

논문 2006-43TC-11-1

# 낮은 SINR 상황의 무선 애드혹 네트워크를 위한 혼잡 제어와 전송 파워 제어의 복합 최적화 기법

( Joint Congestion and Power Control Optimization for Wireless Ad-hoc  
Network in the Low-SINR Regime )

곽 재 욱\*, 모 정 훈\*\*

( Jaewook Kwak and Jeonghoon Mo )

## 요 약

본 논문에서는 코드분할 다중화방식(CDMA)을 기반으로 한 무선 애드혹 네트워크에서의 혼잡 제어와 전송 파워 제어의 복합 최적화 기법에 대해서 고찰하고, 낮은 신호대비 잡음 및 간섭(이하 SINR) 상황을 고려한 알고리즘을 제시한다. 기존의 연구 [6]에서 제시된 CDMA기반의 무선 애드혹 네트워크를 위한 복합 제어 방식은 높은 SINR상황을 가정하고 있으며, 낮은 SINR상황에 대해서는 고려하지 않았다. 본 논문에서 우리는 SINR이 1보다 상대적으로 훨씬 작은 낮은 SINR상황에 대해서 고려해야 할 문제점들을 살펴보고, 적절한 알고리즘을 제시한다.

## Abstract

This paper consider a code-division multiple-access(CDMA) wireless ad-hoc network in low-SINR regime. In previous research [6], there has been proposed a algorithm for achieving global optimum at high SINR regime, but has not been fully investigated at low-SINR regime. In this paper, we focus on a case where SINR is much smaller than 1, and propose a algorithm that is suitable for low-SINR regime.

**Keywords :** 애드혹 네트워크(Ad-hoc network), 코드분할 다중화방식(Code-division Multiple Access), 신호대비 잡음 및 간섭비율(Signal to Interference and Noise Ratio), 네트워크 만족도 최적화 문제(Network Utility Maximization Problem), 오목성(concavity)

## I. 서 론

애드혹 네트워크는 특정한 기반망의 도움 없이 동적인 네트워크를 형성한다. 유선 네트워크와 마찬가지로 단말 세션들이 다중 홉을 거쳐 통신이 이루어지지만, 각 노드들 간의 통신은 무선 채널을 사용한다. 다중 홉 통신 과정에서 각 노드들의 통신이 다른 통신에 간섭을 주는 특징이 있다.

애드혹 네트워크상에서의 무선 채널 자원 분배 문제는 주로 효율성과 공평성의 측면에서 다루어진다. 특히 매체접근제어(Media access control) 계층에서는 노드들 사이의 1-홉 통신에 대해 제어하며, 전송 제어(Transmission control) 계층에서는 각 단말 세션들 사이의 통신을 제어한다.

무선 네트워크에서의 매체접근제어 계층에서는 물리(Physical) 계층에서 사용되는 전송 방식에 의해서 크게 주파수분할 다중화 방식(FDMA)과 시분할 다중화 방식(TDMA), 그리고 코드분할 다중화 방식(CDMA)로 나누어진다. 그중에서도 CDMA방식은 주파수 대역을 효율적으로 사용하며, 전송 딜레이가 짧다는 장점이 있어 오늘날 전화망에서 널리 사용되고 있다.

혼잡제어 계층은 각 단말 세션들이 공유하고 있는 링크의 대역폭 자원에 대해서 효율적이고 공평하게 사용

\* 정회원, 시큐아이닷컴 정보보호연구소  
(information security research center, secui.com)

\*\* 정회원, 한국정보통신대학교  
(School of Engineering, Information and  
Communications University)

※ 본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구과제에 의해서 지원받았음  
접수일자: 2006년10월10일, 수정완료일: 2006년11월18일

될 수 있도록 제어하는 역할을 담당하고 있다. 이는 압 목적으로 네트워크 만족도를 최대화 하는 문제를 의미 하고 있다. 1998년 Kelly<sup>[1]</sup>의 최적화 문제를 기반으로 한 유선 네트워크 모델링과 알고리즘에 대한 연구 이후 로 애드혹 네트워크에도 이를 적용하기 위한 많은 연구 들이 발표되었다.

무선 애드혹 네트워크와 유선 네트워크의 가장 큰 차이점은 유선 네트워크에서는 각 링크들이 안정되고 신뢰성 있는 대역폭을 유지하고 있는 반면, 무선 애드혹 네트워크에서의 링크는 주변 노드들의 수나 무선 채널 상황에 따라 얻을 수 있는 대역폭이 변화하는 한다는 것이다. 애드혹 네트워크상의 노드들이 데이터를 전송 하기 위해서는 노드들의 위치에 따라 지역적으로 주변 노드들과 한정된 무선 채널 자원의 사용에 대한 경쟁을 해야 한다. 따라서 애드혹 네트워크에서의 프로토콜 계 층들은 이러한 특성들을 고려하여 설계되어야 한다.

최근 연구에서는 애드혹 네트워크에서의 무선 채널 자원을 보다 효율적으로 활용하기 위해서 레이어간의 복합 제어에 대한 내용이 다루어지고 있다. [2, 3]에서는 그래프 이론의 Maximal clique을 기반으로 한 전송 제어와 스케줄링 제어에 대해 다루었으며, [4, 5]에서는 Aloha 네트워크에서 전송 계층과 매체 접근 제어 계층 을 복합적으로 최적화 하는 분산 알고리즘을 제시하였다. [6]에서는 CDMA를 기반으로 한 네트워크에서 혼 잡 제어와 전송파워를 복합적으로 최적화 하는 알고리 즘을 제시하였다.

본 논문은 [6]의 연구와 마찬가지로 CDMA를 기반으로 한 애드혹 네트워크를 고려하고 있다. 하지만 연구 [6]에서는 모든 링크의 SINR값이 1보다 상대적으로 큰 높은 SINR을 유지하고 있다고 가정하고 있어, Ultra-wide band(UWB) 와 같은 낮은 SINR을 유지하 는 네트워크에서는 그의 연구 결과를 그대로 적용하기 에 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 이와 반대로 SINR이 1보다 상대적으로 매우 작은 낮은 SINR 환경 에 대해서 중점적으로 다루고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II절에서 본 논문에서 고려하는 CDMA기반의 애드혹 네트워크에서 의 시스템 모델에 대해 살펴보고, III절에서 본 논문에서 의 문제를 정의하고 기존의 연구와의 차이점을 설명 한다. IV절에서 문제에 대한 해결 접근 방안을 설명하 고 알고리즘을 도출하고, V절에서 최적해의 존재 여부를 수식을 통해 알아본다. VI절에서는 제안된 알고리즘 의 성능 및 수렴여부를 실험 결과를 통해 알아본다. 마

지막으로 VII절에서 향후 추가되어야할 점과 결론으로 마무리 짓는다.

## II. 시스템 모델

무선 애드혹 네트워크상에 집합  $N$ 의 노드와 집합  $L$ 의 링크가 존재한다고 하자. 링크  $l=(i,j)$ 는 노드  $i \in N$ 가 노드  $j \in N$ 에게 신호를 전송할 때 존재한다. 각 링크  $l \in L$ 에 대해서  $p_l \in P$ 을 링크  $l$ 의 전송 파워라 고 표기하며,  $g_{lk}$ 를 링크  $l$ 과  $k$ 사이(링크  $l$ 의 발신 노드 부터 링크  $k$ 의 수신 노드까지)의 path gain,  $n_l$ 은 링크  $l$ 에 미치는 noise라고 표기한다. 그러면 각 링크  $l \in L$ 이 얻게 되는 신호대비 잡음 및 간섭비율(SINR)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SINR_l(p) = \frac{g_{ll}p_l}{\sum_{k \neq l} g_{kl}p_k + n_l}, \forall l \in L \quad (1)$$

그러면 무선 채널의 링크 허용량(capacity)은 SINR의 함수로 표현될 수 있다. Shannon capacity 모델에 따르면 링크 허용량은 주파수 대역  $W$ 에 대해서 아래의 식으로 표현된다.

$$c_l(P) = W \log(1 + K \cdot SINR_l(p)) \quad (2)$$

$K = (-\phi_1)/\log(\phi_2 BER)$ 는 modulation과 요구된 BER값에 따르는 상수값이다. 위의 식은 전송 파워  $p$ 에 대해 quasi-linear하다고 알려져 있으며, 식을 단순화하기 위해 그림 1에서 볼 수 있듯이 SINR 값에 따라 다음과 같이 가정할 수 있다.

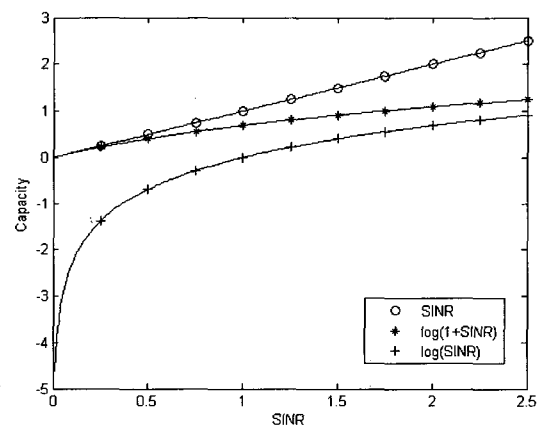


그림 1. SINR vs. log(1+SINR) vs. log(SINR)

Fig. 1. SINR vs. log(1+SINR) vs. log(SINR).

$$\begin{cases} c_l(p) \approx W \log(K \cdot SINR_l(p)) & \text{if } SINR_l(p) \gg 1 \\ c_l(p) \approx W \cdot K \cdot SINR_l(p) & \text{if } SINR_l(p) \ll 1 \end{cases} \quad (3)$$

선행 연구 [6]에서는  $SINR_l(P) \gg 1$ 인 높은 SINR 상황에서 다루었으나, 본 논문에서는  $SINR_l(p) \ll 1$ 인 낮은 SINR 상황에 대해서 중점적으로 다룬다.

### III. 문제 정의

네트워크상에서 집합  $S$ 의 단말 세션이 존재한다고 가정한다. 각 세션은 무선 노드들을 복수개의 홉을 거쳐 여러 개의 링크를 사용할 수 있다. 복수 홉의 단말 세션들의 만족도를 최적화 하는 네트워크에서의 최적화 문제는 일반적으로 다음과 같이 수식화된다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_x U_s(x_s) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{s: l \in L(s)} x_s \leq c_l, \forall l \\ & x \geq 0. \end{aligned} \quad (4)$$

$U_s(\cdot)$ 는 단말 세션  $s$ 의 만족도 함수이며, Proportionally Fair한 최적 상태를 얻기 위해서는 본 논문에서는  $\log$ 가 사용된다<sup>[1]</sup>. 조건식은 각 링크에 들어오는 단말 세션들의 전송 rate들의 합이 그 링크의 허용량을 넘을 수 없음을 나타낸다.

무선 네트워크 역시 각 단말 세션들이 다중 홉을 거쳐 통신이 이루어지므로, 위의 문제와 유사하지만, 유선 네트워크에서는 조건식의 우변 항  $c_l$ 이 상수 값인 반면, 무선 네트워크에서는 위에서 설명한 모델에 따라 전송 파워의 함수로 표현되어야 한다. 따라서 본 논문에서 다루고자 하는 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_x \log(x_s) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{s: l \in L(s)} x_s \leq c_l(p), \forall l \\ P: \quad & c_l(p) = \eta \cdot \frac{g_{ul} p_l}{\sum_{k \neq l} g_{kl} p_k + n_l} \\ & x \geq 0, \quad p_l^{\max} \geq p_l \geq 0 \\ \text{where} \quad & \eta = W \cdot K \end{aligned} \quad (5)$$

이 문제에서의 결정변수는 전송 rate  $x$ 와 전송 파워  $p$ 이며, 위의 식이  $(x, p)$  모두에 대해서 오목(concave)할 때 유일한 최적 값을 얻을 수 있다. 기존의 연구<sup>[6]</sup>에서는 링크의 허용량  $c_l(p)$ 이  $\log(SINR)$ 로 가정됨에 따라  $\log$ 의 성질에 의해서  $(x, p)$ 에 대해 오목함을 보

일 수 있었으나, 본 논문에서의 문제에서는  $p$ 에 대해서 오목하지 않다. 이 문제를 다루기 위해서 우리는 다음과 같은 접근 방법을 사용한다.

### IV. 문제 해결 및 알고리즘

문제  $P$ 를 곧바로 푸는 대신 아래와 같이 주어진  $p$ 에 대해서  $c(p)$ 이 상수 값  $y = \{y_1, y_2, \dots, y_l\}$ 으로 고정되어 있는 문제를 고려해 보자.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_x U_s(x_s) \\ \hat{P}: \quad \text{s.t.} \quad & \sum_{s: l \in L(s)} x_s \leq y_l, \forall l \\ & x \geq 0. \end{aligned} \quad (6)$$

위의 문제로부터 각 조건식에 라그랑제 승수를 결합하여 조건식이 없는 문제를 만들고, 이로부터 듀얼 문제를 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} L(\lambda) &= \max_{x \geq 0} L(x, \lambda) \\ &= \max_{x \geq 0} \sum_{s \in S} \log(x_s) - \sum_{l \in L} \lambda_l \left( \sum_{s: l \in L(s)} x_s - y_l \right) \end{aligned} \quad (7)$$

유선 네트워크에서 고정된 허용량에 대해 최적의 전송 rate을 찾는 문제와 동일하므로, gradient method를 사용함으로써, 다음과 같은 분산 알고리즘을 얻을 수 있다.

$$x_s(t+1) = 1 / \left( \sum_{l \in L(s)} \lambda_l \right) \quad (8)$$

$$\lambda_l(t+1) = \left[ \lambda_l(t) + \alpha \cdot \left( \sum_{s: l \in L(s)} x_s(t) - y_l \right) \right]^+ \quad (9)$$

각 단말 세션들은 그 세션이 사용하는 링크들로부터  $\lambda_l$  값들을 얻어와 식 (8)에 따라 세션 rate을 조절한다. 각 링크는 시간  $t$  시점에서 들어오는 세션 rate들의 합으로부터 식 (9)에 따라 새로운  $\lambda_l$ 를 계산하고, 이를 각 세션들에게 전달한다.

위의 알고리즘으로부터 얻어진 문제  $\hat{P}$ 의 최적상태의 목적식 값을  $\hat{\theta}$ 이라고 정의하자. 그러면  $y$  값이 변함에 따라  $\hat{\theta}$  역시 변하게 되므로 다음과 같이  $\hat{\theta}$ 를  $y$ 에 대한 함수로 정의할 수 있다.

$$\hat{\theta}(y) = \max \left\{ \sum_{x \in X} \log(x) \mid \sum_{s \in S} x_s \leq y_l, l \in L \right\} \quad (10)$$

$C(p) = y$ 이므로,  $\hat{\theta}(C(p)) = \hat{\theta}(y)$ 이며, 이는 다시  $\tilde{\theta}(p) = \hat{\theta}(C(p))$ 라고 말할 수 있다. 따라서 문제  $P$ 는 전송파워  $p$ 에 대해서 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\tilde{P}: \quad \max_{s.t.} \quad \tilde{\theta}(p) \\ p_l^{\max} \geq p_l \geq 0, \quad l \in L \quad (11)$$

위의 문제를 gradient method를 사용하여 아래와 같은 전송파워 갱신 알고리즘을 도출할 수 있다.

$$p_l(t+1) = \left[ p_l(t) + \gamma \cdot \frac{\partial \tilde{\theta}(p)}{\partial p_l} \right]^{p_l^{\max}} \quad (12)$$

$\gamma$ 는 스텝 크기이며,  $\frac{\partial \tilde{\theta}(p)}{\partial p_l}$ 은 아래의 식과 같이 계산되어진다.

$$\frac{\partial \tilde{\theta}(p)}{\partial p_l} = \frac{\lambda_l^* g_{ll}}{\sum_{k \neq l} g_{kl} p_k + n_l} - \sum_{j \neq l} \frac{\lambda_j^* g_{jj} p_j g_{lj}}{\left( \sum_{m \neq j} g_{mj} p_m + n_j \right)^2} \quad (13)$$

$\lambda^*$ 는 알고리즘 (8, 9)에 의해 얻어진 듀얼 최적해이다. 위의 식을 SINR의 정의에 따라 정리하면, 아래와 같은 분산된 전송 파워 갱신 알고리즘과 그에 필요한 메시지 정보를 표현할 수 있다.

$$p_l(t+1) = \left[ p_l(t) + \gamma \cdot \frac{\lambda_l^* \cdot \text{SINR}_l(p)}{p_l(t)} - \sum_{j \neq l} g_{jj} m_j(t) \right]^{p_l^{\max}} \quad (14)$$

$$m_j(t) = \frac{\lambda_j^* \cdot \text{SINR}_j^2(p)}{g_{jj} p_j} \quad (15)$$

각 노드의 링크는 통신 디바이스로부터 측정된 SINR과  $g, p$ , 즉 로컬 정보와 식 (15)를 이용해  $m_j$ 를 계산하고, 이를 브로드캐스트 메시지를 통해 주변 링크들에게 전달한다. 전달받은 링크들은 식 (14)에 따라 전송 파워를 갱신한다.

$\tilde{\theta}$ 는 전송 파워  $P$ 가 주어졌을 때의 최적의 세션 rate의 해이므로, 위의 알고리즘들에서 알고리즘 (8, 9)에 의해 세션 rate  $x$ 가 수렴할 때 까지 전송 파워  $P$ 를 고정시킴으로써 구할 수 있다. 알고리즘 (12-15)는 수렴된  $\tilde{\theta}$ 에 대해 병목현상을 완화하기 위해서 전송 파워를 갱신한다. 따라서 알고리즘 (8, 9)의 갱신 시간 규모는 알고리즘 (12-15)에 비해 훨씬 크다.

## V. 알고리즘 수렴 분석

본 절에서는 제안된 알고리즘의 수렴 여부 및 최적성에 대해서 알아보기 위해 아래의 정리를 사용한다.

정리 1. [9]의 낙하접근(Descent approach) 이론에 따라, 함수  $\tilde{\theta}(p)$ 가 Lipschitz continuity 속성  $\|\nabla \tilde{\theta}(p_1) - \nabla \tilde{\theta}(p_2)\| \leq K \cdot \|p_1 - p_2\|$ ,  $K > 0$ 을 가진다면, 충분히 작은 스텝 크기  $\epsilon \leq \gamma \leq (2 - \epsilon)/(K)$ 의 gradient method 알고리즘은 지역해로 수렴한다.

증명.

$\|\nabla \tilde{\theta}(p_1) - \nabla \tilde{\theta}(p_2)\| \leq K \cdot \|p_1 - p_2\|$ 임을 보이기 위해 다음의 보조 정리를 이용한다.

보조정리 1. 함수  $f: D \rightarrow R^m$ 이 도메인  $D \subset R^m$ 에서 연속이고  $\nabla f(x)$ 이 존재한다고 하자. 만약, 어떤 볼록 셋  $X \subset D$ 에서  $\|\nabla f(x)\| \leq K$ 를 만족하는  $K \geq 0$ 가 존재한다면, 아래의 부등식이 성립한다. (증명 [8] 참조)

$$\|f(x_1) - f(x_2)\| \leq K \cdot \|x_1 - x_2\|, \quad \forall x_1, x_2 \in X \quad (16)$$

위의 보조정리를 이용하여  $\|H\|_2 \leq K$ 인  $K \geq 0$ 가 존재함을 보임으로써  $\tilde{\theta}(p)$ 가 Lipschitz continuous함을 증명할 수 있다.  $\tilde{\theta}(p)$ 의 헤시안(Hessian)  $H$ 은 다음과 같다.

$$H_{ll} = \sum_{j \neq l} \frac{2 \cdot \lambda_j^* g_{jj} p_j (g_{jl})^2}{\left( \sum_{m \neq j} g_{mj} p_m + n_j \right)^3} \quad (17)$$

$$H_{li} = \sum_{j \neq l} \frac{2 \cdot \lambda_j^* g_{jj} p_j g_{ji} g_{mi}}{\left( \sum_{m \neq j} g_{mj} p_m + n_j \right)^3} - \frac{\lambda_j^* g_{li} g_{ki}}{\left( \sum_{k \neq l} g_{kl} p_k + n_l \right)^2}, \quad i \neq l \quad (18)$$

각각의  $\lambda^*, g, p$ 의 상한값이 존재하므로,  $\|H\|_2$ 의 상한값 또한 존재한다. 그 값은 아래의 부등식에 의해 추정되어질 수 있다.

$$\|H\|_2 \leq \sqrt{\|H\|_1 \cdot \|H\|_\infty}$$

$\|H\|_1$ 는  $H$ 의 maximum column-sum matrix norm을 나타내며,  $\|H\|_\infty$ 는  $H$ 의 maximum row-sum

matrix norm을 나타낸다. 따라서 알고리즘 (12-15)는 다음과 같은 스텝크기에 의해 지역해로 수렴한다.

$$\epsilon \leq \gamma \leq \frac{2-\epsilon}{K'}$$

$$(K')^2 = \max_i \left( \sum_l \left| \sum_{j \neq l} \frac{2 \cdot \lambda_j^* g_{jj} p_j g_{jl} g_{mi}}{\left( \sum_{m \neq j} g_{mj} p_j + n_j \right)^3} - \frac{\lambda_j^* g_{il} g_{ki}}{\left( \sum_{k \neq l} g_{kl} p_k + n_l \right)^2} \right| + \sum_{j \neq l} \frac{2 \cdot \lambda_j^* g_{jj} p_j (g_{jl})^2}{\left( \sum_{m \neq j} g_{mj} p_j + n_j \right)^3} \right)$$

$$\times \max_l \left( \sum_i \left| \sum_{j \neq l} \frac{2 \cdot \lambda_j^* g_{jj} p_j g_{jl} g_{mi}}{\left( \sum_{m \neq j} g_{mj} p_j + n_j \right)^3} - \frac{\lambda_j^* g_{il} g_{ki}}{\left( \sum_{k \neq l} g_{kl} p_k + n_l \right)^2} \right| + \sum_{j \neq l} \frac{2 \cdot \lambda_j^* g_{jj} p_j (g_{jl})^2}{\left( \sum_{m \neq j} g_{mj} p_j + n_j \right)^3} \right)$$

(19)

VI. 실험 결과

본 논문에서 제시한 알고리즘들의 성능과 수렴여부를 알아보기 위해 Matlab을 사용해 실험하였다. 네트워크 구성은 그림 2와 같다.

세션 rate 갱신 알고리즘 (8-9)는 전송 지연시간에 관계없이 모두 동기화되어 있다고 가정하였다. bit-error-rate (BER)을 계산하기 위해 Gaussian approximation을 가정하였고, 링크의 허용량은 tolerable BER  $10^{-4}$ 와 BPSK modulation을 사용함으로써 다음과 같이 계산하였다.

$$c_l = \frac{W \cdot SINR_l}{2q \log_2 10}$$

$W = 10\text{Mhz}$ ,  $q = 3$ ,  $p_l^{\text{max}} = 0.5\text{mW}$ 로 설정했으며, path gain은  $g_{ij} = d_{ij}^{-2}$ 으로 symmetric하게 구성하였다

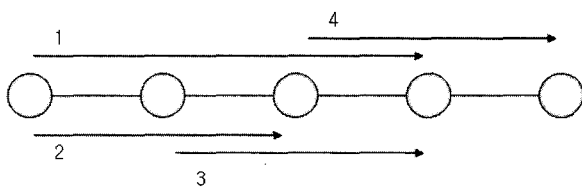


그림 2. 네트워크 구성 예제  
Fig. 2. Network Topology Example.

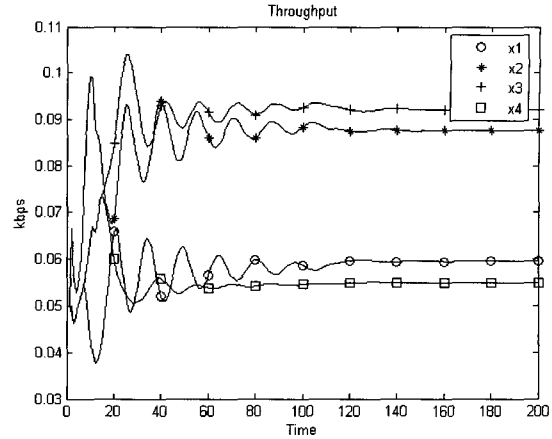


그림 3. 제안된 알고리즘으로 계산된 세션 rate의 시간에 따른 변화  
Fig. 3. Session Rate Trace over Time.

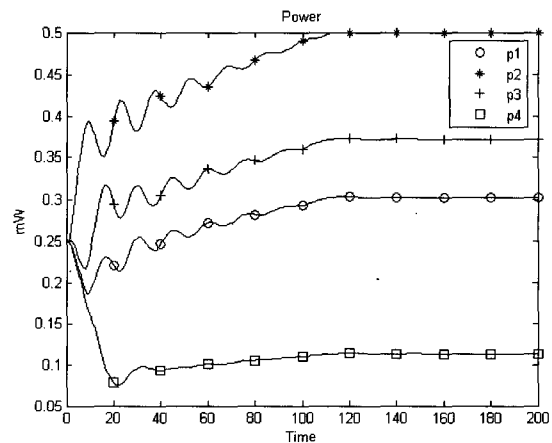


그림 4. 제안된 알고리즘으로 계산된 전송 파워의 시간에 따른 변화  
Fig. 4. Transmission Power Trace over Time.

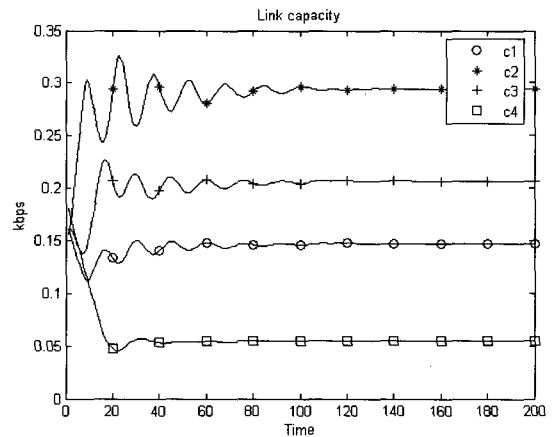


그림 5. 제안된 알고리즘으로 계산된 각 링크들의 허용량의 시간에 따른 변화  
Fig. 5. Link Usage Trace over Time.

( $g_{ij} = g_{ji}$ ). 스텝 사이즈는 각각  $\alpha = 0.05, \gamma = 0.005$  으로 설정하였으며, 최적의 세션 rate을 구한 후 전송 파워를 갱신하도록 하기 위해 각 전송 rate 값들의 변화량이 5% 이하로 계산되어지면 전송 파워를 알고리즘 (12-15)에 따라서 갱신하도록 했다.

그림 3, 4, 5는 각각 세션 rate, 전송 파워, 링크 허용량의 시간에 따른 변화량을 나타내며, 시간이 지남에 따라 수렴하는 것을 관찰했다. 그림 4에서 관찰할 수 있듯이, 링크 2가 다른 링크에 비해서 가장 병목현상이 심하기 때문에 최대 전송 파워를 사용하게 되고, 다른 링크들이 혼잡 정도와 채널 상태에 따라 링크 2의 병목현상을 완화하기 위해 전송 파워를 상대적으로 낮춰주는 형태의 해를 얻게 되었다.

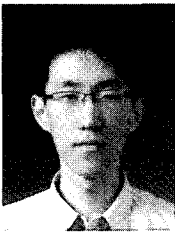
## VII. 결 론

본 논문에서는 낮은 SINR 환경의 CDMA 무선 네트워크상에서 각 단말 세션과 각 링크들의 전송 파워를 최적화 하는 방법에 대해서 연구하였다. 우리의 연구는 기존의 연구 [6]에서 사용된 프레임워크를 따르고 있지만, 기존 연구와 가장 큰 차이점은 링크의 허용량 함수가 오목하지 않은 형태로 표현되었을 때 최적의 해를 구하는 방법에 대해 모색하였다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 실험을 통해 다양한 토폴로지에 대해서 최적의 해로 수렴하는 것을 관찰하였다. 향후에는 본 연구의 결과를 바탕으로 낮은 SINR과 높은 SINR환경 모두에 대해서 적용할 수 있는 알고리즘에 대해 연구할 수 있을 것이라 예상된다.

## 참 고 문 헌

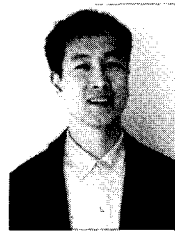
- [1] Frank Kelly and A.K. Maulloo and D.K.H. Tan, "Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability, Journal of the Operational Research Society", vol 49, 1998, 237-252
- [2] Zuyuan Fang and Brahim Bensaou, "Fair Bandwidth Sharing Algorithms based on Game Theory Frameworks for Wireless Ad-hoc Networks," In. Proc. of INFOCOM 2004.
- [3] L. Chen and S. Low and Doyle, "Joint Congestion Control and Media Access Control Design for Ad Hoc Wireless Networks," In Proc. Of INFOCOM 2005.
- [4] Xin Wang and Koushik Kar, "Cross-Layer Rate Optimization in Multi-Hop Aloha Networks," In Proc. of ICC 2005.
- [5] X. Wang and K. Kar, Cross-layer Rate Control in Multi-hop Wireless Networks with Random Access, In IEEE Journal on Selected Areas in Communications, February 2005.
- [6] M. Chiang, "Balancing Transport and Physical Layers in Wireless Multihop Networks: Jointly Optimal Congestion Control and Power Control," In Proc. of ICC 2005.
- [7] Mokhtar S. Bazaraa, *Nonlinear Programming*, Wiley, 1993
- [8] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Third Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2002
- [9] D. P. Bertsekas, J. N. Tsitsiklis, *Parallel and Distributed Computation: Numerical Methods*, Athena Scientific, Belmont, Massachusetts, 1997

저 자 소 개



곽재욱(정회원)  
 2004년 홍익대학교  
 컴퓨터공학과 학사  
 2006년 한국정보통신대학교  
 공학부 석사  
 2006년 현재 시큐아이닷컴  
 정보보호 연구소 연구원

<주관심분야 : Wireless Ad-hoc Networks,  
 Radio Resource Management>



모정훈(정회원)  
 1993년 서울대학교  
 산업공학과 학사  
 1995년 서울대학교  
 산업공학과 석사  
 1998년 버클리 소재 캘리포니아  
 주립대 EECS 석사

1999년 버클리 소재 캘리포니아 주립대  
 EECS/IEOR 박사  
 1999년~2000년 AT&T Labs, NJ, Senior  
 Technical Staff Member  
 2000년~2003년 TeraBlaze(현 Agere), CA,  
 Senior Technical Staff Member  
 2003년 현재 한국정보통신대학교 공학부 조교수  
 <주관심분야 : Flow/Congestion Control, Quality  
 of Service, Wireless Ad-hoc Networks, Radio  
 Resource Management, OFDM, Cellular/WLAN  
 Integration, Network Economics>