

## Distributed Proportional Fair Scheduling for Wireless LANs

朴炯根<sup>†</sup>  
(Hyung-Kun Park)

**Abstract** - In this paper, we propose a distributed opportunistic scheduling scheme for wireless LAN network. Proportional fair scheduling is one of the opportunistic scheduling schemes and used for centralized networks, whereas we design distributed proportional fair scheduling (DPFS). In the proposed DPFS scheme, each receiver estimates channel condition and calculates independently its own priority with probabilistic manner, which can reduce excessive probing overhead required to gather the channel conditions of all receivers. We evaluate the proposed DPFS using extensive simulation and simulation results show that DPFS obtains up to 23% higher throughput than conventional scheduling schemes and has a flexibility to control the fairness and throughput by controlling the system parameter.

**Key Words** : Packet Scheduling, Multiuser Diversity, Wireless LAN, Proportional Fair, Opportunistic Scheduling.

### 1. 서 론

데이터 패킷의 버스트한 특성과 시간 및 위치에 따라 변하는 무선채널의 특성은 시스템 성능을 개선할 수 다중사용자 다이버시티를 이득을 제공하게 되며 이를 위한 대표적인 opportunistic 스케줄링 방법의 하나는 비례공정 (proportional fair) 스케줄링 방법이다 [1]. 비례공정 알고리즘에서는 평균 용량에 비하여 상대적으로 가장 좋은 채널환경을 갖는 사용자가 채널을 점유할 권한을 갖는다. 비례공정 알고리즘은 사용자들 간의 공평성을 유지하면서도 다중사용자 다이버시티를 최대한 이용하려는 방식이다. 비례공정 스케줄링과 같은 opportunistic 스케줄링방식은 송신기가 모든 단말의 채널정보를 파악하고 스케줄링하여 채널을 할당하는 구조이기 때문에 셀룰러 네트워크와 같이 단말의 채널정보를 수집할 수 있는 시스템에 적합한 알고리즘이다. 이와 같은 opportunistic 스케줄링방식은 다중사용자 다이버시트 이득을 얻기 위해 모든 단말의 채널정보를 알고 있어야 한다. 그러나 WLAN과 같은 네트워크에서 중앙 집중화된 opportunistic 스케줄링방식은 채널정보의 전달을 위해 많은 오버헤드를 야기한다. 또한 802.11 WLAN에는 수신기의 채널정보를 모두 수집할 수 있는 구조를 지원하고 있지 않다. 따라서 중앙 집중화된 일반적인 스케줄링방식을 WLAN과 같은 시스템에 적용할 수 없는 문제가 발생한다. 이와 같은 WLAN시스템을 위해서는 분산된 방식의 opportunistic 스케줄링방식이 필요하며 현재까지 WLAN에서의 opportunistic 스케줄링을 적용하기 위한 몇

몇 연구들이 진행되어 오고 있다 [2].

본 논문에서는 중앙 집중형의 네트워크에만 적용이 가능했던 기존의 비례공정 스케줄링 방식을 개선하여 WLAN과 같은 분산화된 네트워크에 적용할 수 있는 분산화된 비례공정 스케줄링(DPFS: distributed proportional scheduling)을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 비교분석 한다.

### 2. 분산화된 비례공정 스케줄링 (DPFS)

본 논문에서의 분산화된 스케줄링기법은 multicast RTS와 prioritized CTS 메커니즘 [2]을 이용한다. 송신기는 먼저 데이터를 전송 받을 후보 수신기를 선택한다. 선택된 후보 수신기들에 RTS패킷을 전송한다. RTS 패킷에는 수신기들에 대한 주소, 각 수신기로 전송될 패킷의 크기 정보가 포함된다. 그리고 현재까지 각 수신기에 전송된 데이터에 대한 평균 전송률정보가 들어있는데 이를 위해 송신기는 데이터를 전송한 후 평균전송률을 지속적으로 쟁신한다.

RTS 패킷을 수신한 후보 수신기들은 자신의 주소가 포함되어 있는지를 확인한 후 RTS를 이용하여 채널정보를 파악하고 SNR을 계산한다. 수신기는 계산된 SNR값과 전송률별로 요구되는 SNR값을 비교하여 수신이 가능한 전송률을 결정한다. 802.11a WLAN은 적응적으로 선택할 수 있는 8가지의 전송모드를 지원한다. 전송모드에 따라 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 그리고 54Mbps중 하나의 전송률을 지원한다. 수신기는 전송 가능한 데이터 전송률과 RTS에서 받은 평균전송률을 이용하여  $i$ 번째 수신기의  $PF_i$  값을 계산한다.

$$PF_i(t) = \frac{D_i(t)}{(R_i + 1)^w}, \quad 0 < w \quad (1)$$

$D_i$ 는 RTS를 이용하여 구한 SNR을 통해 얻은 데이터 전송률이며 채널에 대한 상태정보를 나타낸다.  $R_i$ 는  $i$ 번째 수

\* 교신저자, 正會員: 한국기술교육대학교 정보기술공학부 조 교수 · 工博

E-mail : hkpark@kut.ac.kr

接受日字 : 2007年 8月 8日

最終完了 : 2007年 9月 28日

신기에 의해 현재까지 수신된 데이터의 전송률을 의미하며 스케줄링에 공평성을 반영하기 위한 요소값이 된다. 식(1)에서  $w$ 는 가중치 factor이다. 비례공정 스케줄링 방식에서와 달리 평균전송률에  $w$ 승을 하였는데 이는 공평성과 전송률에 대한 가중치를 부여하도록 함으로써 공평성과 전송률을 조절할 수 있도록 하였다. 또한  $R_i$ 에 1을 더한 것은 분모의 값이 1이하가 되는 것을 방지하기 위함이다.

RTS의 모든 후보 수신기는  $PF$  값을 계산한다. 그러나 다른 수신기에 대한  $PF$  값을 알지 못하므로 채널에 접근할 순위를 알지 못한다. 따라서 각각의 수신기들은 확률적인 방법으로 자신의 우선권순위를 계산한다. 이를 위해 식 (2)에서와 같이 먼저 자신의  $PF$  값과 다른 수신기의  $PF$  값을 확률적으로 비교하여 자신의  $PF$  값이 다른 수신기의  $PF$  값 보다 클 확률의 합을 계산한다.

$$\gamma_i(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \Pr(PF_i(t) > PF_j(t)) \quad 0 \leq \gamma_i(t) \leq N-1 \quad (2)$$

$\gamma_i(t)$ 는  $i$ 수신기의  $PF$  값이 다른 수신기의  $PF$  값보다 클 확률을 모든 후보 수신기에 대해서 합한 값이 된다. 이때 식 (2)에서  $i$ 번째 수신기의  $PF$  값이 다른 수신기의  $PF$  값보다 클 확률값은 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\Pr(PF_i > PF_j) = \Pr\left(\frac{R_j}{R_i} D_i > D_j\right)_{i \neq j} = P_{D_j} \left(0 < d < \frac{R_j}{R_i} D_i\right) \quad (3)$$

이때 각 수신기의 평균전송률  $R_j$ 는 송신기의 RTS 패킷으로부터 수신된다. 그러나 다른 수신기에 대한 순시전송률  $D_j$  값을 알 수가 없다. 따라서  $D_j$ 의 확률적 분포를 통해서  $i$ 번째 수신기의  $PF$  우선권이  $j$ 번째 수신기의  $PF$  우선권보다 클 확률을 계산하여야 한다. 이를 위해서는  $j$ 번째 수신기에서 전송률  $D_j$ 에 대한 확률밀도함수  $P_{D_j}(d)$ 를 알아야 한다.

본 논문에서는 전송률에 대한 확률밀도함수를 구하기 위해서 수신기 위치에 따른 전송률의 분포를 이용하였다. 수신기들이 송신기의 송신전력을 안다고 가정하면 거리에 따른 전송률을 계산할 수 있다. 전송률  $D_j$ 가  $d_m$ 일 확률은 전체 커버리지에 대한  $d_m$ 의 전송률로 서비스되는 영역의 비율로서 구할 수 있다. 각각의 수신기는 식(2)에서 계산한  $\gamma_i(t)$  값과 식(4)을 이용하여 자신의 우선순위  $PO_i$ 를 계산한다.

$$PO_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } \beta_{M-1} \leq \gamma_i(t) \\ 2 & \text{if } \beta_{M-2} \leq \gamma_i(t) < \beta_{M-1} \\ \dots \\ M & \text{if } \gamma_i(t) < \beta_1 \end{cases} \quad (7)$$

식(4)에서 보는 바와 같이 자신의 우선권이 다른 수신기들의 우선권보다 높을 확률의 합,  $\gamma_i(t)$ ,을 threshold 값과 비교함으로써 최종적인 우선순위  $PO_i$ 가 결정된다.  $PO_i$ 의 최대값  $M$ 은 수신기의 수와 다를 수 있으며 후보 수신기의 수  $N$ 의 정수배이다  $M=kN$  ( $k=1, 2, 3, \dots$ ). 우선권에 대한 계산이 끝나면 우선순위에 따라 서로 다른 backoff 후에 CTS를 전송한다. 이때 수신 SNR로부터 얻어진 전송률정보가 CTS 패킷에 포함된다.  $i$  번째 단말에 대한 우선순위  $PO_i$ 를 갖는 수신기  $i$ 에 대한 backoff 는 식(5)에 의해 계산된다.

$$Backoff_i = SIFS + (PO_i - 1)Time\_slot \quad (5)$$

우선순위  $PO_i$ 값이 작을수록 작은 Backoff지연 후에 CTS를 전송하여 채널을 획득할 확률을 증가시킨다.

그림 1은 세 개의 후보 수신기에 대한 우선순위가 각각 2, 3, 4 인 경우의 매체접속과정의 예를 보여주고 있다. 후보수신기의 수와 우선순위의 최대값은 일치하지 않을 수 있다. 그림에서 보듯이 채널을 감지하고 있다가 자신이 CTS를 보낼 시간슬롯 이전에 다른 수신기에 의한 CTS전송이 감지되면 자신의 CTS전송을 취소한다. 그러나 분산화된 방식으로 우선순위를 계산하기 때문에 동일한 우선순위에 의해 CTS전송에서 충돌이 생길 가능성이 존재 한다.

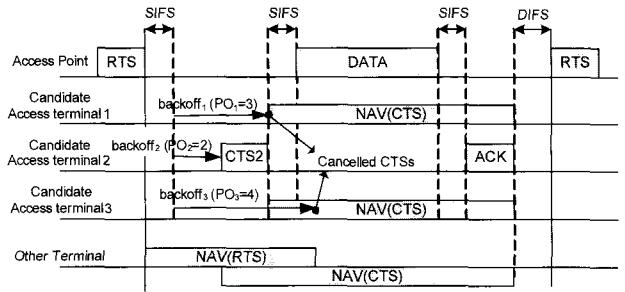


그림 1 DPFS의 매체접속과정

Fig. 1 illustration of medium access procedure in DPFS

CTS 패킷 전송에서 충돌이 발생할 경우에는 더 이상의 충돌을 방지하기 위해 OSMA [2]에서와 같이 RTS 패킷 내의 수신기의 순서에 따라 우선권을 할당한다. 이때 수신SNR이 최소 SNR을 넘지 못하면 수신기는 CTS전송을 포기하고 다른 수신기가 CTS 패킷을 송신하도록 한다.

### 3. 시뮬레이션과 결과분석

본 절에서는 3본 논문에서 제안한 분산화된 비례공정 스케줄링 (DPFS)의 성능을 시뮬레이션을 통하여 분석하였고 OSMA [2]와 전통적인 스케줄링방식인 round-robin방식과 비교 분석하였다. 채널환경은 Rayleigh flat 페이딩 채널을 가정하였고 path loss exponent는 4로 하였다. 각각의 수신기들은 RTS의 전송요청을 받은 후 수신받을 레이터의 전송속도를 결정해야 하는 데 이를 위해서는 각 전송률에 요구되는 SNR값을 알아야 한다. 요구되는 SNR값은 논문 [7]을 참고하였고 802.11 WLAN의 주요 파라미터들은 [4]을 참조하였다. 송신기의 송신전력은 20dBm으로 가정하였으며 이때 최대 커버리지는 반지름이 대략 200m가 된다. 모든 수신기에 대해 각 flow는 항상 backlogged되어있는 것으로 가정하였으며 각 수신기의 fairness를 측정하기 위해 식(6)와 같이 fairness index를 정의하였다 [5].

$$\text{fairness index: } \sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{T}_i^2 - (\bar{T}_{av})^2 \quad (6)$$

식(6)에서  $\bar{T}_i$ 수신기는  $i$ 에 대한 평균 throughput이고  $N$ 은 총 수신기의 수이다.  $T_{av}$ 는 시스템내의 모든 수신기에 대한 시스템의 평균 throughput이고 식(6)의 fairness index값이 작을수록 보다 공정한 스케줄링을 의미한다.

표 1은 가중치 factor  $w$ 에 대한 평균 fairness index를 보여주고 있다. OSMA와 round robin방식의 평균 fairness index는 각각 2.03E-4와 1.28E-4이다. 예측하듯이  $w$ 값이 커질수록 공평성에 대한 가중치가 증가하므로 fairness index 값이 작아짐을 볼 수 있다. 표 1에서 보면  $w$ 값이 증가함에 따라 처음에는 fairness index가 급격히 감소하지만  $w$ 가 0.5보다 커지게 되면 fairness index의 변화가 완만해 점을 볼 수 있다. 또한  $w$ 가 0.5보다 크면 기존의 Round Robin이나 OSMA방식과 비교하여도 공평성 성능이 거의 같거나 더 우수함을 볼 수 있다. 따라서  $w$ 값을 0.5로 정하는 것이 다른 방식과 동등한 공평성을 유지하면서도 throughput을 높일 수 있는 방법임을 알 수 있다.

표 1 가중치  $w$ 에 따른 fairness index의 평균값Table 1 Average of fairness index according to the weighting factor  $w$ 

weighting factor $w$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
avg. fairness index	9.77E-4	6.28E-4	3.58E-4	1.33E-4	1.34E-4	1.32E-4

그림 2는 수신기의 수에 따른 throughput 성능을 스케줄링 방식에 따라 비교하였다. DPFS의 가중치factor는  $w$ 가 0.5 이상 일 때 다른 스케줄링 방식과 동등한 공정성 성능을 갖게 때문에  $w$ 가 0.5이상인 경우에 대하여 성능을 분석하였다. 그림에서 보듯이  $w$ 가 0.5일 때 Round Robin이나 OSMA에 비하여 약 23%정도의 높은 throughput 성능을 보여줌을 알 수 있다.  $w$ 가 증가함에 따라 공정성 성능은 증가하는 반면 throughput 성능은 떨어지므로 Round Robin이나 OSMA와의 throughput 성능의 차이가 좁혀짐을 볼 수 있으나  $w=0.9$ 일 때까지도 기존의 방식에 비해 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

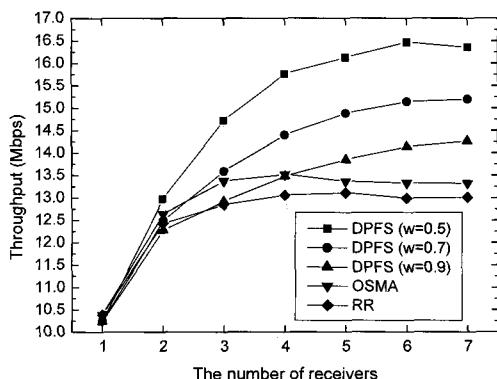


그림 2 스케줄링 방식에 따른 throughput 성능의 비교

Fig. 2 Throughput performance according to the different scheduling

표 2는 수신기가 7개인 경우의 throughput을 표로서 나타낸 것이다. 표에서 보듯이  $w$ 값이 감소할수록 throughput이 증가하며 최대 약 23% 까지 기존 방식에 비해 향상이 있음을 알 수 있다.

표 2 수신기가 7개 일때 throughput의 비교

Table 2 Throughput performance for 7 receivers

Scheduling Policy	DPFS			RR	OSMA
	$w=0.5$	$w=0.7$	$w=0.9$		
Throughput(Mbps)	16.36	15.2	14.26	13.01	13.32

#### 4. 결 론

본 논문에서는 무선LAN네트워크에서 다중사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 분산화된 방식의 비례공정 스케줄링 (DPFS) 알고리즘을 제안하였다. DPFS 알고리즘은 무선 LAN의 다중 전송률을 지원하며 각각의 수신기들이 독립적으로 채널상태를 파악하고 자신의 우선순위를 확률적으로 계산함으로써 모든 수신기의 채널상태를 수집하지 않고서도 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 DPFS방식이 충분한 공평성을 유지 하면서도 기존의 방식에 비하여 최대 23% 까지 throughput이 크게 향상됨을 보였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] A. Jalali, R. Padovani, R. Pankaj, "Data throughput of CDMA-HDR a High efficiency-high data rate personal communication wireless system," Proc. VTC' 2000 Spring, Tokyo, Japan, May 2000.
- [2] J. Wang, H. Zhai, and Y. Fang, "Opportunistic Packet Scheduling and Media Access Control for Wireless LANs and Multi-hop Ad Hoc Networks," Proc. IEEE WCNC 2004, Atlanta, Georgia, Mar. 2004.
- [3] John Thomson, Bevan Baas, Elizabeth M. Cooper, et al, "An integrated 802.11a baseband and MAC processor," proc. Of ISSCC2002 (IEEE international solid-state circuits conference)
- [4] Jean-Lien C. Wu, Hung-Huan Liu, and Yi-Jen Lung, "An adaptive multirate IEEE802.11 Wireless LAN," Proc. of Information networking, pp.411-418, Jan. 2001
- [5] Ertugrul Necdet ciftcioglu, Ozgur Gurbuz, "Opportunistic Scheduling with Frame Aggregation for Next generation wireless LANs" Proc. of IEEE IC