

고속 이동 통신을 위한 적응 가능한 라운드 로빈 스케줄링 방식

(An Adjustable Round Robin Scheduling Algorithm for the High Data Rate Mobile Communication System)

배 정 민 [†] 송 영 금 ^{**} 김 동 우 ^{***}

(Jeong-Min Bae) (Young-Keum Song) (Dong-Woo Kim)

요 약 제 3세대 이동통신 시스템은 패킷 기반의 데이터 통신으로 기존의 음성 위주의 통신보다 더 다양한 종류의 트래픽을 지원하는 것을 목표로 하고 있다. 따라서 유한한 자원을 가지고 최대한의 서비스를 최대한의 성능으로 지원하는 스케줄러가 시스템에 반드시 필요하다. 본 논문에서는 기존의 스케줄러들을 살펴보고, 이를 바탕으로 특정 시스템의 전송속도를 최대화하면서 각 사용자의 QoS(Qualities of Service)를 보장하는 스케줄러를 제안하였다. 다중 입력 다중 출력(MIMO) 시스템에서 전송량의 최대화를 추구하면서 형평성을 유지하는 스케줄링을 제안하였으며, 이를 수식적 접근에 의하여 분석하였고, 모의실험을 통해서 검증하였다.

키워드 : 3세대 이동통신 시스템, 다중 입력 다중 출력(MIMO), QoS, 스케줄링 알고리즘

Abstract Next-generation wireless networks are expected to support a wide range of services, including high-rate data applications. Various service types request differentiated QoS(Qualities of Service) such as minimum data rate, accuracy, fairness and so on. Although resources of radio systems are limited, for many applications, it is important that certain QoS targets are required to be met.

In this paper, we propose a QoS based scheduling algorithm for next generation systems, based on analyzing previous researches, and we develop the proposed QoS algorithm only for MIMO(multi-Input Multi-Output) systems. Moreover, we subsequently prove that the proposed algorithm optimize throughput relative to prespecified target values and converge to certain throughput.

Key words : 3G Wireless Networks, MIMO(Multi-Input Multi-Out), QoS(Qualities of Service), Scheduling Algorithm

1. 서 론

최근의 무선 통신 시스템은 음성 통신뿐만 아니라 데이터 통신에 대한 수요가 점차 증가하고 있다. 음성 통신 서비스를 지원하기 위해 시스템은 각 사용자에게 일정한 대역폭을 지속적으로 할당하여야 한다. 그러나 데이터 통신은 음성 통신에 비하여 긴 전송 지연(delay)을

허용할 수 있으므로, 적절한 스케줄링 기법을 사용하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.

다중 입력 다중 출력(MIMO) 시스템에서는 공간 다중화(Spatial Multiplexing) 방법을 사용하여 데이터 열을 전송한다[1,2]. 공간 다중화란 데이터 열을 여러 개의 하위 열로 나눈 뒤, 이 하위 열들을 각각의 안테나에 나눠 할당하여 전송하는 방식을 말한다. 따라서 공간 다중화 방법을 사용하는 MIMO의 경우 어떤 안테나에 하위 열을 할당할지 결정하는 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

먼저 현재의 시스템은 다중 사용자에 대해 고려해야만 한다. 다음으로 각 사용자 및 기지국 측면에서의 기지국 전송량(throughput) 향상과 각 사용자간의 공평성(fairness) 보장이 필요하다. 즉 시스템의 성능은 증가시키면서 사용자간의 공평성은 보장하는 패킷 스케줄러가 필요하다.

· 이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-041-D00389)

[†] 비 회 원 : 한양대학교 전자전기 제어계측공학과
baejeongmin@hotmail.com

^{**} 학생회원 : 한양대학교 전자전기 제어계측공학과
muscin@wnl.hanyang.ac.kr

^{***} 비 회 원 : 한양대학교 전자전기 제어계측공학과 교수
dkim@hanyang.ac.kr

논문접수 : 2006년 6월 29일

심사완료 : 2006년 11월 24일

라운드 로빈(Round Robin) 스케줄링 방식은 모든 사용자에게 같은 시간구간을 할당함으로써 정확한 공평성을 보여준다. 그러나 정확한 공평성의 이점에도 불구하고 시스템 개발자들은 라운드 로빈 스케줄링 방식을 시스템 전체 성능의 저하 때문에 사용할 수 없다. 하지만, 라운드 로빈 스케줄링 방식이 정확한 공평성을 제공하는 방식임에는 틀림이 없다. Antenna Assisted Round Robin 방식[2]은 라운드 로빈 스케줄링 방식을 향상시킨 것으로 라운드 로빈 방식과 같이 공평하게 채널에 액세스 할 수 있는 기회를 주면서 다중 안테나를 사용하여 다중 사용자 다이버시티 효과를 얻도록 한 방식이다.

또한 시스템의 성능 즉, 기지국 전송량의 측면에서 스케줄링 방식을 생각한다면 최고의 채널 환경을 가지는 사용자에게 시간구간을 할당하는 방식이 고려될 수 있다. 그러나 이 방식은 채널 환경이 좋은 사용자에게만 시간구간이 할당되어 상대적으로 채널 환경이 나쁜 사용자는 데이터 전송을 하지 못하게 되는 문제점을 가진다. 이러한 관점에서 볼 때, 시스템의 특성을 결정하는 스케줄링 방식은 시스템 성능에 매우 큰 영향을 미친다. 그러므로 기지국 전송량과 공평성을 동시에 만족시킬 수 있는 스케줄링 방식에 대한 연구는 반드시 필요하다.

본 논문에서는 다중 사용자 환경에서 MIMO 시스템에 맞는 패킷 스케줄러 개발을 위해 탄성 라운드 로빈(Elastic Round Robin) 방식을 보완하여 Adjustable Round Robin 스케줄링 방식을 제안한다[3,4]. 제안한 Adjustable Round Robin 스케줄링 방식은 과거의 할당량에 대한 불공평성(unfairness)을 현재의 할당량에 적용하여, 현재는 기지국 전송량을 올리는 관점에서 안테나에 사용자를 할당하고, 최종적으로는 공평성을 보장하는 라운드 로빈 스케줄링 방식으로 동작하는 것을 볼 수 있다. 그리고 MIMO 시스템에서의 Adjustable Round Robin 방식의 성능 향상 및 공평성 보장을 수식과 모의실험을 통해 보일 것이다.

2. 기존의 스케줄링 기법

2.1 라운드 로빈(Round Robin) 방식

라운드 로빈 스케줄러는 한 라운드 동안 전송 가능한 사용자들에게 순차적으로 전송 기회를 부여한다. 각 사용자에게 같은 횟수의 전송 기회를 부여하여, 사용자간의 시간적 공정성을 보장한다. 그러나 무선 통신 환경에서는 채널 환경에 따라 전송할 수 있는 전송량이 동적으로 변화하기 때문에 각 사용자간의 전송량에 대해서는 공정성을 보장할 수 없다. 이러한 전송량의 공정성을 보장하기 위한 방법으로 부족 라운드 로빈(Deficit Round Robin: DRR) 방식[4]과 초과 라운드 로빈(Surplus Round Robin: SRR) 방식, 동적 부족 라운드

로빈(Dynamic Deficit Round Robin: DRRR) 방식이 제안되었다.

2.2 탄성 라운드 로빈(Elastic Round Robin: ERR) 방식

탄성 라운드 로빈 방식[3]은 매 라운드 시작 시점에 각 사용자의 허용 전송량(allowance)을 결정한다. 각 사용자는 전송 허용량을 초과할 때까지 라운드 로빈 방식으로 전송을 수행한다. ERR은 라운드 로빈 방식과 달리 각 사용자에게 허용 전송량 이상의 전송을 보장하여 전송량 측면에서의 공정성을 제공한다. 여기서 라운드 r 에서 사용자 i 의 허용 전송량 $A_i(r)$ 은 식 (1), (2)에 의해서 결정된다.

$$SC_i(r) = Sent_i(r) - A_i(r) \quad (1)$$

$$A_i(r) = 1 + Max SC_i(r-1) - SC_i(r-1) \quad (2)$$

사용자의 실제 전송량 $Sent_i(r)$ 에서 허용 전송량 $A_i(r)$ 을 뺀 잉여 전송량 $SC_i(r)$ 이 매 라운드 계산된다. 이전 라운드에서 많은 양을 전송하여 잉여 전송량이 큰 사용자는 다음 라운드에서 비교적 작은 허용 전송량을 가지고, 잉여 전송량이 작은 사용자는 큰 허용 전송량을 가지므로써 사용자 간의 공평성을 제공한다. 여기서 $Max SC(r)$ 은 라운드 r 의 모든 사용자 중 $SC_i(r)$ 의 최대값을 의미한다.

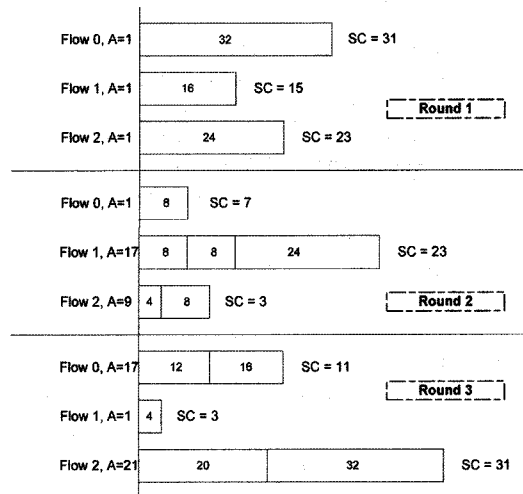


그림 1 Elastic Round Robin의 동작

다음 식 (3)은 현재 라운드에서 사용자가 전송한 실제 전송량을 나타내고, 식 (4)는 정해진 구간 안에서의 전송량 상한 치를 의미한다.

$$Sent_i(r) = 1 + Max SC(r-1) - SC_i(r-1) + SC_i(r) \quad (3)$$

$$Sent_i(t_1, t_2) \leq n_i + \sum_{r=k_1-1}^{k_1+n_i-2} Max SC(r) + (m-1) \quad (4)$$

3. 제안하는 스케줄링 기법

Adjustable Round Robin(ARR) 알고리즘은 MIMO 시스템에서 성능 향상을 위하여 ERR을 보완하여 제안하였다[2-5]. 먼저 ERR의 단점으로 ERR은 라운드의 초기에 각 사용자의 허가 전송량이 정해지면 허가 전송량의 한도 내에서 라운드 로빈 방식으로 동작하게 된다. MIMO시스템에서는 각각의 채널 상태가 일정 구간마다 보고됨으로써 현재 채널 상태에 따라 전송하여 총 전송량을 높일 수 있다. 따라서 ARR 알고리즘은 ERR에서 허가 전송량을 정하여 전송하는 개념을 도입해서 각 사용자의 공평성을 유지하고, 전송 시에는 채널 상태 보고에 의하여 최고의 사용자를 각 안테나에 순서대로 할당한다. 또한 시스템의 전송량 증가를 위해서 채널 상태가 좋은 사용자에게 정해진 대응 규칙(mapping rule)에 의하여 허가 전송량을 늘여주는 방식을 이용해 시스템의 총 전송량을 늘일 수 있다.

먼저 ARR에서는 일정 구간마다 평균 채널 환경을 전송 받아 현재 라운드의 허가 전송량을 바꾸고, 바뀐 값을 초과 전송에 저장하여 다음 라운드의 허가 전송량 계산 시에 반영하게 된다. 여기서 α 는 한 라운드 안에서 몇 번 $Bns_i(r)$ 을 주는지를 나타내는 상수를 나타내고, $Bns_i(r)$ 는 r 번째 라운드에서 i 번째 사용자에게 채널 환경에 따라 보너스를 얼마만큼 주는 지를 나타내는 값이다. 이 때, $Bns_i(r)$ 는 다음에 언급될 대응 규칙에 의하여 정해지게 된다. 초과 전송량과 허가 전송량의 식은 다음과 같다.

$$SC_i(r) = Sent_i(r) - \alpha Bns_i(r) - A_i(r) \quad (5)$$

$$A_i(r) = 1 + MaxSC(r-1) - SC_i(r-1) \quad (6)$$

• 대응 규칙(Mapping Rule)

라운드 r 에 N 명의 사용자에게 전송할 데이터가 있다고 가정하고, $n[i]$ 는 N 명의 사용자 중에 전송속도가 i 번째 등수인 사용자의 번호를 나타낸다. 또한, $R_{n[i]}$ 는 $n[i]$ 번호를 가지고 있는 사용자의 전송속도를 의미한다. 즉, $R_{n[1]} \geq R_{n[2]} \geq \dots \geq R_{n[M]}$ 이 된다. 이 때 라운드의 길이가 변하지 않게 하기 위해서 다음 식을 만족한다.

$$\sum_{i=1}^N Bns_{n[i]}(r) = 0 \quad (7)$$

위 식은 한 라운드가 초기의 허가 전송량의 합에 의해 정해지면, $Bns_i(r)$ 값에 의해 정해진 라운드의 길이가 변하지 않게 하기 위해 가정하였다. 그리고 그 때의 $Bns_i(r)$ 는 다음과 같다.

$$Bns_n \left[\frac{N+1+j}{2} \right] (r) = \pm f(i)$$

1) N 이 홀수일 경우

$$j = 0, 2, 4, 6, \dots, j \leq N-1 (\text{복호동순})$$

2) N 이 짝수일 경우

$$j = 1, 3, 5, 7, \dots, j \leq N-1 (\text{복호동순})$$

여기서, $f(i)$ 는 등수에 따라 각 사용자의 허가 전송량을 늘려주는 실제 양이다. 기본적으로 $f(i) = j$ 로 생각한다.

정리 1 (Theorem 1)

ARR을 사용하여 전송된 총 전송량의 상한 치 β 와 하한 치 γ 의 차 ϵ 는 시간과 사용자에 관계없이 일정하다.

증명. 위 식 (5)에 식 (6)을 적용하면 한 사용자가 한 라운드에 보낸 전송량은 식 (8),(9)에 의하여 나타낼 수 있다.

$$Sent_i(r) = 1 + MaxSC(r-1) - SC_i(r-1) + SC_i^*(r) \quad (8)$$

$$SC_i^*(r) = SC_i(r) + \alpha Bns_i(r) \quad (9)$$

이를 임의의 k 번째 라운드에서부터 l 라운드 동안 전송한 총 전송량을 구하면 식 (10)이 된다.

$$\begin{aligned} \Gamma_i(l) &= \sum_{r=k}^{k+l} Sent_i(r) \\ &= l+1 + \sum_{r=k-1}^{k+l-1} MaxSC(r) - SC_i(k-1) + SC_i^*(k+l) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $Sent_i(r) - A_i(r)$ 의 최대 허용치를 q 라 하면,

$$0 \leq Sent_i(r) - A_i(r) \leq q \quad (11)$$

$$-\alpha \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \leq \alpha Bns_i(r) \leq \alpha \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \quad (12)$$

그러므로 식 (9)로부터 식 (11), (12)를 적용하여 다음 식 (13)을 알 수 있다.

$$-\alpha \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \leq SC_i^*(r) \leq q + \alpha \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \quad (13)$$

따라서 총 전송량의 범위는

$$\begin{aligned} l+1 + \sum_{r=k-1}^{k+l-1} MaxSC(r) - 2\alpha \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor - 2 \left(q + \alpha \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \right) \\ \leq \Gamma_i(l) \leq l+1 + \sum_{r=k-1}^{k+l-1} MaxSC(r) + 2\alpha \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \\ + 2 \left(q + \alpha \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \right) \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)와 같이 되고, 결과적으로 식 (14)의 좌변이 하한 치 γ 가 되고, 우변이 상한 치 β 가 되어 그 차이 ϵ 는 다음 식 (15)가 됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon = \beta - \gamma &\leq 4 \left(q + \alpha \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \right) + 4\alpha \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \\ &\leq 4q + 8\alpha \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \end{aligned} \quad (15)$$

정리에 의하여 α 가 고정되었을 경우, 사용자들은 위의 범위 안에서 시간구간 수만큼 선택되며, 그에 따라 공평성을 유지하게 된다. 또한 α 를 바꾸더라도 각 사용

자들의 전송량의 범위는 일정하게 유지된다. 그러므로 시스템에 따라서 α 의 값을 적당히 바꾸어 시스템 특성(즉, 공평성과 총 전송량 사이의 우선순위)을 바꿀 수 있다. 따라서 일정한 상수를 바꾸어 시스템의 특성을 바꿀 수 있는 것은 시스템의 큰 장점이 될 것이다.

그림 2는 앞에서 기술한 내용을 요약적으로 도시한 것이다. 보내게 되는 $Sent$ 는 SC , A 그리고 무선 환경을 반영하는 $Bns_i(r)$ 로 구성된다.

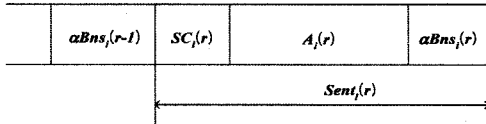


그림 2 Adjustable Round Robin 패킷 개념도

4. 성능 평가 결과

본 논문은 그림 3에서 보는 바와 같이 단일 기지국과 다중 사용자 사이의 순방향을 고려하였다. 기지국의 안테나의 수는 N_{Tx} , 한 명의 사용자 안테나의 수는 N_{Rx} , N 명의 사용자가 활동한다고 가정한다. 즉 N 명의 사용자에 각각 N_{Tx} 개의 채널이 형성된다고 고려되어진다. 1명의 사용자에 발생하는 N_{Tx} 개의 채널은 모두 거리에 의한 롱텀 페이딩(long-term fading)은 같고, 간섭 페이딩(fast fading)과 새도우잉(shadowing)의 크기만 다르게 발생된다[6]. 신호를 계산하기 위해서 각 기지국 및 각 이동국간의 페스로스가 매 라운드마다 평가된다. 페스로스는 거리를 기준으로 하는 롱텀 페이딩과 새도우잉에 의한 감쇠, 간섭 페이딩의 합으로 계산된다.

모의실험을 위해서 MIMO 시스템의 모형[6]을 따랐으며, 세부적인 시스템 모형은 실제 HDR/1xEv-Do 시스템[7]의 형태를 가정하였고, 10명의 사용자와 기지국과 사용자의 안테나는 4×4 를 가정하였다. 아래 그림들

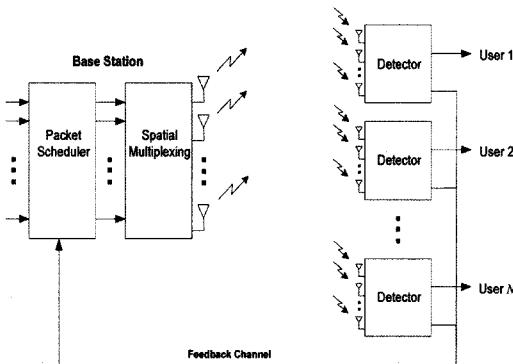


그림 3 MIMO 시스템 모형그림

은 Adjustable Round Robin(ARR), Antenna Assisted Round Robin(AA-RR)[2], 탄성 라운드 로빈(Elastic Round Robin:ERR)[3], 그리고 간단한 라운드 로빈 방식을 사용하여 모의실험 한 결과이다. 단, 사용자의 분포는 사용자 번호가 클수록 멀리 위치해 있다고 가정하였다.

다음 그림 4는 제안된 Adjustable Round Robin에서 α 값이 변함에 따라 Adjustable Round Robin의 성능이 탄성 라운드 로빈과 같은 시점으로부터 최고의 채널 상태를 가진 사용자만 선택하였을 경우의 성능으로 좋아지고 있음을 알 수 있다. 즉, α 를 잘 조정하여 공평성이 중요한 경우에는 α 를 작게 하고, 기지국 전송량이 중요한 경우에는 α 를 크게 하여 시스템의 상황에 맞게 스케줄링 방식을 고칠 수 있게 된다.

그림 5는 α 가 10일 때 각 사용자들의 공평성을 나타내고, 그림 6은 α 가 40일 때 각 사용자들의 공평성을 나타낸다.

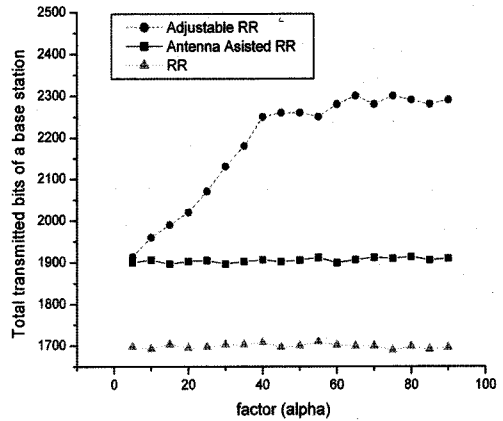


그림 4 ARR factor (α)의 변화에 따른 성능 변화

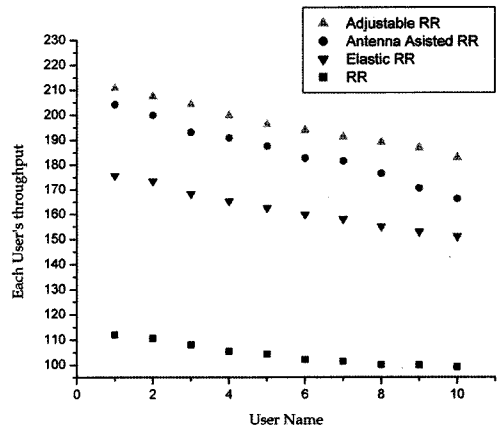


그림 5 ARR($\alpha=10$), ERR, AA-RR, RR을 사용한 각 사용자 전송량

그림 5와 그림 6을 비교하면 α 가 증가함에 따라 기지국의 전송량은 증가하나 사용자간의 공평성이 나빠지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 α 가 40일 때 기지국의 전송량이 최대로 증가하고, 사용자간의 공평성도 만족할 만한 지점이라는 것을 알 수 있다.

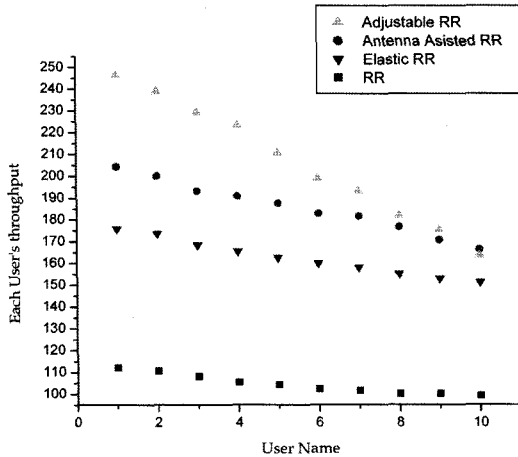


그림 6 ARR($\alpha=40$), ERR, AA-RR, RR을 사용한 각 사용자 전송량

마지막으로 그림 7은 모의실험 결과들이 식 (15)에서 도출한 전송량의 범위 안에 만족함을 보여주고 있다.

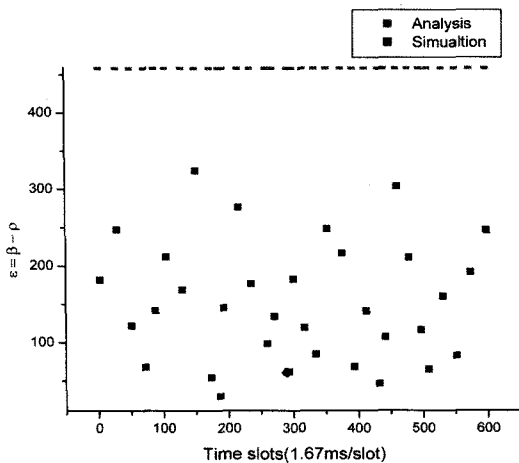


그림 7 ARR의 전송량과 범위

제안된 알고리즘의 공평성을 평가하기 위해 다음과 같은 Index of Fairness(IF)[8]를 사용하기로 한다. 사용자 k 가 할당받은 자원을 r_k 이라 하고 K 명의 사용자가 시스템에 있을 경우 IF는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$IF = \frac{\left(\sum_k r_k\right)^2}{K \sum_k r_k^2} \quad (16)$$

위 IF가 1에 가까울수록 공평성이 증가하고, 1이면 모든 사용자들의 수율(throughput)이 동일함을 의미하게 된다. 위 (16)번 식에서 정의된 IF에 의한 각 알고리즘의 공평성 평가는 표1에 요약되어 있다. 표1에 의하면 $\alpha=10$ 인 경우 ARR은 기존의 방식보다 높은 수율을 얻으면서 동시에 RR과 가까운 공평성을 이룩하고 있으며, 수율이 더 높은 $\alpha=40$ 인 경우에는 공평성이 약간 훼손되는 것을 알 수 있다. 따라서 제안하는 ARR에서는 파라미터 α 의 값을 변경함으로써 수율과 공평성 간의 trade-off를 얻을 수 있다.

표 1 ARR, ERR, AA-RR, RR의 공평성(IF) 비율

	ARR	RR	AA-RR	ERR
$\alpha=10$	99.80%	99.82%	99.61%	99.76%
$\alpha=40$	98.35%			

5. 결론

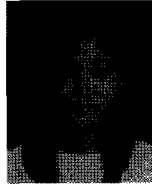
다중 사용자 환경에서 공간 다중화 방법을 사용하는 MIMO의 경우 어떤 안테나에 어느 사용자의 하위 열을 할당할 지 결정해야 한다. 또한 스케줄링을 하는 데 있어서 각 사용자의 전송량 및 기지국의 전송량 향상과 각 사용자간의 공평성 보장이 고려되어야 한다. 따라서 본 논문은 다중 사용자 환경에서 MIMO 시스템에 맞는 패킷 스케줄러 개발을 위해 탄성 라운드 로빈 방식을 보완하여 Adjustable Round Robin 스케줄링 방식을 제안하였다. 제안된 Adjustable Round Robin 스케줄링 방식은 과거의 할당량에 대한 불공평성을 현재 할당량에 적용하여, 현재는 기지국 전송량을 올리는 관점에서 안테나에 사용자를 할당하고, 라운드의 후반부에서는 공평성을 보장하는 관점에서 라운드 로빈 스케줄링 방식으로 동작하는 것을 볼 수 있다. 다시 말해, 현재 최고의 채널 상태를 가지는 사용자의 하위 열을 할당할 안테나를 결정하고, 그에 따른 불이익을 다음 할당 시 반영하는 Adjustable Round Robin을 MIMO 시스템에 적용하고, 이득 분석을 하였다. 결과적으로 본문의 3, 4장에서 보는 바와 같이 Adjustable Round Robin은 MIMO 시스템을 위해 제안된 Antenna Assisted Round Robin보다 성능이 우수함을 수식 및 모의실험을 통하여 알 수 있었고, MIMO 시스템에서 좋은 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다. 더욱이 제안된 Adjustable Round Robin은 시스템의 상황에 따라서 α 를 변경하여 스케줄링 방식의 특성을 바꿀 수 있기 때문에 실제 상

황에 더욱 유용하게 사용할 수 있다.

끝으로, 제안하는 ARR은 비교되는 RR과는 달리 스케줄링을 위한 주기적인 채널 정보 피드백을 필요로 한다. 수율 증대를 목표로 하는 대부분의 무선 스케줄링 시스템에서 이러한 주기적인 채널 정보가 필수적이지만, 너무 많은 채널 정보 피드백은 시스템의 부하를 증대시키고 추가적인 전송 대역을 필요로 하므로 이에 대한 추가적인 연구가 필수적이다.

참 고 문 헌

- [1] R. W. Heath, S. Sandhu, and A. J. Paulraj, "Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 5, pp. 142-144, Apr. 2001.
- [2] O.-S. Shin and K. B. Lee, "Antenna-assisted round robin scheduling for MIMO cellular systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 7, pp. 109-111, Mar. 2003.
- [3] S. Kanhere, H. Sethu, and A.B. Parekh, "Fair and efficient scheduling algorithm using elastic round robin," *IEEE Trans. on parallel and distributed systems*, vol. 13, no. 3, Mar. 2002.
- [4] M. Shreedhar, and G.. Varghese, "Efficient fair queuing using deficit round-robin," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 4, no. 3, pp. 375-385, June 1996.
- [5] P. Goyal, H. M. Vin, and H. Chen, "Start-time fair queueing: A scheduling algorithm for integrated services," in *Proc. ACM-SIGCOMM*, pp. 157-168, Aug. 1996.
- [6] "Throughput simulations for MIMO and transmit diversity enhancements to HSDPA, 3GPP TSG RAN WG1," *Lucent Technol.*, TSGR1#17 (00) 1388.
- [7] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushayana, and A. Viterbi, "CDMA/HDR: A bandwidth-efficient high-speed wireless data service for nomadic users," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 38, no. 7, pp. 70-77, 2000.
- [8] Bartolome, D. Perez-Neira, A.I., "Mean vs. variance trade-off analysis in multi-antenna multi-user channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, pp. 519-524, Mar. 2006.



송 영 금

2002년 2월 충북대학교 컴퓨터과학과 학사. 2002년 8월 한양대학교 컴퓨터 공학과 석사. 2004년 10월~2006년 2월 LG 전자 CTO 이동통신기술연구소 연구원 2006년 3월~현재 한양대학교 전자전기 제어계측공학과 박사과정. 관심분야는

Opportunistic random accesses 등



김 동 우

1994년 8월 한국과학기술원 공학박사 1994년 7월~2000년 2월 신세기통신 R&D 센터 선임과장. 2000년 3월~2004년 4월 한양대학교 전자컴퓨터공학부 조교수. 2004년 3월~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 부교수. 관심분야는 Multi-

user MIMO, Cognitive radio transmission 등



배 정 민

2003년 2월 한양대학교 전자컴퓨터공학부 졸업. 2005년 2월 한양대학교 대학원 전자전기 제어계측공학과 석사 졸업. 2005년 2월~현재 LG전자 MC사업부 단발연 구소 개발3실 주임 연구원