

계산이 효율적인 전송률-형평성 트레이드오프 제어 스케줄링 알고리즘

준회원 이 민*, 종신회원 오성근*

A Computationally Efficient Scheduling Algorithm Capable of Controlling Throughput-Fairness Tradeoff

Min Lee* Associate Member, Seong Keun Oh* Lifelong Member

요 약

이 논문에서는 다중 사용자 무선통신 환경에서 전송률-형평성 트레이드오프를 임의로 제어할 수 있는 계산이 효율적인 전송률-형평성 제어 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안되는 스케줄링 기준은 최대의 전송률 합을 추구하는 스케줄링 기준과 최대의 형평성을 추구하는 스케줄링 기준을 제어 인자에 따라 전송률과 형평성을 조정할 수 있도록 선형적으로 결합한다. 이때, 선형 결합을 통한 전송률-형평성 트레이드오프 제어를 위하여 스케줄링 기준의 단위와 최적화 방향을 일치시키는 것이 필요하다. 제안된 알고리즘은 이러한 조건들을 만족시키기 위하여 순시 전송률과 평균 제공 전송률을 스케줄링 기준으로 결정하고, 이들을 제어 인자를 사용하여 최적화 방향이 일치하도록 선형적으로 결합하여 제어 인자 값에 따라 다양한 전송률-형평성 성능을 제공할 수 있도록 한다. 추가적인 계산 간소화를 위하여 순시 전송률에 대한 높은 SNR (signal-to-noise ratio) 근사화 관계를 이용한다. 모의 실험을 통하여 독립적인 레일리 페이딩 다중 사용자 채널에서 제안된 스케줄링 알고리즘에 대하여 제어 인자 값에 따른 전송률과 형평성 성능을 분석하였고, 순시 전송률의 높은 SNR 근사화 관계를 이용한 성능 분석도 이루어졌다. 모의 실험 결과, 제안된 스케줄링 알고리즘은 최대 전송률을 추구하는 스케줄링과 최대 형평성을 추구하는 스케줄링 사이에서 전송률-형평성 성능을 임의로 조절할 수 있음을 확인할 수 있었고, 근사화 결과도 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

Key Words : Scheduling algorithm, scheduling criteria, throughput-fairness tradeoff, high SNR approximation

ABSTRACT

In this paper, we propose a computationally efficient scheduling algorithm that can arbitrarily control the throughput-fairness tradeoff in a multiuser wireless communication environment. As a new scheduling criterion, we combine linearly two well-known scheduling criteria such as one of achieving the maximum sum throughput and the other of achieving the maximum fairness, so as to control the relative proportion of the throughput and the fairness according to a control factor. For linear combining two different criteria, their optimization directiveness and the units should be unified first. To meet these requirements, we choose an instantaneous channel capacity as

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2009-F-043-01, 사용자 중심 이동성 제어를 통한 중단 없는 이동성 제공 기술 개발]

※ 본 연구는 IEEE VTC2009-Fall에서 발표된 『A simple scheduling algorithm capable of controlling throughput fairness tradeoff performance』 연구의 확장 및 보완된 연구 결과임.

* 아주대학교 전자공학부 통신시스템연구실 (minishow@ajou.ac.kr, oskn@ajou.ac.kr)

논문번호 : #KICS2009-11-590, 접수일자 : 2009년 11월 25일, 최종논문접수일자 : 2010년 2월 5일

a scheduling criterion for maximizing the sum throughput and the average serving throughput for maximizing the fairness. Through a unified linear combining of two optimization objectives with the control factor, it can provide various throughput-fairness tradeoffs according to the control factors. For further simplification, we exploit a high signal-to-noise ratio (SNR) approximation of the instantaneous channel capacity. Through computer simulations, we evaluate the throughput and fairness performances of the proposed algorithm according to the control factors, assuming an independent Rayleigh fading multiuser channel. We also evaluate the proposed algorithm employing the high SNR approximation. From simulation results, we could see that the proposed algorithm can control arbitrarily the throughput-fairness performance between the performance of the scheduler aiming to the maximum sum throughput and that of the scheduler aiming to the maximum fairness. Finally, we see that the high SNR approximation can give a satisfactory performance in this situation.

I. 서 론

다중 사용자 통신 시스템에서 제한된 자원을 다수의 사용자에게 효율적으로 할당하는 것은 중요한 문제이다^[1]. 이러한 문제를 해결할 뿐만 아니라 지연, 전송률, 패킷 손실 등과 같은 QoS (quality of service)를 보장하기 위하여 다수의 스케줄링 알고리즘들이 연구되었다^{[2]-[6]}. 무선통신 환경에서는 각 사용자가 서로 독립적인 페이딩을 경험하는 사실을 이용함으로써 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있다^[7]. 다중 사용자 다이버시티를 추구하는 가장 대표적인 스케줄러 중의 하나인 max CIR (maximum carrier to interference ratio) 스케줄러는 각 타임 슬롯에서 순시 채널 용량이 가장 우수한 사용자를 선택함으로써 전송률 합이 최대가 되도록 한다^[2]. Max CIR 스케줄러는 시스템 효율성 측면에서는 가장 우수하지만 형평성을 크게 저하시킨다. 그에 반하여 max-min fair 스케줄러는 현재 평균 제공 전송률이 가장 낮은 사용자를 선택함으로써 최적의 형평성을 유지할 수 있다^[3]. 그러나, max-min fair 스케줄러는 해당 사용자가 열악한 채널 품질을 경험하더라도 평균 제공 전송률이 가장 낮은 사용자를 우선적으로 선택하기 때문에 전송 효율을 크게 저하시킨다. PF (proportional fair) 스케줄러는 각 사용자의 스케줄링 기준을 순시 전송률 대 평균 제공 전송률의 비로 설정함으로써 각 사용자의 순시 전송률과 평균 제공 전송률을 모두 고려한다^[4]. 따라서, 높은 전송 효율을 유지하면서, 낮은 평균 제공 전송률 사용자에게 높은 선택 기회를 제공함으로써 시스템 성능과 형평성을 동시에 추구할 수 있다. 그러나, PF 스케줄러는 고정된 전송률-형평성 성능을 가지므로 시스템 요구에 따라 전송률-형평성 트레이드오프 제어를 수행할 수 없다. 고정된 성능은 사용자 수, 트래픽 특성, 채널 특

성 등과 같은 통신 시스템의 요구조건들에 대한 변화를 효율적으로 수용하지 못하게 한다.

최근에 전송률-형평성 트레이드오프를 제어할 수 있는 다수의 스케줄링 알고리즘들이 연구되었다^{[5]-[6]}. 그들 중에서 maxD/PF 알고리즘은 제어 인자와 함께 max CIR 스케줄링 기준과 PF 스케줄링 기준의 선형 결합으로 이루어진 스케줄링 기준을 이용함으로써 제어 인자 조정을 통하여 전송률-형평성 트레이드오프를 제어한다^[5]. 이 알고리즘은 사용자 별 스케줄링 기준 계산에 있어서 단지 한 번의 곱셈과 한 번의 덧셈을 요구하므로 사용자 선정을 위한 계산 복잡도를 크게 낮출 수 있다. 그러나, 이 알고리즘의 전송률-형평성 트레이드오프 제어 범위가 max CIR 스케줄링과 PF 스케줄링 성능 사이로만 제한된다. 또한, 알파룰(alpha rule) 스케줄링 알고리즘은 PF 스케줄링 기준에서 알파를 적용하여 평균 제공 전송률의 비중을 조절할 수 있도록 평균 제공 전송률 대신에 평균 제공 전송률의 α 거듭제곱을 이용하여 PF 스케줄링 기준을 수정함으로써 전송률-형평성 트레이드오프를 제어한다^[6]. 따라서, 이 알고리즘에서 사용자 선정을 위한 기준은 max CIR 스케줄링 기준 대 평균 제공 전송률의 α 거듭제곱한 값의 비로 구성된다. 그러나, 스케줄링을 위해 고려해야 하는 모든 사용자들에 대하여 양의 실수(평균 제공 전송률)의 실수 거듭제곱을 계산해야 하므로 사용자 선정을 위한 스케줄링 기준 계산의 복잡도가 매우 높아지게 된다. 특히, 사용자 수가 증가하거나 제어 인자 α 가 정수가 아닌 경우에는 계산 복잡도가 더욱 증가한다^[6].

이 논문에서는 스케줄링 기준 계산이 간단하면서 전송률-형평성 트레이드오프 제어를 최대로 할 수 있는 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 새로운 스케줄링 알고리즘의 스케줄링 기준은 전송률과 형평성 트레이드오프 제어를 위하여 최대의 전송률을 추구

하는 스케줄링 기준인 순시 전송률과 최대의 형평성을 추구하는 스케줄링 기준인 평균 제공 전송률을 결합한다. 여기서, 제어 인자를 사용하여 순시 전송률과 평균 제공 전송률의 비중을 조절함으로써 전송률-형평성 트레이드오프 제어를 가능하게 하고, 스케줄링 기준 단위와 최적화 방향이 일치하도록 두 개의 스케줄링 기준들을 곱셈과 뺄셈만을 이용하여 선형적으로 결합함으로써 스케줄링 계산을 단순화한다. 따라서, 제안된 알고리즘은 간단하게 제어 인자를 조절함으로써 시스템 요구에 맞추어 다양한 전송률 형평성 성능을 제공할 수 있다. 또한, 높은 SNR 근사화 관계를 이용하여 SNR의 로그 함수인 순시 전송률 계산을 간소화함으로써 스케줄링 기준 계산 복잡도를 더욱 감소시킬 수 있다. 모의 실험을 통하여 독립적인 레일리 페이딩 다중 사용자 채널에서 제안된 스케줄링 알고리즘의 제어 인자에 따른 전송률과 형평성 성능을 분석하고, 기존의 max CIR 스케줄링 및 PF 스케줄링 성능과 비교한다. 또한, 순시 전송률의 높은 SNR 근사화 관계를 이용한 성능도 분석한다.

II. 시스템 모델

이 논문에서는 K 명의 사용자가 존재하는 다중 사용자 무선통신 시스템의 순방향 링크 전송을 고려한다. 타임 슬롯 t 동안에 기지국이 전송하는 i -번째 사용자의 송신 신호를 x_i 라고 할 때, i -번째 사용자의 수신 신호 y_i 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_i(t) = h_i \cdot \sqrt{P} \cdot x_i(t) + n_i(t), \quad i = 1, \dots, K. \quad (1)$$

여기서, h_i 는 기지국과 i -번째 사용자 단말기 사이에 형성되는 채널 이득으로서, $E[|h_i|^2] = 1$ 인 레일리 페이딩 (Rayleigh fading) 분포를 가지는 것으로 가정한다. P 는 송신 전력이며, n_i 는 i -번째 사용자 단말기 수신단에서의 AWGN (additive white Gaussian noise)으로서, 평균과 분산이 각각 0과 N 이다. 따라서, i -번째 사용자 단말기 수신단에서 SNR은 다음과 같다.

$$SNR_i = \frac{P \cdot |h_i|^2}{N}. \quad (2)$$

다중 사용자 통신 시스템에서는 총 전송률을 최대로 하기 위해서는 SNR이 높은 사용자에게 송신 전력을 할당함으로써 다중 사용자 다이버시티를 얻을 수 있으며, 이를 위하여 스케줄링을 위해 고려하는 모든 사용자에 대한 채널 품질 정보의 교환이 요구된다⁷⁾. 대부분의 통신 시스템에서는 채널 품질 정보로서 SNR의 로그 함수인 SNR [dB]값을 교환한다⁸⁾⁹⁾. i -번째 사용자의 SNR [dB]는 다음과 같이 정의된다.

$$SNR_i \text{ [dB]} = 10 \cdot \log_{10}(SNR_i). \quad (3)$$

이때, 다중 사용자 통신 시스템에서 사용자들의 평균 SNR $E[SNR_i]$ 은 기지국과 사용자 사이의 거리, 사용자 주변 환경 등에 의해 결정되므로 모든 사용자들의 평균 SNR은 다를 수 있다.

III. 제안된 스케줄링 알고리즘

이 절에서는 계산이 효율적이면서 동시에 전송률-형평성 트레이드오프를 제어하는 스케줄링을 설계하기 위한 프레임워크를 제안한다. 전송률과 형평성의 트레이드오프를 제어하기 위해서는 최대의 전송률을 추구하는 스케줄링 기준과 형평성을 추구하는 스케줄링 기준을 제어 인자를 사용하여 결합한다. 이때, 계산을 간소화하기 위하여 두 개의 스케줄링 기준을 선형적으로 결합하는 것이 필요하다. 선형 결합은 두 개의 스케줄링 기준을 각각 A , B 라고 할 때, 다음과 같이 각 스케줄링 기준에 상수 α , β 를 곱하여 합 또는 차로 결합하는 것을 의미한다.

$$\alpha A \pm \beta B. \quad (4)$$

일반적으로 서로 다른 스케줄링 기준들을 선형 결합하려면 두 가지 전제조건들이 만족되어야 한다. 우선적으로 두 기준의 단위가 일치해야 한다. 다음으로 스케줄링의 최적화 방향이 일치해야 한다. 따라서 목적이 서로 다른 스케줄링 기준을 선형적으로 결합하는 것은 대부분의 경우 불가능한 일이다. 하지만 이 논문에서는 최대의 전송률을 추구하는 기준으로 단위가 bps/Hz인 순시 전송률을 사용하고, 형평성을 추구하는 기준도 단위가 bps/Hz인 평균 제공 전송률을 사용한다면 결합이 가능하다. 또한 최대의 전송률을 추구하는 경우 전송률을 최대로

하는 기준을 사용하지만 형평성을 추구하는 경우 평균 제공 전송률이 최소인 사용자를 선정해야 하므로 최적화 방향에 있어서도 일치하지 않는다. 그러나 최적화 방향의 문제는 마이너스 평균 제공 전송률이 최대인 사용자를 선택하면 최적화 방향을 일치시킬 수 있다. 따라서, 전송률-형평성 트레이드 오프 제어를 위한 선형 결합을 위한 전제조건으로 스케줄링 기준의 단위와 최적화 방향을 일치시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 이제 두 기준을 제어 인자를 사용하여 선형 결합을 이루면 전송률-형평성 트레이드오프 제어가 가능한 스케줄링 기준을 생성할 수 있다. 이 시점에서 한 가지 생각할 점은 하나의 자원이 각 사용자들에게 할당되는 비율은 일반적으로 각 사용자 수에 반비례 함을 알 수 있다. 따라서, 평균 제공 전송률에 사용자 수를 곱하여 순시 전송률에 대응되는 값으로 유지하는 것이 필요하다.

제안되는 스케줄링 알고리즘은 순시 전송률과 평균 제공 전송률을 하나의 제어 인자를 사용하여 선형적으로 결합함으로써 제어 인자의 값에 따라 다양한 전송률-형평성 성능을 제공할 수 있다. 제안된 스케줄링 알고리즘은 다음과 같은 기준에 따라 사용자를 선정한다.

$$k = \arg \max_i (C_i - \alpha KR_i). \quad (5)$$

여기서, C_i 와 R_i 는 각각 i -번째 사용자의 순시 전송률과 평균 제공 전송률이고, α 는 제어 인자이며, K 는 스케줄링을 위해 고려하는 사용자 수이다. 여기서, C_i 와 R_i 는 모두 전송률을 의미하므로 단위가 bps/Hz로 동일하다. i -번째 사용자의 순시 전송률 C_i 는 다음과 같이 i -번째 사용자의 SNR_i 의 로그 함수인 채널 용량 계산 수식을 이용하여 표현할 수 있다.

$$C_i = \log_2(1 + SNR_i). \quad (6)$$

또한, i -번째 사용자의 평균 제공 전송률 R_i 는 다음의 수식을 통하여 얻는다 [4].

$$R_i(t+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)R_i(t), & \text{if } i \neq k \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)R_i(t) + \frac{1}{t_c}C_i(t), & \text{if } i = k \end{cases} \quad (7)$$

여기서, t 는 타임 슬롯 인덱스이고, t_c 는 평균 윈도우 크기이다⁴⁾.

수식 (5)에서 제어 인자 α 가 증가하면 평균 제공 전송률 R_i 의 비중이 상대적으로 커지므로 시스템 성능에 있어서 형평성은 향상하고, 전송률은 감소한다. 반대로, 제어 인자 α 가 감소하면 평균 제공 전송률 R_i 의 비중이 상대적으로 작아지므로 형평성은 감소하고, 전송률은 증가한다. 이와 같이 제안된 스케줄링 알고리즘은 간단하게 제어 인자 α 를 0부터 ∞ 사이의 값으로 설정함으로써 max CIR 스케줄러의 성능부터 max-min fair 스케줄러 성능까지 전송률-형평성 트레이드오프를 조절할 수 있다.

IV. 계산 간소화 방안

제안된 스케줄링 알고리즘은 두 개의 스케줄링 기준들의 선형 결합을 통하여 사용자 별 스케줄링 기준 계산을 단순화하였으나, 수식 (6)과 같이 순시 전송률 계산은 SNR의 로그 함수를 계산해야 하므로 여전히 계산 복잡도가 문제가 될 수 있으며 사용자 수가 늘어나는 경우 이 계산은 상당한 시간을 필요로 할 것이다. 그러나 전적으로 또는 부분적으로 전송률을 추구하는 스케줄링의 경우에 대부분 전송률이 어느 정도 높은 사용자들이 선택되며, 형평성을 추구하는 경우에도 평균 제공 전송률이 낮은 사용자를 선택하지만 순시 전송률이 낮은 경우에는 평균 제공 전송률에 미치는 영향이 매우 낮으므로 SNR이 낮은 경우에는 전송률 및 형평성 성능에 미치는 영향을 거의 무시할 수 있다. 따라서 SNR이 높은 경우에 대한 근사화를 통하여 순시 전송률을 로그 SNR에 비례하도록 다음과 같이 단순화 할 수 있다.

$$C_i = \log_2(1 + SNR_i) \approx \log_2(SNR_i), \text{ if } SNR_i \gg 1. \quad (8)$$

그러나 아직도 SNR의 로그 함수를 계산하는 것이 필요하다. 하지만 앞서 기술한 바와 같이 대부분의 통신 시스템들에서는 SNR 값 대신에 SNR의 로그 함수인 SNR [dB] 값을 전송한다. 이러한 사실을 이용하면 순시 전송률은 SNR [dB]에 비례한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 높은 SNR 근사화를 이용한 로그 SNR[dB]에 따른 순시 전송률은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$C_i = \begin{cases} \frac{\log_2 10}{10} \text{SNR}_i [\text{dB}], & \text{if } \text{SNR}_i [\text{dB}] \geq 0 \\ 0, & \text{if } \text{SNR}_i [\text{dB}] < 0 \end{cases} \quad (9)$$

그림1은 SNR [dB]에 따른 채널 용량을 나타낸 그래프로서, 실선은 수식 (6)을 통하여 계산된 참값을 나타낸 것이고, 점선은 높은 SNR 근사화를 이용한 수식 (9)를 통하여 근사화된 값이다. 그림 1을 참조하면, 10 dB 이하의 낮은 SNR에서는 SNR [dB]에 따른 채널 용량의 참값과 근사값이 다소 차이가 있으나, 10 dB 이상의 높은 SNR에서는 SNR [dB]에 따른 채널 용량의 참값과 근사값이 거의 동일한 것을 볼 수 있다. 낮은 SNR을 갖는 사용자가 선택될 확률은 상대적으로 낮을 뿐만 아니라, 낮은 SNR 사용자가 선택되더라도 시스템 성능에 미치는 영향은 매우 작기 때문에 낮은 SNR에서의 참값과 근사값의 차이는 무시될 수 있다.

따라서, 제안된 순차 전송률에 대한 높은 SNR 근사화를 이용하면 SNR 함수의 로그 값을 계산할 필요가 없게 되므로 계산을 추가로 감소시킬 수 있다. 특히, 이 효과는 사용자 수가 늘어남에 따라 큰 영향을 미치게 된다.

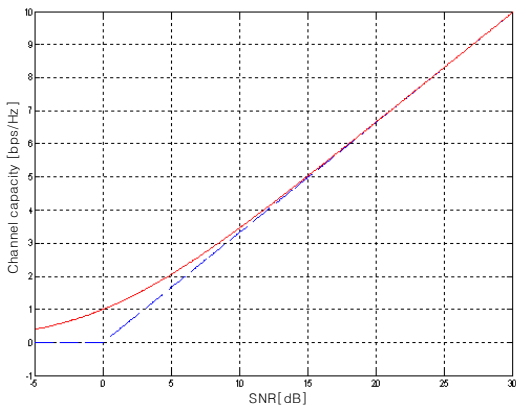


그림 1. SNR[dB]에 따른 채널 용량과 높은 SNR 근사화를 이용한 채널 용량

V. 모의 실험 결과

제안된 스케줄링 알고리즘의 성능을 분석하고, 기존의 max CIR과 PF 스케줄링 알고리즘의 성능과 비교하기 위하여 모의 실험을 수행하였다. 형평성 측정을 위한 지표로서 JFI (Jain's fairness index)을 도입하였다^[10]. 이 지표는 모든 사용자들의

평균 제공 전송률의 분포 정도를 나타내는 지표로서, $1/K$ 과 1 사이의 값을 갖는다. 이 지표 값이 $1/K$ 에 가까울수록 특정 사용자들에 집중되도록 서비스를 제공하여 불공정한 서비스 제공이 이루어졌음을 의미하고, 1에 가까울수록 모든 사용자들에게 고르게 서비스를 제공하여 공정한 서비스 제공이 이루어졌음을 의미한다. 모든 모의 실험에서는 각 사용자의 평균 SNR에 해당하는 i.i.d. (independently and identically distributed) 레일리 페이딩 채널을 가정하였다.

그림 2와 3은 모든 사용자들에 대한 전체 평균 SNR은 20 dB를 유지하면서 사용자들의 평균 SNR이 1.5 dB 간격으로 차이가 나는 경우 사용자 수의 함수로서 제어 인자 값에 따라 총 전송률과 사용자 형평성 성능을 나타낸다. 예를 들면, 3 명의 사용자를 고려하는 경우 첫 번째 사용자의 평균 SNR은 18.5 dB, 두 번째 사용자의 평균 SNR은 20 dB,

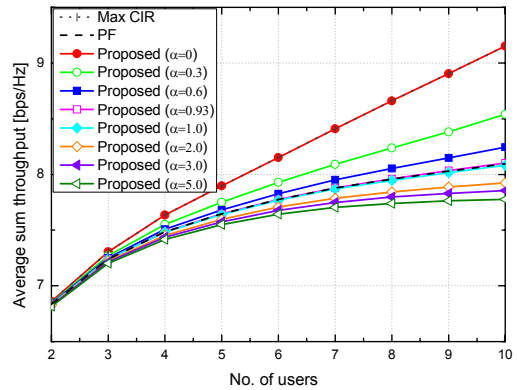


그림 2. 제어 인자 α 에 따른 사용자 수의 함수로서 전송률 합

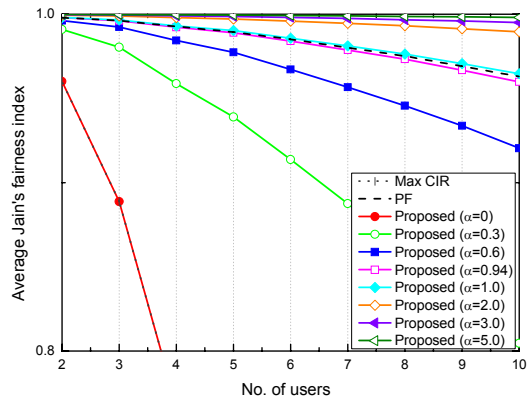


그림 3. 제어 인자 α 에 따른 사용자 수의 함수로서 JFI

세 번째 사용자의 평균 SNR은 21.5 dB이다. 그림 2와 3을 참조하면 제어 인자 값을 증가시킬수록 제안된 스케줄러의 총 전송률은 감소하고, 형평성은 향상되는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 제어 인자 α 를 0부터 ∞ 까지 조절함으로써 제안된 스케줄러의 전송률-형평성 트레이드오프를 max CIR 스케줄러의 성능부터 max-min fair 스케줄러의 성능까지 제어할 수 있다. 또한, α 가 0.93일 때 제안된 스케줄러의 성능이 PF 스케줄러의 성능과 거의 동일하게 되는 것을 볼 수 있다. 수식 (5)에서 i -번째 사용자의 평균 제공 전송률에 사용자 수를 곱한 KR_i 항이 i -번째 사용자의 순시 전송률의 대략적인 추정 값이 될 수 있기 때문에 제어 인자 α 가 1에 근접한 값인 경우 PF 스케줄러와 거의 동일한 전송률-형평성 성능을 제공한다.

그림 4와 5는 모든 사용자들에 대한 전체 평균

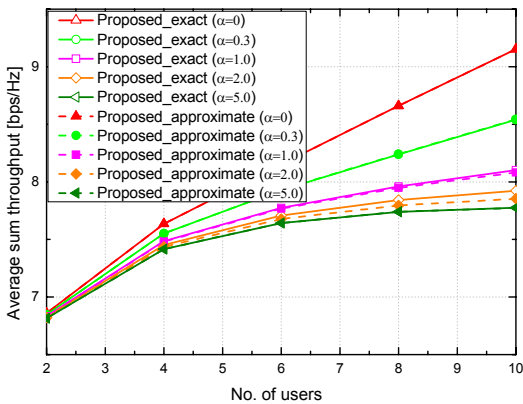


그림 4. 순시 전송률의 참값과 높은 SNR 근사값을 이용한 경우 제어 인자 α 에 따른 사용자 수의 함수로서 전송률 합

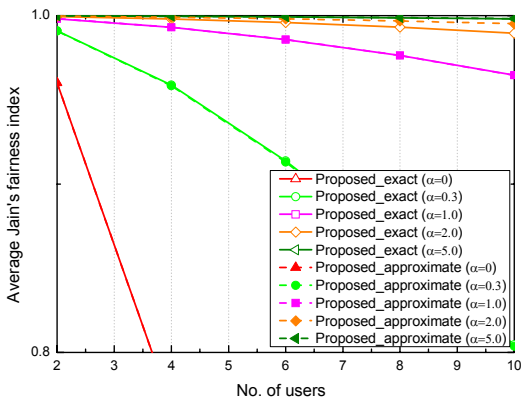


그림 5. 순시 전송률의 참값과 높은 SNR 근사값을 이용한 경우 제어 인자 α 에 따른 사용자 수의 함수로서 JFI

SNR은 20 dB를 유지하면서 사용자들의 평균 SNR이 1.5 dB 간격으로 차이가 나는 환경에서 수식 (6)으로부터 계산된 정확한 순시 전송률 값을 이용한 경우와 높은 SNR 근사화를 이용한 수식 (9)로부터 계산된 순시 전송률 값을 이용한 경우를 나타낸 그래프이다. 그림 4와 5를 참조하면, 참값을 이용하는 경우와 근사값을 이용하는 경우의 전송률-형평성 성능이 거의 동일한 것을 볼 수 있다. 또한, 성능 차이가 발생하더라도 전송률-형평성 트레이드오프를 유지하므로 제어 인자 α 를 조절하여 원하는 성능을 제공할 수 있다. 예를 들어, 제어 인자 $\alpha=2.0$ 인 경우 근사값을 이용하는 경우의 전송률 성능이 참값을 이용하는 경우의 전송률 성능에 비하여 감소하지만 형평성 성능에서는 향상되는 것을 볼 수 있다. 따라서, 제어 인자 α 를 2.0보다 약간 감소시켜서 근사값을 이용하면 제어 인자 $\alpha=2.0$ 로 참값을 이용하는 경우와 동일한 성능을 제공할 수 있고, 이와 같은 방식으로 근사값을 이용하여 참값을 이용한 성능과 동일한 전송률-형평성 성능을 제공할 수 있다.

VI. 결론

이 논문에서는 다중 사용자 무선통신 환경에서 전송률-형평성 트레이드오프를 제어할 수 있는 계산이 효율적인 전송률-형평성 제어 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 제안된 스케줄링 기준은 스케줄링 기준의 단위와 최적화 방향 일치라는 두 가지 전제 조건을 만족시키도록 순시 전송률과 평균 제공 전송률을 제어 인자와 함께 선형적으로 결합함으로써 제어 인자의 값에 따라 다양한 전송률-형평성 성능을 제공할 수 있을 뿐만 아니라 사용자 별 스케줄링 기준 계산이 간단하다. 또한, 높은 SNR 근사화를 이용하여 SNR의 로그 함수인 순시 전송률 계산을 간소화함으로써 스케줄링 기준 계산 복잡도를 더욱 감소시킬 수 있다. 모의 실험 분석 결과를 통하여, 제안된 스케줄링 알고리즘은 제어 인자 α 를 0부터 ∞ 까지 조절함으로써 max CIR 스케줄러의 성능부터 max-min fair 스케줄러 성능까지 제공할 수 있음을 알 수 있었고, 근사화 결과도 만족스러움을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

[1] C. Wang and Y. Xi, "Noncooperative game

theory as a unified framework for single machine scheduling,” in *Proc. 5th Asian Control Conference*, Melbourne, Australia, July 2004.

- [2] Y. Ofuji, S. Abeta, A. Morimoto, and M. Swahashi, “Comparison of packet scheduling algorithms focusing on user throughput in high speed downlink packet access,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E86 B, No.1, pp.132 - 139, Jan. 2003.
- [3] D. Bertsekas and R. Gallager, *Data Networks*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1987.
- [4] F. Kelly, A. Maulloo, and D. Tan, “Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability,” *Journal of the Operational Research Society*, Vol.49, pp. 237 - 252, Jul. 1998.
- [5] R. C. Elliott and W. A. Krzymień “Scheduling algorithms for the CDMA2000 packet data evolution,” In *Proc. IEEE VTC2002-Fall*, pp. 304 - 310, Sep. 2002.
- [6] A. Sang, X. Wang, M. Madhian, and R.D. Gitlin, “A flexible downlink scheduling scheme in cellular packet data systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.5, pp.568 - 577, Mar. 2006.
- [7] H. Fattah and C. Leung, “An overview of scheduling algorithms in wireless multimedia networks,” *IEEE Wireless Commun.*, Vol.9, pp. 76 - 83, Oct. 2002.
- [8] 3GPP Tech. Spec. 25.308 ver. 9.0.0, *High Speed Downlink Packet Access (HSDPA): Overall description*, June 2009.
- [9] IEEE 802.16 WG, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems,” IEEE STD 802.16e, Dec. 2005.
- [10] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, “A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems,” DEC Research Report TR 301, Sep. 1984.

이 민 (Min Lee)

준회원



2006년 8월 아주대학교 전자공학부 (학사)
 2006년 9월~현재 아주대학교 전자공학부 통합과정
 <관심분야> MU-MIMO 프리코딩, 중첩코딩, 무선자원관리

오 성 근 (Seong Keun Oh)

종신회원



1983년 2월 경북대학교 전자공학부(학사)
 1985년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학부(석사)
 1990년 8월 한국과학기술원 전기및전자공학부(박사)
 1993년 9월~현재 아주대학교 전자공학부 교수

<관심분야> 이동통신, 무선자원관리, 핸드오버