

무선이동 네트워크에서 일반화된 PF 스케줄링을 위한 실시간 링크 용량 관리 알고리즘[☆]

Real-Time Link Throughput Management Algorithms for Generalized PF Scheduling in Wireless Mobile Networks

정 희 진*
Heejin Joung

문 철**
Cheol Mun

육 중 관***
Jong-Gwan Yook

요 약

일반화된 PF 스케줄링을 사용하는 무선이동 네트워크는 스케줄링 변수를 조정하여 동적인 무선 자원 할당을 가능케 한다. 기존의 확률론적 접근 방법으로는 일반적인 환경에서 네트워크의 용량을 예측하는 데에는 한계가 있다. 더욱이 그 한계는 요구되는 네트워크 용량을 얻도록 하는 스케줄링 변수를 효율적으로 찾을 수 없게 한다. 본 논문은 결정론적 접근 방법을 사용하여 네트워크의 용량을 예측하는 알고리즘을 유도한다. 얻어진 용량 예측 알고리즘을 이용하여 요구되는 용량에 따른 스케줄링 변수 설정을 효과적으로 할 수 있는 용량 조정 알고리즘과 용량 교환 알고리즘 제안한다. IEEE 802.16m 시스템 기반의 시스템 레벨 시뮬레이션을 통해 제안된 용량 예측 알고리즘과 용량 교환 알고리즘의 성능을 확인한다.

ABSTRACT

Wireless mobile networks that exploit generalized PF scheduling can dynamically allocate network resources by using scheduling parameters. There are limitations to predict throughputs by the conventional stochastic approach in general. Moreover the limitations make it difficult to find appropriate scheduling parameters for achieving the demanded throughputs. This paper derives a prediction algorithm that predicts throughputs of the networks by using deterministic approach. A throughput adjust algorithm and a throughput switching algorithm are derived from the prediction algorithm. The performance of the throughput prediction/switching algorithms is evaluated by a simulator based on IEEE 802.16m system.

☞ keyword : 일반화된 PF(Generalized PF), 무선이동 네트워크(Wireless mobile networks), 용량관리(Throughput management)

1. 서 론

무선 채널의 시변(Time-varying) 특성으로 인해 무선이동 네트워크의 스케줄링은 동적으로 이루어

져야 한다. NUM(Network Utility Maximization)은 이러한 채널의 특성을 반영하여 스케줄링 알고리즘을 유도하는 하나의 판단기준(criterion)으로 많은 연구 및 실제 시스템에서 응용되고 있다[1-6,11-12]. 예를 들어, CDMA/HDR(Code Division Multiple Access/High Data Rate) 시스템은 로그 함수를 NUM의 효용함수(Utility Function)로 사용하며 이를 사용해 유도된 알고리즘은 평균 데이터 전송률 대비 순시 데이터 전송률이 높은 수신기를 선택하도록 동작한다[1-2].

단순한 로그 함수를 효용함수로 사용하는 시스템조차 일반적인 경우에 대해 그 용량(Throughput)을 구하기는 쉽지 않다. [3]의 저자는 2개의 수신기를 가정하여 용량을 유도하였으며, [4]의 저자는 순

* 정 희 원 : 연세대학교 전기전자공학과 통합과정
iionyoumarkii@yonsei.ac.kr

** 정 희 원 : 충주대학교 정보통신공학과 교수
chmun@cjnu.ac.kr

*** 종신회원 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
jgyook@yonsei.ac.kr(교신저자)

[2011/04/12 투고 - 2011/04/25 심사 - 2011/07/06 심사완료]

☆ 본 연구는 삼성전자의 지원으로 수행되었음.

☆ A preliminary version of this paper appeared in ICON/ APIC-IST 2010, Dec 16-20, Mactan Island, Philippines. This version is improved considerably from the previous version by including new results and features.

시 데이터 전송률의 평균 및 분산 특성이 비례적인 값을 가지도록 가정하여 수식 전개를 용이하게 하였다.

한편, 채널 특성 및 수신기의 요구를 보다 동적으로 반영하기 위해서는 여러 개의 스케줄링 변수를 가지는 효용함수를 사용해야 한다. 일반화된 PF 스케줄링(Generalized Proportional Fair Scheduling)은 두 개의 스케줄링 변수를 가지고 있으며 각각 수신기들 사이의 공정성(Fairness)과 우선권(Priority)을 조정할 수 있다[5]. 하지만 주어진 채널 조건에서 변수 설정 후의 결과를 예측할 수 없다면 스케줄링 변수의 조정은 무의미하다고 할 수 있다. 또한 결과 용량 예측은 부수적인 다양한 스케줄링 알고리즘을 고안해 낼 수 있게 한다.

본 연구에서는 일반화된 PF 스케줄링을 사용할 때 부딪치게 되는 이러한 용량 예측의 한계를 극복하기 위해 주어진 확률론적 채널 특성을 결정론적 접근 방법(Deterministic Approach)을 통하여 근사화하고, 이로부터 용량 조정 알고리즘 및 용량 교환 알고리즘을 유도한다.

용량 조정 알고리즘은 수신기가 요구하는 평균 데이터 전송률과 시스템이 얻을 수 있는 평균 데이터 전송률 사이의 오차를 줄이기 위해 고안된 알고리즘으로 둘 간의 평균제공오차를 최소화 하는 조건으로부터 유도된다. 용량 교환 알고리즘은, 하나의 수신기의 변수를 변경할 경우 모든 수신기가 영향을 받는 일반적인 환경에서, 두 수신기 간의 용량은 변화 시키되 다른 모든 수신기의 용량은 변화되지 않도록 하는 알고리즘이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 연구에 사용된 시스템 모델로 NUM과 일반화된 PFS를 설명한다. 3장에서는 주어진 시스템 모델에 대해 용량 예측 알고리즘을 제안하고, 이로부터 다시 용량 조정 알고리즘과 용량 교환 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 IEEE 802.16m 시스템 기반의 시뮬레이터에서의 시뮬레이션을 다루며 5장에서 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

하나의 송신기가 다수의 수신기에 신호를 전송하는 방송채널(Broadcast Channel)을 고려한다. 각각의 수신기는 자신의 채널상태를 측정할 수 있으며 피드백채널(Feedback Channel)을 통해서 전송 가능한 순시 데이터 전송률을 송신기에게 전달할 수 있다. 송신기는 모든 수신기들로부터 받은 데이터 전송률 정보를 이용하여 다음 전송시간(Timeslot)에 데이터를 전송할 수신기(들)을 선택한다. 최적화된 스케줄링 알고리즘은 가능한 모든 수신기 부분 집합 중, 네트워크의 효용함수를 최대화 하도록 하는 부분 집합을 찾는 알고리즘으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$O_{Q,n} = \arg \max_{O_S \subset O} \sum_{i \in O} f_i(R_{i,n} | i \in O_S) \quad (1)$$

여기서 $O_{Q,n}$ 는 최적의 수신기 부분집합을, O_S 는 임의의 수신기 부분집합을, O 는 수신기 전체집합을 나타낸다. i 는 수신기의 번호를, n 는 전송시간을, f_i 는 i 번째 수신기의 효용함수를 나타낸다. 그리고 $R_{i,n}$ 는 i 번째 수신기의 n 전송시간에서의 평균 데이터 전송률 나타내며 수신기가 스케줄링 알고리즘에 의해 선택되었는지의 여부에 따라 다음과 같이 업데이트 된다.

$$R_{i,n} = \begin{cases} (1-\beta)R_{i,n} + \beta r_{i,n}, & i \in O_S \\ (1-\beta)R_{i,n}, & i \notin O_S \end{cases} \quad (2)$$

여기서 $r_{i,n} \sim N(m_i, \sigma_i^2)$ 는 i 번째 수신기의 n 전송시간에서의 순시 데이터 전송률로써 평균 m_i , 분산 σ_i^2 의 값을 가지는 가우시안 랜덤 프로세스로 근사화 한다. $\beta \in (0,1)$ 는 평균값을 계산하는데 있어 순시값의 반영 비율을 조정해주는 변수이다.

본 연구에서는 일반화된 PF 스케줄링을 고려한다. 일반화된 PF 스케줄링은 [5]에서 연구되었으며 스케줄링 변수 $\alpha > 0$ 의 설정에 따라 전송용량 최대, proportional fair, 그리고 max-min fair를 얻을 수

(표 1) 일반화된 PF 스케줄링의 특징

Parameter	Utility function	Metric	Comments
$\alpha=1$	$f_i(R_{i,n}) = p_i \log(R_{i,n})$	$O_{Q,n} = \arg \max_{O_S < O} \sum_{i \in O_S} p_i \frac{r_{i,n}}{R_{i,n-1}^\alpha}$	Proportionally fair
$\alpha \neq 1$	$f_i(R_{i,n}) = p_i (1-\alpha)^{-1} R_{i,n}^{1-\alpha}$		Throughput maximization ($\alpha=0$)
			Max-min fair ($\alpha \rightarrow 0$)

있다. 뿐만 아니라 스케줄링 변수 $p_i > 0$ 의 설정에 따라 수신기들의 우선권을 설정할 수 있다. 일반화된 PF 스케줄링의 효용함수는 다음과 같이 주어진다.

$$f_i(x) = \begin{cases} p_i \log(x), & \alpha = 1 \\ p_i (1-\alpha)^{-1} x^{1-\alpha}, & \alpha \neq 1 \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $\alpha = p_i = 1, \forall i$ 일 경우 잘 알려진 PF 스케줄링으로 동작한다. 일반화된 PF 스케줄링의 알고리즘은 수식 (1)에 수식 (3)을 대입하여 얻을 수 있으며, 기울기 방법(Gradient Method)를 사용하면 다음과 같은 스케줄링 알고리즘을 얻는다[6].

$$O_{Q,n} = \arg \max_{O_S < O} \sum_{i \in O_S} p_i \frac{r_{i,n}}{R_{i,n-1}^\alpha} \quad (4)$$

(표 1)에서는 일반화된 PF 스케줄링의 특징을 정리하고 있다.

3. 용량 관리 알고리즘

3.1 용량 예측 알고리즘

용량 예측 알고리즘을 얻는 방법에 있어서 확률론적 접근 방법(Stochastic Approach)은 주어진 모델에 대해 정확한 알고리즘을 제공해 준다. 하지만 대부분의 응용에서는 모델의 복잡성 때문에 유도가 불가능하다. 결정론적 접근 방법은 확률적 효과를 어느 고정된 값으로 치환함으로써 주어진 모델을 간소화 할 수 있으며, 따라서 알고리즘의 유도를 가능하게 한다.

수식 (2)의 평균 데이터 전송률을 초기 전송시간

부터 풀어 쓰면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{i,n} = (1-\beta)^n R_{i,0} + \sum_{k=1}^n (1-\beta)^{n-k} \beta r_{i,n} \theta_{i,n} \quad (5)$$

여기서 $R_{i,0}$ 는 i 번째 수신기의 초기 평균 전송률을 나타내며, $\theta_{i,n}$ 는 순시 선택 변수로써 베르누이 랜덤 프로세스이며 i 번째 수신기가 n 전송시간에 스케줄링 알고리즘에 의해 선택되었는지의 여부에 따라 0과 1의 값을 가지게 된다. 순시 데이터 전송률은 평균 데이터 전송률은 알고리즘의 수신기 선택에 직접적으로 관계하기 때문에 $r_{i,n}$ 와 $\theta_{i,n}$ 는 서로 의존하는 관계에 있다. 결정론적 접근 방법을 통해서 충분한 시간이 경과한 후 각 수신기의 평균 데이터 전송률의 앙상블 평균(Ensemble Average)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E\{R_{i,\infty}\} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n (1-\beta)^{n-k} \beta E\{r_{i,n} \theta_{i,n}\} \\ &\stackrel{(b)}{\approx} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n (1-\beta)^{n-k} \beta E\{\tilde{r}_i\} E\{\tilde{\theta}_i\} \\ &= E\{\tilde{r}_i\} E\{\tilde{\theta}_i\} \\ &\stackrel{(c)}{=} \frac{(p_i \tilde{y}_i)^{1/\alpha}}{\sum_{j=1}^N (p_j \tilde{y}_j)^{1/\alpha} / \tilde{y}_j} \end{aligned} \quad (6)$$

수식 (6)의 (a)에서는 의존성에 의해 $r_{i,n}$ 와 $\theta_{i,n}$ 가 앙상블 평균의 연산자 안쪽에 함께 있다. (b)에서는 순시 데이터 전송률을

$$r_{i,n} \rightarrow \tilde{r}_i = g(m_i, \sigma_i^2)$$

로 근사화 하여 선택될 때의 순시 전송률의 분포 경향을 반영하도록 한다. 순시 선택변수는

$$\theta_{i,n} \rightarrow \tilde{\theta}_i = h(\alpha, p_i, \tilde{r}_i, i \in O)$$

로 근사화 하여 두 랜덤 프로세스를 독립의 관계로 근사화 한다. (c) 에서는

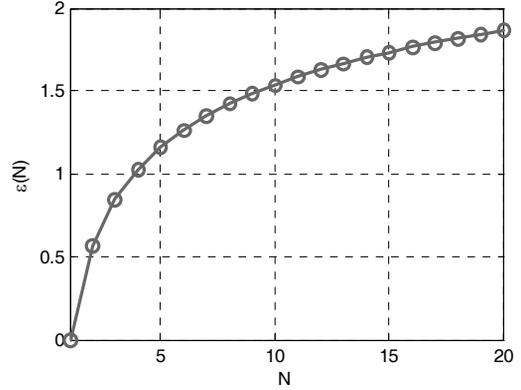
$$\begin{aligned} E\{\tilde{r}_i\} &= E\{\max(r_1, \dots, r_N)\} \\ &= N \int_{x=-\infty}^{\infty} xg(x)(G(x))^{N-1} dx \\ &= m + \sigma N \int_{x=-\infty}^{\infty} xf_{(0,1)}(x)(F_{(0,1)}(x))^{N-1} dx \\ &= m_i + \sigma_i \varepsilon(N) \\ &= \tilde{r}_i \end{aligned} \quad (7)$$

및

$$E\{\tilde{\theta}_i\} = \frac{(p_i \tilde{r}_i)^{1/\alpha}}{\tilde{r}_i} \bigg/ \sum_{j=1}^N \frac{(p_j \tilde{r}_j)^{1/\alpha}}{\tilde{r}_j} \quad (8)$$

임을 이용하여 전개하며, 여기서 $g(x)$ 와 $G(x)$ 는 각각 \tilde{r}_i 의 확률 밀도 함수와 누적 분포 함수를 나타내며, $f_{(0,1)}(x)$ 와 $F_{(0,1)}(x)$ 는 각각 정규분포의 확률 밀도 함수와 누적 분포 함수를 나타내고, $\varepsilon(N)$ 는 다중 사용자 다이버시티 이득(Multi-user Diversity Gain)으로 (그림 1)과 같이 수신기의 수가 증가함에 따라 단조 증가하는 값을 가진다. 또한 $E\{\tilde{\theta}_i\}$ 는 평형상태 및 $\beta \rightarrow 0$ 의 조건에서 수신기들 간의 효율 함수의 값이 서로 같아 진다는 점에서 다음으로부터 유추할 수 있다.

$$E\left\{p_i \frac{\tilde{r}_i}{(R_{i,\infty})^\alpha}\right\} = p_i \frac{\tilde{r}_i}{(\tilde{r}_i E\{\tilde{\theta}_i\})^\alpha} = c, \forall i \quad (9)$$



(그림 1) 다중 사용자 다이버시티 이득

3.2 용량 조정 알고리즘

송신기의 스케줄링 변수 중 p_i 는 각 수신기의 우선권을 설정하며, 수신기가 요구하는 평균 데이터 전송률을 기반으로 하여 정해진다. 하지만 모든 수신기의 요구를 만족할 수는 없기 때문에 가능한 전송률과 요구된 전송률 간의 평균 제곱 오차(MSE)를 최소화 하는 용량 조정 알고리즘을 제안한다.

용량 조정 알고리즘은 다음을 만족하는 $p_i, i \in O$ 를 찾는다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } \|\mathbf{R}^D - \mathbf{R}\|^2 \\ &\text{Subject to } \mathbf{p} \geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 \mathbf{R}^D 는 수신기가 요구하는 평균 데이터 전송률 벡터, \mathbf{R} 는 가능한 평균 데이터 전송률 벡터, 그리고 \mathbf{p} 는 스케줄링 변수 벡터이며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}^D &= [R_1^D, \dots, R_N^D]^T, \\ \mathbf{R} &= [E\{R_{1,\infty}\}, \dots, E\{R_{N,\infty}\}]^T, \\ \mathbf{p} &= [p_1^{1/\alpha}, \dots, p_N^{1/\alpha}]^T. \end{aligned} \quad (11)$$

수식 (6)의 평균 데이터 전송률을 수식 (10)의 목적함수에 대입하여 정리하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \|\mathbf{R}^D - \mathbf{R}\|^2 &= \|\mathbf{R}^D\|^2 + \frac{\mathbf{p}^T \mathbf{A} \mathbf{p} - 2\mathbf{p}^T \mathbf{B} \mathbf{p}}{\mathbf{p}^T \mathbf{C} \mathbf{p}} \\ &= \|\mathbf{R}^D\|^2 + \frac{\mathbf{p}^T \mathbf{D} \mathbf{p}}{\mathbf{p}^T \mathbf{C} \mathbf{p}} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ 각각의 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \text{diag}[\tilde{\gamma}_1^{2/\alpha}, \dots, \tilde{\gamma}_N^{2/\alpha}], \\ \mathbf{B}_{(i,j)} &= \left[\left(R_i^D \tilde{\gamma}_i^{1/\alpha} \right), \left(\frac{\tilde{\gamma}_j^{1/\alpha}}{\tilde{\gamma}_j} \right) \right], \\ \mathbf{C}_{(i,j)} &= \left[\left(\frac{\tilde{\gamma}_i^{1/\alpha}}{\tilde{\gamma}_i} \right), \left(\frac{\tilde{\gamma}_j^{1/\alpha}}{\tilde{\gamma}_j} \right) \right], \\ \mathbf{D} &= \mathbf{A} - 2\mathbf{B}. \end{aligned} \quad (13)$$

수식 (12)를 이용하여 최적화 문제의 수식 (20)를 다음과 같이 제정의 할 수 있으며

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \|\mathbf{R}^D\|^2 + \frac{\mathbf{p}^T \mathbf{D} \mathbf{p}}{\mathbf{p}^T \mathbf{C} \mathbf{p}} \\ \text{subject to} \quad & \mathbf{p} \geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (14)$$

또한 \mathbf{R}^D 가 상수라는 점과 $(\mathbf{p}^T \mathbf{D} \mathbf{p})/(\mathbf{p}^T \mathbf{C} \mathbf{p})$ 는 비율에 관한 문제임을 상기하면 다음과 같은 최종 형태의 최적화 문제를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \mathbf{p}^T \mathbf{D}_s \mathbf{p} \\ \text{Subject to} \quad & \mathbf{p}^T \mathbf{C}_s \mathbf{p} = 1 \\ & \mathbf{p} \geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서

$$\mathbf{D}_s = \frac{1}{2}(\mathbf{D} + \mathbf{D}^T), \mathbf{C}_s = \frac{1}{2}(\mathbf{C} + \mathbf{C}^T) \quad (16)$$

로써 함수 값은 유지하면서 각각의 행렬을 대칭 행렬로 변형해 준다. 최적화 문제 (15)의 KKT 조건 (Karush - Kuhn - Tucker Condition)은 다음과 같다 [7].

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu} &\leq \mathbf{0}, \\ 2\mathbf{p}^T \mathbf{D}_s - 2\lambda \mathbf{p}^T \mathbf{C}_s + \boldsymbol{\mu}^T &= \mathbf{0}^T, \\ \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{p} &= 0, \\ 1 - \mathbf{p}^T \mathbf{C}_s \mathbf{p} &= 0, \\ \mathbf{p} &\geq \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (17)$$

이들 다섯 개의 조건을 조합하여 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{\mathbf{p}^T \mathbf{D}_s \mathbf{p}}{\mathbf{p}^T \mathbf{C}_s \mathbf{p}} = \lambda, \quad \left(\frac{1}{\lambda} \mathbf{I} - (\mathbf{D}_s)^{-1} \mathbf{C}_s \right) \mathbf{p} = \mathbf{0} \quad (18)$$

수식 (18)로부터 가능한 전송률과 요구된 전송률 간의 평균 제곱 오차(MSE)를 최소화 하는 스케줄링 변수 \mathbf{p}^* 는 행렬 $(\mathbf{D}_s)^{-1} \mathbf{C}_s$ 의 최대 고유치 $1/\lambda$ 에 해당하는 고유벡터 \mathbf{p} 임을 알 수 있다. 단, \mathbf{D}_s 의 역행렬이 존재해야 한다.

3.3 용량 교환 알고리즘

하나 이상의 수신기의 스케줄링 변수 p_i 의 값을 변경하면 모든 수신기의 평균 데이터 전송률이 영향을 받게 된다. 용량 교환 알고리즘은 전체 수신기들 중 두 수신기를 선택하여, 이들간 평균 데이터 전송률을 교환하되, 나머지 수신기들의 평균 데이터 전송률은 변하지 않도록 한다.

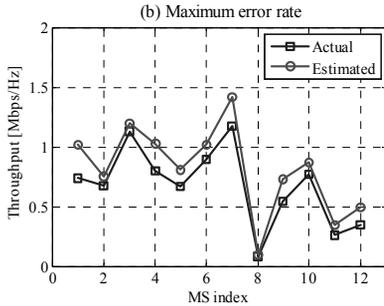
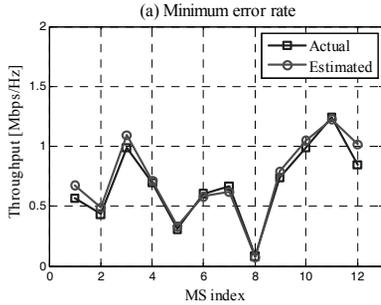
선택된 두 수신기의 현재 평균 데이터 전송률 $E\{R_{u,\infty}\}, E\{R_{v,\infty}\}$ 와 교환 후의 평균 데이터 전송률 $E\{R_{u,\infty}^c\}, E\{R_{v,\infty}^c\}$ 간의 비율을 각각

$$\tau_u = \frac{E\{R_{u,\infty}^c\}}{E\{R_{u,\infty}\}}, \tau_v = \frac{E\{R_{v,\infty}^c\}}{E\{R_{v,\infty}\}} \quad (19)$$

와 같이 표현하면, 용량 교환을 위한 스케줄링 변수 p_u^c 와 p_v^c 는 수식 (6)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(표 2) 제안하는 알고리즘의 특징 및 기존 연구와의 비교

알고리즘	제안	기존 연구
용량 예측 알고리즘	오차가 존재하지만 Closed-form 이며 간단함	[3]: 상미분 방정식으로 접근. 일반적인 경우에 Closed-form 존재하지 않음 [4]: Closed-form이지만 여전히 복잡하여 조정 및 교환 알고리즘 도출 불가능 [11,12]: 다수의 송신기에 대해 해석하며 비교적 낮은 복잡도의 알고리즘을 제안하지만 조정 및 교환 알고리즘 도출에는 알맞지 않음
용량 조정 알고리즘	낮은 복잡도로 계산 가능	-
용량 교환 알고리즘	낮은 복잡도로 계산 가능	-



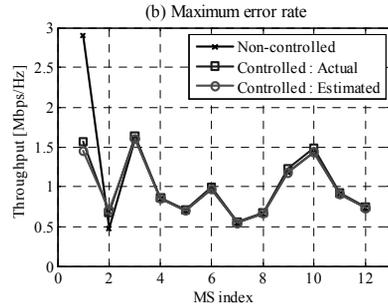
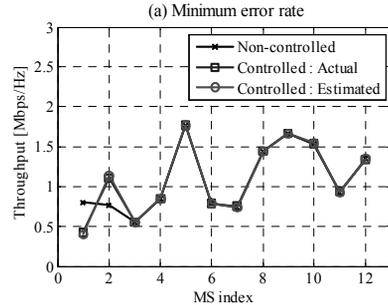
(그림 2) 용량 예측 알고리즘의 오차
평균 15.09%, (a)최소 9.15%, (b)최대 23.72%

$$p_u^c = \tau_u p_u, \quad p_v^c = \tau_v p_v, \quad (20)$$

다시 수식 (6)으로부터 교환에 참여하지 않는 수신기들의 교환 전의 평균 전송 용량,

$$E\{R_{i,\infty}\} = \frac{(p_i \tilde{\gamma}_i)^{1/\alpha}}{\dots + \frac{(p_u \tilde{\gamma}_u)^{1/\alpha}}{\tilde{\gamma}_u} + \frac{(p_v \tilde{\gamma}_v)^{1/\alpha}}{\tilde{\gamma}_v} + \dots}, \quad (21)$$

과 교환 후의 평균 전송 용량,



(그림 3) 용량 교환 알고리즘의 오차
평균 1.99%, (a)최소 1.30%, (b)최대 3.03%

$$E\{R_{u,\infty}^c\} = \frac{(p_u \tilde{\gamma}_u)^{1/\alpha}}{\dots + \frac{\tau_u (p_u \tilde{\gamma}_u)^{1/\alpha}}{\tilde{\gamma}_u} + \frac{\tau_v (p_v \tilde{\gamma}_v)^{1/\alpha}}{\tilde{\gamma}_v} + \dots}, \quad (22)$$

를 생각할 수 있으며, 여기서 $E\{R_{u,\infty}^c\} = E\{R_{u,\infty}\}$, $i \notin \{u, v\}$ 를 만족하는 τ_u 와 τ_v 는

$$\begin{aligned} & \frac{(p_u \tilde{\gamma}_u)^{1/\alpha}}{\tilde{\gamma}_u} + \frac{(p_v \tilde{\gamma}_v)^{1/\alpha}}{\tilde{\gamma}_v} \\ &= \frac{\tau_u (p_u \tilde{\gamma}_u)^{1/\alpha}}{\tilde{\gamma}_u} + \frac{\tau_v (p_v \tilde{\gamma}_v)^{1/\alpha}}{\tilde{\gamma}_v} \end{aligned} \quad (23)$$

(표 3) 시스템 레벨 시뮬레이션 변수

Parameter	Value
Inter-Site Distance	1,500 m
Carrier frequency	2.5 GHz
Thermal noise	- 174 dBm / Hz
Shadowing std.	8 dB
Subcarrier Spacing	10.9375 kHz
BS transmit power	46 dBm (40 watt)
Path-Loss	Modified model
Penetration loss	18dB
Min distance	35 m
Minimum CINR	- 11 dB
MS noise figure	7dB,

를 만족해야 함을 알 수 있다. 정리하면 아래의 조건 및 관계를 얻을 수 있다.

$$0 < \tau_u \leq 1 + \left(\frac{p_v}{p_u}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{\tilde{\gamma}_v}{\tilde{\gamma}_u}\right)^{\frac{1}{\alpha}-1},$$

$$\tau_v = 1 + (1 - \tau_u) \left(\frac{p_u}{p_v}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{\tilde{\gamma}_u}{\tilde{\gamma}_v}\right)^{\frac{1}{\alpha}-1} \quad (24)$$

따라서 두 수신기 간의 용량 교환은 수식 (24)를 만족하면서 수식 (20)과 같이 스케줄링 변수를 설정함으로써 수행될 수 있다.

4. 시뮬레이션

제안된 용량 예측 알고리즘과 용량 교환 알고리즘을 IEEE 802.16m 시스템[8-9]의 시스템 레벨 시뮬레이터 상에서 수행하였다. 시뮬레이터는 총 19 개의 셀을 동시에 고려하였다. 하나의 셀은 다시 3 개의 섹터로 나누어지며, 각 섹터 간의 간섭 신호가 고려되었다. 셀의 중앙에는 각 섹터를 위한 3개의 송신기가 있으며, 송신기는 4개의 송신 안테나를 가지고 있다. 반경 1,500 [m]의 셀 안에는 섹터당 12개의 수신기가 고르게 분포되어 있고 수신기는 2개의 수신안테나를 가지고 있다. 송신기와 수

신기 사이의 채널은 3GPP-3GPP2 spatial channel model [10]을 기반으로 발생되었다. 송수신기 간의 MIMO 채널을 활용하기 위해 IEEE 802.16m의 Operation Mode 2를 사용하였다. Operation Mode 2는 다중 스트림을 선택된 수신기들에게 동시에 전송함으로써 공간 다중화를 얻는다. 시스템 레벨 시뮬레이터의 주요 변수를 (표 3)에 정리하였다.

시뮬레이션에서 용량 예측 알고리즘은 네트워크의 수신기가 충분한 시간(2ms)이 경과한 뒤 얻을 수 있는 평균 데이터 전송률을 예측하였다. 용량 교환 알고리즘은 용량 예측 알고리즘이 끝난 뒤, 1번 수신기와 2번 수신기 간의 용량을 교환하기 위해 스케줄링 변수를 설정하고 충분한 시간이 경과한 뒤에 얻을 수 있는 평균 데이터 전송률을 계산하였다.

시뮬레이션을 수행한 결과, 용량 예측 알고리즘은 평균 오차 15.09%, 최소 오차 9.15%, 그리고 최대 오차 23.72%를 보였다. 또한 용량 교환 알고리즘은 평균 오차 1.99%, 최소 오차 1.30%, 그리고 최대 오차 3.03%를 나타냈다. 알고리즘을 수행하여 얻은 결과의 오차의 원인은 크게 두 가지로 나뉘 볼 수 있다. 첫 번째의 경우 시스템 자체에서 오는 오차로, 프레임 에러, ARQ, 섹터간 간섭 등이 피드백 정보인 순시 데이터 전송률을 변화시켰기 때문이다. 두 번째의 경우 알고리즘 자체에서 오는 오차로, 순시 데이터 전송률을 수식 (7)과 같이 근사화 하여 알고리즘을 유도하였기 때문이다.

5. 결 론

일반화된 PF 스케줄링을 사용하는 무선이동 네트워크의 용량을 예측하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 채널 및 스케줄링의 확률적 특성을 결정론적 접근 방법으로 근사화 하여 간단한 형태를 가지도록 하였다. 이로부터 용량 조정 알고리즘과 용량 교환 알고리즘을 유도할 수 있었다. 또한 얻어진 알고리즘의 낮은 복잡성으로 실시간 용량 관리가 가능하다. IEEE 802.16m 시스템

을 기반으로 한 시스템 레벨 시뮬레이션은 용량 예측 알고리즘 및 용량 교환 알고리즘의 오차를 보여주며 알고리즘 유도에 사용된 근사화 방법의 개선의 여지를 드러내고 있다.

참 고 문 헌

- [1] A. Jalali, R. Padovani, and R. Pankaj, "Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system," Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. vol.3, no., pp.1854-1858 vol.3, 2000.
- [2] TIA/EIA IS-856, "CDMA 2000: High rate packet data air interface specification," Std., Nov. 2000.
- [3] H. J. Kushner and P. A. Whiting, "Convergence of proportional-fair sharing algorithms under general conditions," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol.3, no.4, pp. 1250-1259, Jul. 2004.
- [4] E. Liu and K. K. Leung, "Throughput of proportional fair scheduling over Rayleigh fading channels," Electronics Letters, vol. 45, no. 23, pp.1180-1182, Nov. 2009.
- [5] J. Mo and J. Walrand, "Fair end-to-end window-based congestion control," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 8, No. 5, pp. 556-567, Oct. 2000.
- [6] A. L. Stolyar, "On the asymptotic optimality of the gradient scheduling algorithm for multiuser throughput allocation," Operations Research, vol. 53, no. 1, pp. 12 - 25, 2005.
- [7] E. K. P. Chong and S. H. Zak, "An introduction to optimization, 3rd ed.," Wiley-Interscience publication, 2008.
- [8] IEEE 802.16m-08/004r5, "IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document," January 2000.
- [9] IEEE P802.16m/D2, October 2009.
- [10] 3GPP-3GPP2 Spatial Channel Model Ad-Hoc Group, "Spatial channel model for MIMO simulations", 3GPP Technical Report, June 2007.
- [11] H. Zhou, P. Fan, and J. Li, "Global Proportional Fair Scheduling for Networks With Multiple Base Stations," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol.60, no.4, pp.1867-1879, May 2011.
- [12] Honghai Z., Venturino L., Prasad N., Peilong L. Rangarajan, S., and Xiaodong W., "Weighted Sum-Rate Maximization in Multi-Cell Networks via Coordinated Scheduling and Discrete Power Control," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol.29, no.6, pp.1214-1224, June 2011.

◎ 저 자 소 개 ◎

정 희 진 (Heejin Joung)



2008년 2월 충주대학교 전자통신공학과 공학사.
2008년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 통합과정.
관심분야 : MIMO 시스템, 무선자원관리.

문 철 (Cheol Mun)



1995년 2월 연세대학교 전자공학과 공학사.
1997년 2월 연세대학교 전자공학과 공학석사.
2001년 2월 연세대학교 전자공학과 공학박사.
2001년 3월~2002년 2월 삼성전자 네트워크 사업부.
2003년 3월~현재 충주대학교 정보통신공학과 교수.
관심분야 : 채널 모델링, MIMO, OFDM.

육 종 관 (Jong-Gwan Yook)



1987년 2월 연세대학교 전자공학과 공학사.
1989년 2월 연세대학교 전자공학과 공학석사.
1996년 2월 University of Michigan 공학박사.
1997년 1월~1998년 10월 University of Michigan Research Fellow.
1998년 11월~1999년 2월 Qualcomm Inc. Senior Engineer.
1999년 3월~2000년 2월 광주과학기술원 정보통신과 교수.
2000년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수
관심분야 : 마이크로파 소자 및 안테나, 초고주파 통신 시스템, 전자파 환경(EMI/EMC), 수치 해석, RF MEMS 설계, 병렬 컴퓨팅.