하지 않고 모든 사용자에게 공평한 전송용량을 할당하는 스케줄링 방식은 모든 사용자의 전송효율을 떨어뜨리는 결과를 초래한다.

본 논문에서는 MIMO OFDM 시스템에서 다중사용자 다이버시티 이득을 최대화 하면서 일부 사용자의 전송용량 독점을 방지하는 새로운 무선자원 스케줄링 방식을 제안한다. 제안된 방식의 성능 평가를 위하여 MIMO OFDM 다중사용자 다이버시티를 위한 기존의 스케줄링 방식 중 공평성을 고려한 RR (Round Robin) 방식 및 전송성능을 최대화하는 K&H (Knopp & Humblet) 방식[6]에 대하여 전송용량 및 사용자간 공평성 측면에서 성능을 비교 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존의 무선 통신 접속기술에서의 다중사용자 스케줄링 방식 및 MIMO OFDM 시스템 관련 연구를 살펴보고 III장에서는 본 논문에서 제안하는 FATM (Fairness Aware Throughput Maximizing) 기법에 대하여 설명한다. IV장에서는 모의실험을 통하여 FATM의 전송효율 및 공평성 제공 성능을 RR 및 K&H의 성능과 비교하여 분석한다. 마지막으로 V장에서 본 논문에 대한 결론을 기술한다.

II. 관련 연구

2.1 MIMO OFDM 기술

시스템 용량 증대를 위한 MIMO-OFDM 기술은 공간 분할 다중화(SDM : Spatial Division Multiplexing)[7] 방식과 시공간부호 (STC : Space Time Code)[8] 방식으로 분류할 수 있다. 이중 STC는 STTC(Space-Time Trellis Code)와 STBC(Space-Time Block Code)가 있는데 STTC는 그 복잡도 때문에 대부분 배제되고 있고 STBC가 많은 관심을 받고 있다. SDM은 송신 안테나의 개수만큼 물리적인 전송률을 향상 할 수 있는 방식인 반면에 STBC는 송신 다이버시티 이득을 통하여 성능 향상을 이루지만 직접적으로 전송률을 향상시키는 기술은 아니다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 기본적으로 SDM 기반의 V-BLAST MIMO-OFDM 시스템 모델을 가정한다. 모든 수신 단말은 주기적으로 자신의 각 안테나 및 OFDM 부채널의 CSI(Channel State Infor-

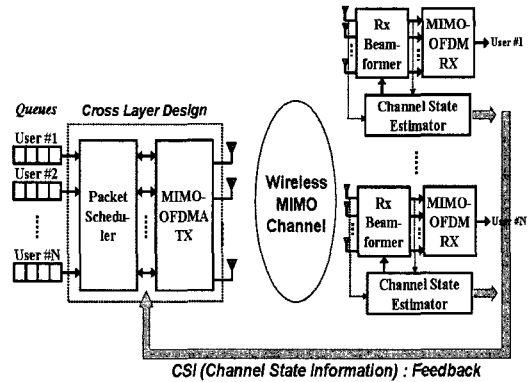


그림 1. MIMO-OFDM 다중 사용자 시스템 구조

mation)를 BS(Base Station)에게 전송한다. BS의 스케줄러는 모든 사용자로부터의 CSI를 참조하여 차등적으로 무선 자원을 할당하게 된다. 시스템의 전송용량만을 증대시키기 위한 방식에서는 일부 사용자가 전송 대역을 독점하는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 전송 안테나 공간, 주파수 분할 공간, 전송시간을 고려하여 일부 사용자의 전송기회의 독점을 피하면서 전체 전송용량을 극대화 할 수 있는 스케줄링 방식이 필요하다.

2.2 다중 사용자 스케줄링 방식

차세대 휴대 인터넷 환경에서의 초고속 고품질의 서비스 요구에 따라 이동통신 시스템은 한정된 무선자원을 보다 효율적으로 사용함으로써 각각의 사용자가 요구하는 전송률을 만족시켜야 한다. 한정된 무선자원으로 보다 많은 양의 사용자 트래픽을 전송하기 위하여 시간, 주파수 및 공간의 관점에서 자원을 분리하여 할당함으로써 제한적인 무선자원에 대한 효율을 극대화하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 무선자원 환경이 시간에 따라 변화하는 특성을 이용하여 무선자원 사용 효율을 극대화하고자하는 다중 사용자 다이버시티[9,10]에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 다중 사용자 다이버시티 방식에서는 무선자원 할당을 담당하는 MAC 계층이 수신단으로부터 채환되어 오는 무선자원 상태정보를 참조하여 스케줄링을 통한 효과적인 무선자원 할당을 수행한다. 따라서 다중 사용자 다이버시티로부터 얻어질 수 있는 이득은 MAC 계층의 스케줄러의 성능에 밀접한 관계를 가진다. 다중 사용자 다이버시티를 위한 기존의 스케줄링 방식으로는 크게 RR(Round Robin), K&H(Knopp &Humblet), Joint RR/K&H 스케줄링 등을 들 수 있다.

2.2.1 RR(Round Robin) 스케줄링

RR 스케줄링은 임의의 시간에 가용한 무선 채널의 용량을 사용자 모두에게 동등하게 할당한다. RR 스케줄링은 모든 사용자에게 균등한 지연 서비스를 제공할 수 있다는 장점이 있는 반면, 가용한 무선자원의 용량 극대화와 차별화된 서비스 지원이 어려운 단점이 있다.

2.2.2 K&H(Knopp&Humblet) 스케줄링

RR 스케줄링이 모든 사용자에게 동일한 자원을 할당해 준 반면, K&H 스케줄링은 사용자로부터 수신된 CSI의 수신 이득을 측정하여 그 중 가장 큰 수신 이득을 갖는 사용자에게만 무선자원을 할당한다. 따라서 K&H는 특정 시간별로 최대 전송량을 지원할 수 있는 사용자를 선택하므로 한정된 무선 자원 효율을 극대화 할 수 있으나, K&H는 지연에 민감한 실시간 서비스의 제공이 어려운 단점이 있다. 또한 짧은 기간일지라도 일부 사용자가 전송용량을 독점하는 상황이 발생할 수 있다.

III. FATM(Fairness-aware Throughput Maximizing) 스케줄링 방식

본 논문에서는 K&H의 단점인 일부 사용자의 전송대역 독점현상을 극복하고 전송 용량을 극대화 하면서 모든 사용자에게 비교적 균등한 전송 기회를 부여하는 새로운 스케줄링 방식을 제안한다.

전체 사용자 N 중, 사용자 k 의 안테나 a , OFDM 부채널 s 에 대한 채널정보인 CSI 레벨 l_{as}^k 는 0에서 7의 레벨 값을 가지며 $a \times s$ 크기의 행렬 L_k 의 형태로 나타낸다. 각 사용자는 L_k 를 BS(Base Station)로 전송한다. D 는 모든 무선 자원에 대하여 할당되어진 사용자 정보를 나타내는 $a \times s$ 행렬이며 Q_k 는 사용자 k 의 큐 크기를 나타낸다. 그림 2에서와 같이 BS는 사용자 k 로부터의 L_k 를 \hat{L}_k 로 변환한다. \hat{L}_k 는 특정 CSI 레벨 값 l 에 대하여 L_k 의 모든 $l_{as}^k = l$ 인 경우 $\hat{\gamma}_{as}^k = 1$ 로, $l_{as}^k \neq l$ 인 경우, $\hat{\gamma}_{as}^k = 0$ 로 설정한 행렬이다. BS는 모든 사용자 k 에 대하여 \hat{L}_k 를 합산하여 B^l 을 만든다.

$$\hat{\gamma}_{as}^k = \begin{cases} 1, & (l_{as}^k = l) \\ 0, & (l_{as}^k \neq l) \end{cases} \quad (1)$$

$$B^l = \sum_{k=1}^N \hat{L}_k^l, \quad b_{as}^l = \sum_{k=1}^N \hat{\gamma}_{as}^k \quad (2)$$

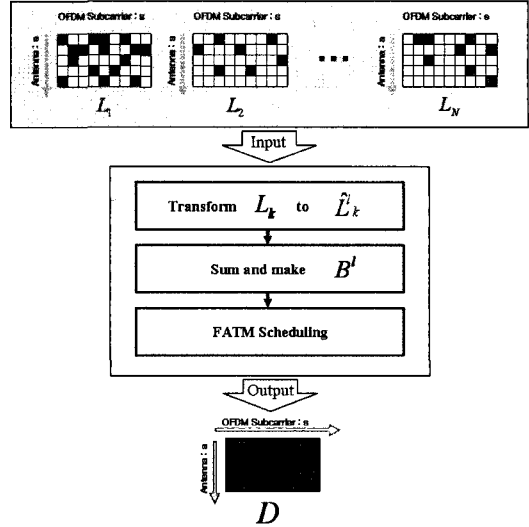


그림 2. FATM 스케줄링 알고리즘 개념도

BW_{as} 는 안테나 a , OFDM 부채널 s 에 대응하는 OFDM 심볼의 크기를 나타낸다. 그림 3에서와 같이 CSI 레벨의 최대치인 l_{max} 부터 0까지 순차적으로 감소시키면서 각각의 B^l 에 대하여 중복도가 적은, 즉 b_{as}^l 의 값이 1인 경우부터 시작하여 N 인 경우의 순으로, 해당 사용자로의 전송 큐의 크기가 가장 큰 사용자에게 무선 자원을 할당하는 무선자원 분배 알고리즘을 수행한다.

```

for (l = l_max ~ 0)
  for (i = 1 ~ N)
    for (a = 1 ~ A)
      for (s = 1 ~ S)
        if (b_{as}^l = i)
          for (all k with l_{as}^k = l)
            find k' with MAX[Q_k]
            if (Q_k > 0)
              d_{as} = k' and Q_k = Q_k - BW_{as}
    
```

그림 3. FATM 스케줄링 알고리즘

이 방식은 같은 상태를 가진 무선 자원을 대상으로, 사용자간 중복이 적은 채널을 우선으로 할당하고 전송 큐의 크기를 고려하여 차별적으로 스케줄링하므로 전체 전송 효율을 비교적 감소시키지 않으면서 여러 사용자에게 동등하게 무선 자원을 분배하는 효과를 기대할 수 있다.

표 1. 모의실험 파라미터

Item	Value
Number of Tx Antennas	4
Number of Rx Antennas	4
OFDM Subcarriers	1024
Traffic Load	1.0
Modulation	16QAM
OFDM Symbol Duration	115.2 μ s
Guard Interval	14.4 μ s
Processing Delay	23.2 μ s
Number of Receivers	1~10
CIR(Carrier to Interference Ratio)	5,10,15,20,25dB
Wireless Link Capacity	100 Mbps

IV. 모의 실험

제안 방식의 성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 모의실험을 수행하였다.

4.1 모의실험 모델

송수신 안테나 수가 동일한 MIMO OFDM 무선 채널 모델로서 RMS 지연 확산 (Root-Mean-square Delay Spread)이 4 ns, 10개 경로로 구성된 주파수 선택적 레일리 (Reyleigh) 페이딩 채널을 가정하였다. 도플러 주파수는 300Hz를 가정하였으며, 채널 추정과 시스템 동기는 완벽히 이루어진다고 가정한다. 실험에 사용된 트래픽은 인터넷 멀티미디어 트래픽을 가정하였으며 지수분포(Exponential)의 무작위성을 가진 트래픽을 사용하였다. 그밖에 세부적인 모의실험 파라미터는 표 1과 같다.

4.2 무선 채널 상태에 따른 전송효율 및 공평성 제공 성능평가

10개의 사용자가 모두 동일한 CIR을 갖는 무선 채널 환경에서 CIR의 변화에 따라 전체 시스템의 전송효율 및 공평성 제공성능을 평가하였다. 그림 4는 10개의 사용자 중 한 개의 사용자가 각 스케줄링 방식에 의하여 100회의 순환동안 수신대역을 할당받는 실험 결과이다. RR 방식을 기준으로 평가하였을 때 K&H 방식이 FATM 방식보다 매 회 할당 대역의 변화도가 큰 것을 알 수 있다. 그림 5에서는 각각의 스케줄링 방식에 의한 평균 시스템 전송효율을 나타내었다. FATM 스케줄링 방식은 동일한 채널 환경에서 K&H 방식보다 매회 할당 대역의 변화는 적으나 평균적인 전송효율은 거의 동일한 성능을 보인다. 그림 6에서는 CIR의 변화에 따라

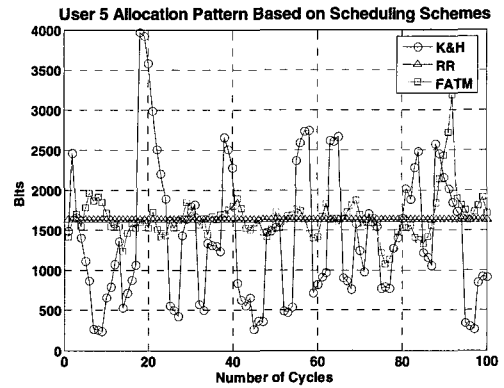


그림 4. 스케줄링 방식별 전송대역 할당 유형

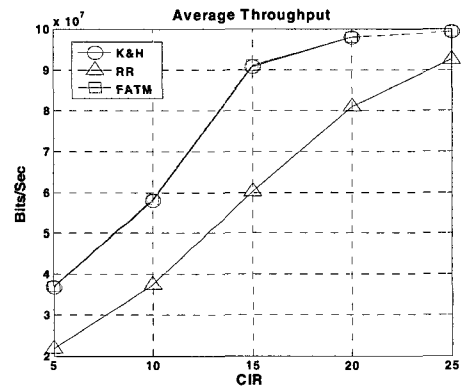


그림 5. CIR의 변화에 따른 스케줄링 방식별 평균 시스템 전송효율

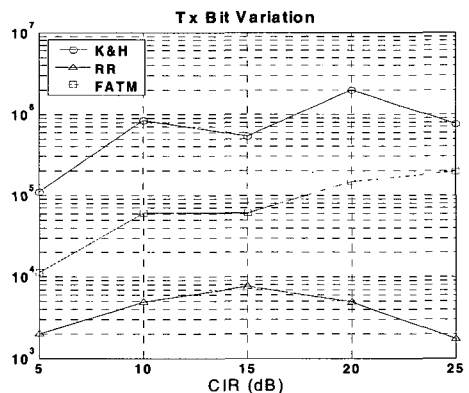


그림 6. 채널 상태 변화에 따른 스케줄링 방식별 전송 비트의 분산값

각 사용자가 매 회 수신한 비트수의 분산을 각 스케줄링 방식 별로 나타내었다. 실험한 모든 CIR에서 FATM 방식의 분산이 RR 방식보다는 높지만 K&H 보다는 낮은 결과를 나타내었다. 이는 FATM

방식이 K&H 방식에 비하여 일부 사용자로의 과도한 자원 할당을 방지하고 보다 안정적으로 무선 자원을 분배함을 의미한다.

4.3 사용자 수에 따른 시스템 전송용량 및 공평성 제공 성능평가

MIMO OFDM 다중 사용자 시스템에서는 사용자의 수가 증가함에 따라 무선자원의 선택범위가 넓어지므로 이를 잘 활용하면 전체적인 시스템의 전송용량측면에서의 이득을 얻을수 있다. 모든 사용자의 무선 채널이 15dB의 동일한 CIR을 가질 때 사용자의 증가에 따라 시스템 전송용량 및 공평성을 평가하였다.

그림 7에서와 같이 사용자의 수가 증가할수록 K&H 방식과 FATM 방식의 경우 다중사용자 다이버시티 이득이 발생하여 전송효율이 증가하는 결과를 보인다. 이 실험결과에서도 FATM 방식은 평균 시스템 전송효율 측면에서 K&H 방식과 거의 비슷한 성능을 보임을 알 수 있다.

그림 8은 사용자 수의 증가에 따라 각 사용자당 매 회 수신한 비트수의 분산을 평균 시스템 전송효율에 대비하여 나타내었다. RR 방식과 FATM 방식은 사용자 수가 증가할수록 평균 시스템 전송효율

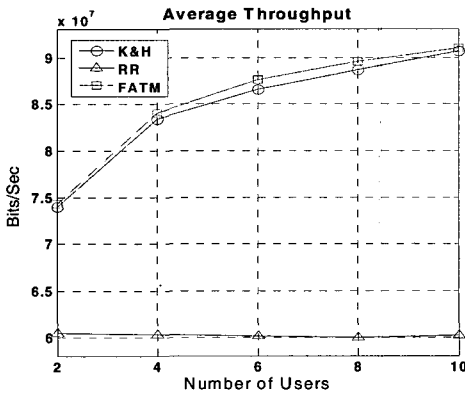


그림 7. 사용자수 변화에 따른 시스템 평균 Throughput

표 2. 스케줄링 방식에 따른 CIR대비 전송률 및 분산

	K&H		RR		FATM	
	E_x	σ_x^2/E_x	E_x	σ_x^2/E_x	E_x	σ_x^2/E_x
5dB	8389468.58	151.11	4322251.88	5.00	11779179.81	71.06
10dB	9082989.57	409.01	7688910.46	5.69	12344333.90	112.15
15dB	14511041.01	209.99	12024023.30	5.53	12440184.42	107.64
20dB	21273477.31	608.63	16361805.39	2.88	16285852.95	114.85
25dB	24018927.44	373.94	18511526.33	1.11	17560058.24	200.83
Total	77275903.91	563.44	58908517.35	197.66	70409609.00	159.09

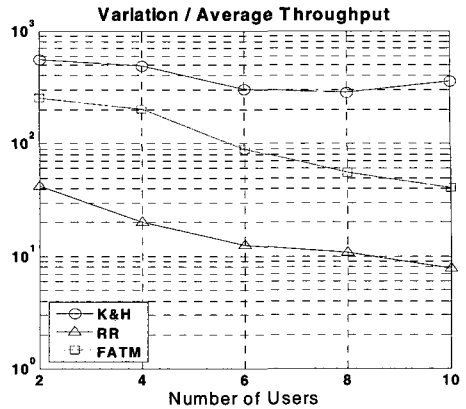


그림 8. 사용자수 변화에 따른 평균 시스템 전송효율 대비 분산

대비 분산값이 낮아지는 결과를 보였다. 이는 사용자 수의 증가에 대하여 보다 고른 자원 분배를 수행함을 의미한다. 반면 K&H는 평균 시스템 전송효율 대비 분산값이 상대적으로 감소하지 않는다. 즉 사용자 수의 증가에 따라 일부 사용자로의 자원 과잉 할당 현상에 의한 영향이 더욱 심각해짐을 의미한다.

4.4 서로 다른 무선 채널 환경을 가진 사용자 간의 전송용량 및 공평성 제공 성능평가

본 논문에서 설명하고 있는 MIMO OFDM 스케줄링 방식은 사용자로부터 채환되는 CSI정보를 기반으로 무선자원을 분배한다. CSI의 추정은 각 사용자에서 바라본 무선 채널의 신호의 세기(CIR : Carrier-Interference Ratio)를 고정된 임계치(Threshold)에 의하여 양자화 하여 8개의 레벨로 분리한다. 평균 CIR이 다른 사용자 간의 스케줄링 성능을 평가하기 위하여 다음과 같이 실험하였다. 10개의 사용자를 평균 CIR 5dB에서 25dB까지 5dB 간격으로 5개의 그룹으로 나누어 각각 2개씩 분포되었다고 가정하고 K&H, RR, FATM에 의한 스케줄링 성능을 분석하였다.

표 2는 각 CIR별 그룹 및 전체 시스템 평균 전

송효율 및 평균 전송효율 대비 분산 값을 표시하였다. 전체 시스템 평균 전송효율은 K&H 방식이 가장 우수한 성능을 나타내었다. FATM 방식은 모든 사용자가 같은 평균 CIR의 채널 환경일 때와 비교하여 K&H 방식보다 상대적으로 시스템 전송효율이 떨어지는 결과를 보인다.

반면 사용자 그룹별 전송효율 성능에서는 그림 9가 나타내는 결과와 같이 K&H 방식의 경우 채널의 상태가 좋은 사용자 그룹으로 전송용량이 몰리게 되며 상태가 좋지 않는 사용자 그룹으로 갈수록 전송효율 성능은 급격하게 열화된다. RR 방식의 경우 무선 채널의 상태와 관계없이 모든 사용자에게 균등한 양의 전송대역을 할당하므로 사용자 별 전송효율은 채널상황에 따라 변화하는 결과를 보인다. 그림 10이 나타내듯이 동일 그룹에서의 사용자 별 전송효율 대비 분산값은 매우 균등한 성능을 보이나 전체 시스템에서의 전송효율 대비 분산값에 대한 성능은 오히려 FATM 방식보다 낮은 성능을 보인다.

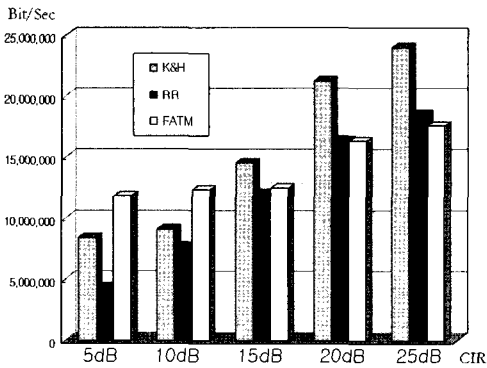


그림 9. CIR에 따른 사용자별 평균 Throughput

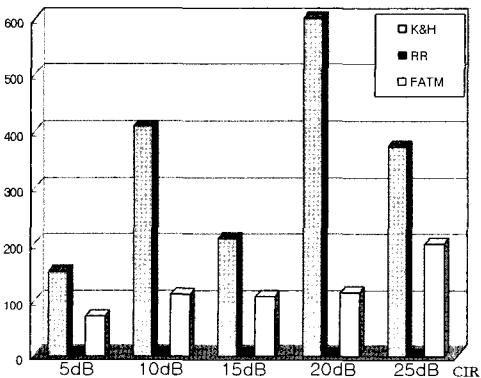


그림 10. CIR의 변화에 따른 평균 전송비트 대비 분산값의 분포도

FATM은 전송효율 측면에서 K&H 방식의 91%에 이르는 높은 전송효율을 보이면서 그림 10에서 나타내듯이 가장 낮은 평균 시스템 전송효율 대비 분산 값을 보인다. 이는 사용자 간 채널 환경의 차이가 심한 상황에서 매 회의 스케줄링 주기마다 FATM 방식이 RR 방식보다도 안정적인 전송대역 분배를 함을 의미한다.

V. 결론

본 논문에서는 MIMO OFDM 다중 사용자 시스템에서의 사용자 다이버시티 이득을 위한 스케줄링 방식인 FATM 스케줄링을 제안하였다. 기존의 K&H 방식과 비교하여 장기간 전체 시스템 전송용량을 최대화함과 동시에 매 회의 스케줄링 주기에도 일부 사용자로의 전송 대역 독점현상을 방지하며 보다 안정적으로 무선 자원에 대한 분배 성능을 보이는 것을 모의실험을 통하여 확인하였다. 또한 각 사용자 사이의 무선 채널 상태의 차이가 큰 상황에서 전송효율을 극대화 하면서도 RR 스케줄링 방식보다 안정적인 스케줄링 성능을 보임을 증명하였다. 이러한 사용자간 공평성을 고려한 스케줄링 방식의 개발을 통하여 MIMO OFDM 시스템을 이용한 휴대 인터넷 환경에서 실시간 음성 서비스 및 멀티미디어 서비스를 보다 낮은 지연으로 다수의 사용자에게 안정적으로 제공할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, Introduction to Space-Time Wireless Communications, Cambridge University Press, 2003.
- [2] Y. Xiao, et al, "Throughput analysis for IEEE 802.11a higher data rates," IEEE 802.11 document, doc. No. 11-02-0138-00-0wng, Mar. 2002.
- [3] Z. G. Pan, K. K. Wong, and T. S. Ng, "MIMO antenna system for multi-user multi-stream orthogonal space division multiplexing," Proc. IEEE Int'l Conf. Commun. (ICC 2003), vol. 5, pp. 3220-3224, Anchorage, USA, May 2003.
- [4] K. W. Ng, R. S. Cheng, and R. D. Murch, "A simplified bit allocation for VBLAST based OFDM MIMO systems in frequency

