

다중 부반송과 시스템에서의 공정 비례성을 고려한 실시간 서비스 지원 스케줄링 알고리즘

*이형열, 변일무, 강민규, 박진배 **김광순

연세대학교 전기전자공학부

{*neolee, dlfan, kangys8, spacey2k, **ks.kim} @yonsei.ac.kr

Scheduling Algorithm for Proportional Fairness in Multicarrier Systems Supporting Real-time Application

Hyung Yeol Lee, Ilmu Byun, Kang Mingyu, Jin-Bae Park and Kwang Soon Kim

Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University

134 Sinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul 120-179, Korea

요약

실시간 서비스는 비실시간 서비스에 비해 비교적 빠른 시간 내에 일정량의 데이터 전송률이 보장되어야 하는데 이는 기존의 공정 비례 할당 알고리즘을 통해서도 보장되기 힘들다. 이에 본 논문은 다중 부반송과 다중 사용자 환경에서 공정 비례성(Proportional Fairness)을 고려하여 실시간 서비스를 지원하기 위한 두 가지의 변형된 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 모의 실험을 통하여 병렬적 자원 구조 기법의 경우 효과적인 자원 할당 분배 비율을 실험적으로 확인하였으며 실시간 서비스 사용자에게 더 높은 우선 순위를 주는 기법의 경우에 공정 비례성 및 서비스 품질 향상이 동시에 향상되는 우수함을 보였다. 또한, 적은 복잡도로 공정 비례성을 거의 확보한다는 것도 확인하였다.

1. 서론

차세대 무선 이동 통신 시스템에서 고속의 데이터 전송 및 효율적인 주파수 자원 분배는 매우 중요한 이슈이다. 이에 IEEE 802.16 표준이나 WiMax의 여러 가지 비즈니스 적용 모델들이 연구, 발전되어 왔으며 이러한 시스템에서 공정 비례 할당 알고리즘은 사용자의 공정성(fairness)과 데이터 전송량(throughput)을 동시에 만족시키기 위해 널리 이용되어왔다. 비록 공정 비례 할당 알고리즘이 일정 수준의 공정성과 데이터 전송량을 보장하지만 이는 사용자들의 버퍼가 항상 존재하고 있다는 가정 아래 자원을 분배하는 best-effort 방식의 대표적인 알고리즘으로 비교적 짧은 시간 안에 일정량의 데이터를 받아야 하는 실시간 서비스의 품질(Quality of Service)을 만족하기에는 적합하지 않고 실제로 이러한 공정 비례 할당 알고리즘의 특성을 [1]에서 보인바 있다. 따라서, 실시간 서비스를 지원하고 사용자들의 공정성과 데이터 전송량을 동시에 만족시킬 수 있는 효과적인 자원 할당 알고리즘이 필요하다. 이러한 이유로 변형된 공정 비례 스케줄링 알고리즘 연구를 통해 공정성, 데이터 전송량, 서비스 품질의 세 가지 측면에서 동시에 장점을 갖는 알고리즘 개발이 필요하다.

기존의 여러 기관 및 연구소에서 공정성, 데이터 전송량, 서비스 품질을 고려한 스케줄링 알고리즘을 연구해 왔다. [2]에서는 다중반송과

시스템에서의 공정 비례 할당 알고리즘 및 낮은 복잡도로 공정 비례성에 도달하는 알고리즘을 제안되었으며 [3]에서는 공정 비례성에 입각하여 부반송과 및 파워 할당 알고리즘이 제안되었다. 그러나 위 연구들은 실시간 서비스를 지원하기 위한 서비스의 품질 요소들을 고려하지 않았으며 이에 서비스 품질을 고려한 연구들이 연구되었다 [4][5]. [4]에서는 최소 데이터 전송률을 보장하는 공정 비례 할당 알고리즘이 연구되었고 [5]에서는 지연시간에 민감한 단일 부반송과 시스템에서의 최소 전송률을 보장하는 공정 비례 할당 알고리즘이 연구되었다. 또, [6]에서는 여기 서비스 품질 관련 요인들을 공정 비례 할당 알고리즘에 적용하여 서비스의 품질 향상을 도모하였다. 그러나 이러한 이전의 연구들은 서비스 품질을 향상시키기 위해 너무 많은 공정 비례성의 손실을 보거나 단한가지의 알고리즘 디자인 기준만을 고려하였다. 따라서, 일정량의 공정성과 데이터 전송량을 보장해주는 공정 비례성과 서비스 품질을 동시에 고려하는 알고리즘 제안이 필수적이다. 또한, 위 연구들은 각 사용자의 평균적인 데이터 전송률을 계산하기 위한 평균 윈도우 크기(average window size)를 스케줄링 시간에 비해 크게 설정하였는데 이는 실시간 서비스를 지원하는 공정 비례 할당 시스템에서는 적합하지 않다. 스케줄링 시간에 비해 평균 윈도우 크기가 지나치게 크면 초기에 많은 부반송과를 할당 받은 사용자는 후에 부반송과 할당에 대한 우선 순위가 낮아지게 되는데 이른 빠른 시간내에 일정량을 데이터를 받아야

하는 실시간 서비스에서는 곧바로 outage를 야기한다. 따라서, 실시간 서비스를 지원하기 위해서는 작은 평균 윈도우 크기도 고려해야한다.

이에 본 논문에서는 다중 부반송과 다중 사용자 환경에서 공정 비례성(Proportional Fairness)을 고려하여 실시간 서비스를 지원하기 위한 두 가지의 변형된 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 모의 실험을 통하여 병렬적 자원 구조 기법의 경우 효과적인 자원 할당 분배 비율을 실험적으로 확인하였으며 실시간 서비스 사용자에게 더 높은 우선 순위를 주는 기법의 경우에 공정 비례성 및 서비스 품질 향상이 동시에 향상되는 우수함을 보였다. 또한, 적은 복잡도로 공정 비례성을 거의 확보한다는 것도 확인하였다.

2. 시스템 모형

본 논문에서는 단일 셀에 K 명의 사용자가 있는 하향 링크 OFDMA 시스템을 고려하였다. 전체 대역폭은 N 개의 부채널(subchannel)로 나뉘어 있으며 k 번째 사용자의 n 번째 부채널의 채널 이득은 다음과 같이 정의한다.

$$h_{k,n} = \sqrt{d_k^{-\alpha}} g_{k,n}. \quad (1)$$

$g_{k,n}$ 은 평균이 0 인 복소 가우시안 랜덤 변수로 모델링되는 다중경로 요소들의 페이저(phasor) 합을 나타내며 이는 레일리(Rayleigh) 페이딩 채널을 의미한다. 또한, α 는 경로 감쇄 지수로 이번 실험에서는 4로 가정한다. 기지국의 총 파워는 P_T 이며 k 번째 사용자의 n 번째 부채널의 수신 파워는 다음과 같다.

$$P_{k,n} = |h_{k,n}|^2 \frac{P_T}{N}. \quad (2)$$

여기서 우리는 각 부채널에 할당되는 파워는 동일하다고 가정하고 k 번째 사용자의 n 번째 부채널의 가능 데이터 전송률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$r_{k,n} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n}}{N_0} \right). \quad (3)$$

N_0 은 잡음의 분산 값을 의미하며 서로 독립이고 평균이 0 인 복소 가우시안 랜덤 변수로 구성된다. 시스템의 공정성을 비교하기 위해서 공정성 측도(fairness index)를 다음과 같이 정의한다.

$$FI = \frac{\left(\sum_{k=1}^K r_k \right)^2}{K \sum_{k=1}^K r_k^2}. \quad (4)$$

또한, 공정 비례 스케줄링을 위한 평균적인 데이터 전송량은 [2]에서와 같은 방식으로 업데이트 하고 그 때의 평균 윈도우 크기는 t_c 로 정의한다.

3. 제안하는 알고리즘

본 연구에서는 두 가지 방법으로 실시간 서비스를 지원하는 변형된 형태의 공정 비례 할당 알고리즘을 제안한다. 첫 번째로 실시간 서비스 사용자와 그렇지 않은 사용자들의 그룹을 나누어 두 그룹에 적절한 양의 주파수 자원을 각각 분배하여 각 그룹별로 따로 공정 비례 스케줄링을 하는 방법이다. 두 번째로는 실시간 서비스를 효과적으로 지원하기 위해 실시간 서비스 사용자에게 일정량의 우선 순위를 더 주어 주파수 자원을 분배하는 방법이다.

A. Algorithm 1 : 병렬적 구조의 공정 비례 할당 알고리즘

앞서 알아본 바와 같이 평균 윈도우 크기는 실시간 서비스 사용자들을 지원하는 자원 할당 알고리즘에서는 고려해야하는 요인 중 하나이다. 그러나 실제 시스템에서는 실시간, 비실시간 서비스 유저가 공존하고 있는 상황이므로 둘 중 한 그룹은 시스템 목적에 비해 상대적으로 큰 또는 작은 평균 윈도우 크기로 손실을 볼 수 밖에 없는 상황이다. 즉, 실시간 서비스 사용자들을 지원하기 위해서는 평균 윈도우 크기를 작게 해야 효과적이데 이로 인해 비실시간 서비스 사용자들은 공정성 및 데이터 전송량에 손해를 보게 되고 반대의 경우도 마찬가지 상황이 된다. 이러한 상황에 대한 해결책 중 하나로 첫 번째로 제안하는 스케줄링 알고리즘은 실시간 서비스 사용자 그룹과 그렇지 않은 사용자 그룹에 각기 다른 양의 주파수 자원을 할당하여 각각의 스케줄러가 따로 주파수 자원을 분배하는 방식이다. 이렇게 나뉘어진 주파수 자원을 바탕으로 매 부채널 할당 시 전체 사용자별 부채널의 가능 데이터 전송률을 비교하여 가장 높은 데이터 전송률을 갖는 사용자에게 해당 부채널을 할당하고 그 할당 상황을 각 사용자의 평균 데이터 전송률(average data rate)에 바로 업데이트하여 다음 부채널 할당시 반영한다. 자원 할당 알고리즘은 다음과 같다.

1. 모든 유저의 부채널에 대해 가능 데이터 전송률을 (3)과 같이 계산한다.

2. 모든 k, n 에 대해 $\delta_{k,n} = 0$ 으로 초기화 한다.

3. for $r = 1 : 2$

while $N_r \neq \sum_n \delta_{k,n}$ do

select k^*, n^* such that

$$\{k^*, n^*\} = \operatorname{argmax}_{k,n} \frac{r_{k,n}}{R_k}$$

$$\frac{\delta_{k^*,n^*}}{R_{k^*}} = \frac{1}{R_{k^*} + r_{k^*,n^*}} \cdot \delta_{k^*,n^*}$$

end while

end for

여기서 $\delta_{k,n}$ 은 할당 부채널 할당 변수로 할당 되었을 경우 1 그렇지 않을 경우엔 0으로 정의한다. 또한, 각 그룹의 서브 채널 개수는 다음과 같이 정의한다. 여기서 γ 는 0에서 1사이의 값을 갖는다.

$$N_r = \begin{cases} \gamma N & \text{if } r = 1, \\ (1 - \gamma) N & \text{if } r = 2. \end{cases} \quad (5)$$

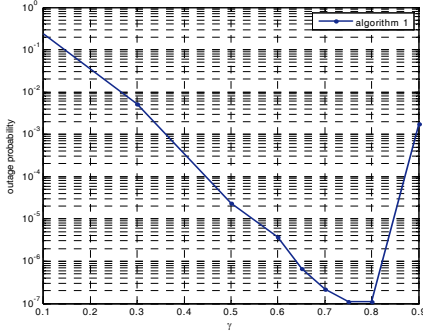


그림 1. γ 에 따른 outage 확률

여기서 γ 는 전체 주파수 자원 대비 실시간 사용자 그룹에게 할당 되는 주파수 자원의 비율을 의미한다. 또한, r 은 사용자 그룹을 나타내는 변수로 $r=1$ 이면 실시간 서비스 사용자 그룹, $r=2$ 이면 비실시간 서비스 사용자 그룹을 의미한다. 이러한 자원 할당 방식을 바탕으로 모의 실험에서는 실시간 서비스 사용자 그룹과 비실시간 서비스 사용자 그룹의 자원 분배를 어떻게 해야할 것인가에 대해서도 알아본다.

B. Algorithm 2 : 실시간 그룹에 우선 순위를 더 주는 알고리즘

무선 통신 시스템에서 실시간 서비스 사용자들은 빠른 시간내에 일정량에 데이터 전송량을 보장 받아야 하는 서비스 품질 요구 사항(QoS requirement)이 있다. 두 번째로 제한하는 알고리즘에서는 이러한 짧은 지연 시간 제한(delay constraint)을 만족시키기 위하여 실시간 서비스 유저에 일정 수준의 우선 순위를 더 주는 자원 할당 알고리즘을 제안한다. 이렇게 하면 실시간 서비스 유저들을 효과적으로 지원할 수 있게 되고 시스템의 공정성 역시 동시에 확보할 수 있다. 자원 할당 알고리즘은 다음과 같은 단계로 진행된다.

1. 모든 유저의 부채널에 대해 가능 데이터 전송률을 (3)과 같이 계산한다.
2. 모든 k, n 에 대해 $\delta_{k,n} = 0$ 으로 초기화 한다.

3. while $N \neq \sum_n \delta_{k,n}$ do
 select k^*, n^* such that
 $\{k^*, n^*\} = \operatorname{argmax}_{k,n} c \frac{r_{k,n}}{R_k}$
 $\frac{\delta_{k^*, n^*}}{R_{k^*}} = 1$
 $R_{k^*} = R_{k^*} + r_{k^*, n^*} \cdot \delta_{k^*, n^*}$
 end while

여기서 우리는 c 를 우선 순위 파라미터로 명하고 다음과 같이 정의한다.

$$c = \begin{cases} C & \text{real-time case,} \\ 1 & \text{non-real-time case.} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 C 값은 실시간 사용자에게 얼마나 많은 우선 순위를 부여할 것인가를 나타내며 모의 실험을 통해서 적절한 값을 찾는다.

4. 모의 실험을 통한 성능 분석

		R_{\min} [bit/sec]	delay [sec]
실시간 그룹	case 1(50%)	14.4K	20m
비실시간 그룹	case 2(25%)	28K	100m
	case 3(25%)	128K	5

표 1 사용자 그룹의 최소 데이터 전송량 및 지연 시간 제한

이번 실험에서는 셀 반경이 1000m인 단일셀 OFDMA 시스템을 고려한다. 사용자들은 크게 실시간 사용자 그룹과 비실시간 사용자 그룹으로 나뉜다. 또한, 사용자가 정해진 제한 지연 시간 내에 일정량의 데이터를 받지 못할 경우를 outage 사건으로 정의한다.

$$\text{Outage Probability} = \Pr [R < R_{\min}] \quad (7)$$

여기서 R_{\min} 과 지연 시간 제한은 [7][8]을 참고하여 정하였고 표1. 과 같이 설정한다. 실험에서는 앞에서 제한한 알고리즘들을 바탕으로한 모의 실험 통해 최적의 성능을 갖는 파라미터를 찾고 그 성능을 분석해 본다. 그림 1 은 병렬적 구조의 공정 비례 할당 알고리즘에서 실시간 사용자 그룹과 비 실시간 사용자 그룹의 자원 할당 비율을 결정하는 변수 γ 를 outage 측면에서 최적의 값을 알아 본 것이다. 모의 실험을 위해 실시간 사용자 그룹의 t_c 는 3, 비실시간 사용자 그룹의 t_c 는 10으로 설정하였다. γ 값이 0.7~0.8 일때 가장 실시간 사용자들을 효과적으로 지원하는 것으로 나타났다. 그러나 γ 값이 지나치게 크면 자원의 불균형으로 오히려 outage가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 실제 시스템에서는 목표 outage 확률을 정하고 그에 맞는 γ 값을 설정하는 것이 중요하다고 하겠다. 그림 2. 에서는 실시간 그룹에 우선 순위를 더 주는 알고리즘에서 C 값에 따른 outage 확률을 본 것이다. 모의 실험을 통하여 적절한 C 설정으로 실시간 서비스 사용자들을 효과적으로 지원할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 C 가 커질 수록 사용자들 간의 공정성 손실을 보므로 이러한 요인을 고려해 주어야 한다. 본 실험에서는 목표 outage 확률을 10^{-3} 으로 설정하고 공정성을 고려하여 C 값을 5로 정하여 다음 실험을 진행하였다. 그림 3. 은 두 번째 알고리즘의 공정 비례성을 알아보기 위한 실험이다. 공정 비례성은 시스템의 평균적인 데이터 전송량의 로그값들의 합을 최대화 한다고 알려져 있고 이를 위해 [2]에서 기존에 연구하였던 알고리즘들을 비교 대상으로 하였다. Full search는 시스템의 복잡도가 $O(K^N)$ 으로 사용자 수와 부채널의 수가 많아 질수록 복잡도가 지수적으로 증가하기 때문에 간단한 실험을 위해 이 때의 부채널의 수는 4개로 제한하였다. 또한, 실시간 서비스를 위해서 평균 윈도우 크기는 3으로 설정하였다. 실험을 통하여 제한하는 알고리즘은 낮은 복잡도로 공정 비례성에 거의 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4 는 사용자 수에 따른 공정성 측도를 나타낸 그래프이다. 이 때에는 full search case는 비교하지 않았으므로 부채널의 숫자는 15개로 늘려 실험을 진행하였다. 이 그래프에서도 그림 3. 과 마찬가지로 제안하는 알고리즘이 공정성 면에서 우수함을 확인할 수 있었다. 그림 5. 는 제한하는 알고리즘이 얼마나 실시간 서비스를 효과적으로 지원하는 지를 알 수

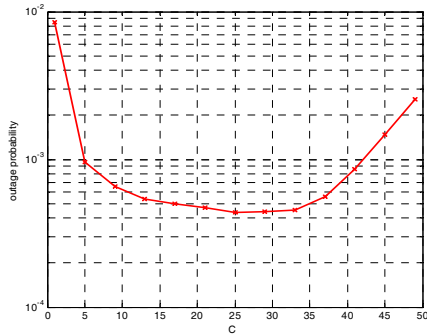


그림 2. C에 따른 outage 확률

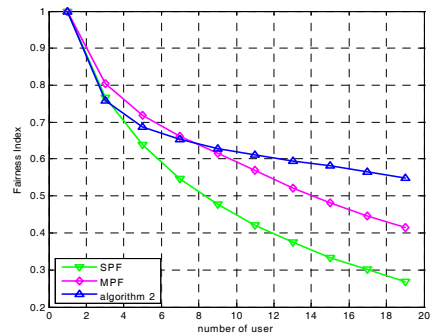


그림 4 사용자 수에 따른 공정성 측도

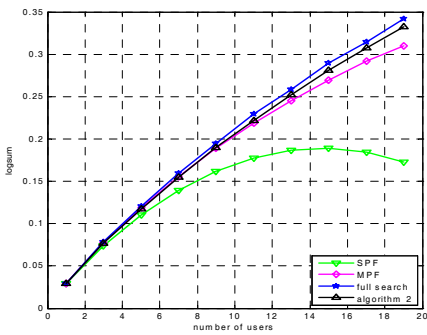


그림 3 사용자 수에 따른 로그합

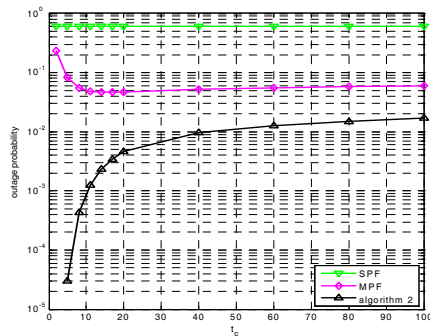


그림 5 평균 윈도우 크기에 따른 outage 확률

있는 그래프이다. 앞에서 실험한대로 C 는 5로 설정하였으며 모든 평균 윈도우 크기에 대해서 제안하는 알고리즘이 outage면에서 우수한 성능을 보인 것을 확인할 수 있다. 또한, 평균 윈도우 크기가 작을 수록 사용자들의 서비스 품질이 향상되는 것을 볼 수 있는데 이는 실시간 서비스를 지원하기 위해서는 자원 할당 주기에 비해 상대적으로 작은 평균 윈도우 크기가 필요하다는 것을 확인할 수 있는 결과이다.

5. 결론

본 논문에서는 두 가지 변형된 공정 비례 할당 알고리즘을 통하여 효과적으로 실시간 사용자들을 지원할 수 있는 방법을 제안하였다. 모의 실험을 통하여 병렬적 자원 구조 기법의 경우 효과적인 자원 할당 분배 비율을 실험적으로 확인하고 공정성과 서비스 품질의 양면에서 어떻게 자원 분배 비율을 정해야 할 것인가에 대한 동기를 부여하였다. 또한, 실시간 서비스 사용자에게 더 높은 우선 순위를 주는 기법을 제안함으로써 공정 비례성과 서비스 품질을 동시에 향상시키는 결과를 확인할 수 있었고 적은 복잡도로 공정 비례성에 거의 도달한다는 사실 역시 관찰하였다. 본 연구 결과는 향후 실시간 사용자가 많아지는 무선 통신 시스템에 간단하고 직접적으로 적용할 수 있다는 데 의의가 있다.

6. 감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (IITA-2008-C1090-0804-0007)

참고 문헌

- [1] M. Holtzman, "Asymptotic analysis of proportional fair algorithm," Proc. of Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication, pp. 33-37, 2001.
- [2] H. Kim, K. Kim, Y. Han, and S. Yun, "A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems," Proc. IEEE Vehic. Techn. Confer. (VTC), vol. 1, pp. 409-413, Los Angeles, CA, September 2004.
- [3] T. Nguyen, Y. Han, "Schemes for Maximal Throughput and Fairness in Downlink OFDMA Systems," Communications and Electronics 2006(ICCE '06), pp. 188-192, 10-11 Oct. 2006.
- [4] X. Liu, E.K.P. Chong, and N.B. Shroff, "A framework for opportunistic scheduling in wireless networks," Computer Networks, pp. 451-474, 2003.
- [5] Gwen Barriac, Jack Holtzman, "Introduction Delay Sensitivity into the Proportional Fair Algorithm for CDMA Downlink Scheduling," IEEE Int. 7th Symp.on Spread-Spectrum Tech and Appl., Prague, Czech Republic, Sept. 2-5, 2002.
- [6] Bo Wei, Adrian Boariu, "QoS constrained VoIP Scheduling in 1xEV-DO," Proc. IEEE Int. Commun. Confer. (ICC), pp. 86-89, 24-28 June 2007.
- [7] IEEE Std 802.16e 2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor 1-2005, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, Dec. 7, 2005.
- [8] <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=357102>