

소형 셀 환경에서 유틸리티 최대화를 위한 분산화된 방법의 기지국 전송 전력 제어

이 창 식[°], 김 지 환^{*}, 광 정 호^{*}, 김 은 경^{**}, 정 송^{*}

Distributed BS Transmit Power Control for Utility Maximization in Small-Cell Networks

Changsik Lee[°], Jihwan Kim^{*}, Jeongho Kwak^{*}, Eunkyung Kim^{**}, Song Chong^{*}

요 약

최근 많은 수의 모바일 유저와 과도한 트래픽 증가를 해결하기 위한 솔루션으로 피코 혹은 펌토 셀과 같은 소형 셀을 설치하는 방법이 주목 받고 있다. 그러나 소형 셀에 속한 엣지 유저들은 주변 기지국으로부터 극심한 셀 간 간섭을 받기 때문에 낮은 평균 전송률을 얻게 되고, 이를 해결하기 위해서는 셀 간 간섭을 효과적으로 관리하는 방법이 필요하다. 최근의 많은 연구들은 셀 간 간섭 관리를 위해 기지국의 전송 전력을 제어하는 알고리즘을 제시하였지만, 제시된 방법들은 높은 복잡도를 가지고 중앙 기지국의 도움을 필요로 한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 기지국간의 경쟁을 기반으로 하여, 낮은 복잡도를 가지는 분산화된 방법의 기지국 전송 전력 on/off 제어 및 유저 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해, 제안하는 방법이 셀 간 간섭 관리를 하지 않는 방법에 비해 셀 엣지 유저의 경우 170%의 성능 개선을 보이고, 최적의 알고리즘과 비교했을 때 88-96%에 달하는 geometric average throughput (GAT) 성능 및 매우 근접한 average edge user throughput (AET) 성능을 보임을 검증한다.

Key Words : Small-cell, Edge user, Inter-cell interference, On/Off control, Distributed

ABSTRACT

Small cells such as pico or femto cells are promising as a solution to cope with higher traffic explosion and the large number of users. However, the users within small cells are likely to suffer severe inter-cell interference (ICI) from neighboring base stations (BSs). To tackle this, several papers suggest BS transmit power on/off control algorithms which increase edge user throughput. However, these algorithms require centralized coordinator and have high computational complexity. This paper makes a contribution towards presenting fully distributed and low complex joint BS on/off control and user scheduling algorithm (FDA) by selecting on/off pattern of BSs. Throughput the extensive simulations, we verify the performance of our algorithm as follows: (i) Our FDA provides better throughput performance of cell edge users by 170% than the algorithm without the ICI management. (ii) Our FDA catches up with the performance of optimal algorithm by 88-96% in geometric average throughput and sufficiently small gap in edge user throughput.

[°] First and Corresponding Author : KAIST 전기 및 전자공학과 네트워크시스템 연구실, cslee@netsys.kaist.ac.kr, 학생회원

^{*} KAIST 전기 및 전자공학과 네트워크시스템 연구실, {kimji, jh.kwak}@netsys.kaist.ac.kr, songchong@kaist.edu

^{**} Electronics and Telecommunications Research Institute, ekkim@etri.re.kr

논문번호 : KICS2013-10-458, 접수일자 : 2013년 10월 21일, 심사일자 : 2013년 12월 13일, 최종논문접수일자 : 2013년 12월 19일

I. 서 론

최근 셀룰러 네트워크에서 모바일 유저 수의 증가뿐만 아니라 고화질 멀티미디어 비디오와 같이 높은 데이터 전송률을 요구하는 어플리케이션이 급증하고 있고, 이러한 요구를 수용하기 위한 해결책으로 피코 혹은 펌토 셀과 같은 소형 셀을 밀집시켜 설치하는 방법이 주목 받고 있다. 소형 셀은 낮은 전송 전력과 설치 비용으로 공간을 재활용함으로써, 네트워크 성능을 증가시킬 수 있다는 장점이 있다¹¹. 하지만, 셀 크기가 작아지고 셀의 수가 많아짐에 따라 셀 외곽에 위치한 엣지 유저의 수가 증가하게 되고, 이러한 유저들은 다른 유저들에 비해 주변 기지국으로부터의 거리가 상대적으로 가깝기 때문에 극심한 셀 간 간섭 (ICI)을 받게 된다. 그러므로 소형 셀 네트워크에서 셀 엣지 유저의 성능 개선뿐만 아니라, 네트워크 전체의 유틸리티 최대화를 위해서는 셀 간 간섭을 적절히 관리하는 방법이 필요하다. 현재까지 셀 간 간섭을 관리하기 위한 방법으로는 기지국 전송 전력 제어¹²⁻⁵¹, 사용자 수 분배^{6,7}, 셀 분할^{18,91} 등의 관련 연구가 진행 되어 왔다.

본 연구에서는 셀 간 간섭을 줄이기 위해 기지국의 전송 전력을 적응적으로 on/off 하는 방법에 대해 제안한다. 각 기지국이 전송 전력을 0 또는 최대값으로만 결정하는 on/off 전송 전력 제어 방법은, 멀티-셀 네트워크에서 낮은 SINR 영역의 경우에 최적의 전력 제어 방법으로 알려져 있다³¹. 이에 기초하여, 이전 연구^{4,51}에서는 기지국의 전송 전력 on/off 와 유저 스케줄링을 결합하여 결정함으로써 네트워크 유틸리티 최대화를 달성하고자 하는 알고리즘을 제시하였다. 하지만, 이러한 알고리즘들은 네트워크 전체를 관리하는 중앙 기지국이 필요할 뿐만 아니라, 매 순간마다 전체 유저들의 채널 정보를 요구하고, 가능한 모든 조합의 기지국 on/off 상태 (on/off 패턴)를 고려하여야 하므로 높은 계산 복잡도를 가지게 된다. 따라서 이러한 중앙 집권적 알고리즘이 실제로 잘 동작하기 위해서는 높은 캐패시티와 낮은 딜레이를 가지는 이상적인 유선 백홀망을 필요로 하지만, 소형 셀 네트워크 환경에서 이러한 유선 백홀망 요구사항을 충족시키는 것은 한계가 있다. 2011년에 Son⁴¹은 중앙 기지국의 계산 복잡도와 기지국으로부터의 피드백 오버헤드를 줄이기 위해 기지국 on/off-패턴의 비율을 간헐적으로 결정함으로써 셀 간 간섭을 관리하는 알고리즘을 제시하였다. 또한, 가능한 전체 on/off 패턴 대신 일부분의 패턴만을 고려하여 복잡도를 줄이고자 하였다. 하지만, 이러한 방법에도 불구하고 제시된 알고리즘은 여전히

네트워크 전체를 관리하는 중앙 기지국을 필요로 하고 높은 계산 복잡도와 신호 전달 오버헤드를 가진다는 단점을 가지고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 중앙 기지국의 도움 없이 분산화된 방법으로 각 기지국이 자신의 전송 전력 on/off를 결정하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 기지국 간 경쟁에 기반을 두고 있는 방법으로써, on/off 결정을 위한 별도의 경쟁 구간에서 기지국들은 주변 기지국과의 경쟁을 통하여 자신의 전송 전력 on/off를 결정하게 된다. 본 연구에서는 경쟁 구간에서 기지국들의 동작 방법을 디자인을 함으로써, 최적의 on/off 패턴을 찾는 방법을 제안한다.

제안하는 경쟁 방법은 무선 랜에서 잘 알려진 랜덤 액세스 방법인 carrier sensing medium access (CSMA) 와 유사하게 동작하지만¹¹⁰⁻¹³¹, 셀룰러 네트워크 환경에서 CSMA를 적용하여 기지국 전송 전력을 조절할 뿐만 아니라, 각 기지국의 유저 스케줄링까지 고려했다는 점에서 제안하는 방법의 차별성이 있다. 또한, 시뮬레이션을 통해 셀 간 간섭을 고려하지 않은 경우에 비해 뛰어난 성능 개선을 보이고, 중앙 집권적 방법으로 기지국들의 전송 전력을 결정하는 방법에 매우 근접하는 성능을 보임을 검증한다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. 2단원에서는 전반적인 시스템 모델에 대해서 설명한다. 3단원에서는 본 연구에서 해결하고자 하는 문제를 제시하고, 그 문제를 푸는 최적의 알고리즘에 대한 요약을 한다. 4단원에서는 본 연구에서 제안하는 방법에 대해 상세히 설명하며, 5단원에서는 여러 알고리즘의 성능에 대한 시뮬레이션 결과를 통하여, 제안하는 방법의 우수성에 대해 검증한다. 끝으로 6단원에서는 본 논문의 내용 및 결과를 요약한다.

II. 시스템 모델

2.1. 네트워크 & 링크 모델

본 연구는 각 소형 셀들이 하나의 공통된 주파수 대역에서 동작하고, 타임 슬롯이 나뉘어져 있는 환경에서 하향 링크의 경우를 고려한다. 각 기지국마다의 유저 할당은 주어져 있다고 가정하고, 각 유저는 오직 하나의 기지국으로부터만 데이터 전송을 받는다. 또한, 모든 기지국은 자신에게 속한 유저들에게 전송 할 데이터를 항상 가지고 있는 상황을 고려하며, 기지국은 각 타임 슬롯 $t = 1, 2, \dots$ 마다 오직 한 명의 유저만

서비스 할 수 있다고 가정한다. $\Phi = \{1, \dots, M\}$ 과 $\Psi = \{1, \dots, N\}$ 을 각각 기지국과 모바일 유저의 집합으로 표현한다. 또한, $\Psi_m \subset \Psi$ 를 기지국 m 에 속한 유저의 집합으로 정의하고, $m_n \in \Phi$ 를 유저 n 이 속한 기지국으로 정의한다. $G_{n,m}$ 는 기지국 m 과 유저 n 사이의 채널 값을 나타낸다. 각각의 기지국과 유저 사이의 채널 값은 시간에 따라 변하는 값으로써, 본 연구에서는 log-normal shadowing과 거리에 따른 손실을 고려한다. 특히, 한 타임 슬롯 간격 동안은 채널이 변하지 않는다고 가정한다. 각 유저는 자신이 속해 있는 기지국에게 채널 정보를 각 타임 슬롯마다 피드백 해주게 된다.

2.2. 무선 자원 모델

본 논문에서는 모든 기지국의 전송 전력 on/off 패턴을 $x = \{0, P_{\max}\}^{|\Phi|}$ 로 표현하고, 전체 가능한 패턴의 집합을 χ 로 표현한다. 만약, 기지국 m 이 자신의 전송 전력을 켜다면, 패턴 x 의 m 번째 값은 P_{\max} 가 되고, 전송 전력을 끈다면 0이 된다. 또한, 패턴 x 상태에서 기지국 m 의 전송 전력이 ON일 경우에, 패턴 x 가 기지국 m 을 "활성화 시킨다"고 정의하고, 패턴 x 의 경우에 활성화된 기지국의 집합을 $\Phi_x \subset \Phi$ 이라고 표현한다.

매 타임 슬롯 t 에서 유저 스케줄링 지표를 $I_n(t)$ 으로 표현하고, 만약 유저 n 이 스케줄 되었을 경우 $I_n(t) = 1$, 그렇지 않을 경우 $I_n(t) = 0$ 이 된다. 앞서 가정에서 매 타임 슬롯마다 오직 한 명의 유저만 스케줄링 될 수 있다고 하였기 때문에, 각 패턴 x 하에서 다음과 같은 유저 스케줄링 제약을 가진다.

$$\sum_{n \in \Psi_m} I_n(t) = \begin{cases} 1, & m \in \Phi_x \\ 0, & otherwise. \end{cases} \quad (1)$$

패턴 x 가 주어진 경우, 타임 슬롯 t 에서 스케줄된 유저 n 이 받는 signal to interference-plus noise ratio (SINR) 값은 다음과 같이 계산된다.

$$SINR_{n,x}(t) = \begin{cases} \frac{G_{n,m_n}(t)P_{\max}}{N_0W + \sum_{m \in \Phi_x, m \neq m_n} G_{n,m}(t)P_{\max}}, & \text{if } m_n \in \Phi_x, \\ 0, & otherwise. \end{cases} \quad (2)$$

위의 식에서 N_0 는 noise spectral density를 의

미하며, 유저 n 은 오직 패턴 x 하에서 활성화된 기지국들로부터만 간섭을 받게 된다. Shannon의 공식에 의해 타임 슬롯 t 에서 유저 n 이 받는 데이터 전송률 $r_{n,x}(t)$ 는 다음과 같이 계산 된다.

$$r_{n,x}(t) = W \log_2 \left(1 + \frac{1}{\gamma} SINR_{n,x}(t) \right) \quad (3)$$

W 와 γ 는 각각 시스템 대역폭과 이상적인 Shannon의 캐패시티 공식을 보정해 주는 SINR gap to capacity^[14]를 나타낸다. 위의 식을 통해, 패턴 x 하에서 전송 전력이 꺼져있는 기지국에 속한 유저들은 어떠한 서비스도 받을 수 없게 되는 것을 알 수 있다. 또한, $r_{n,x}(t)$ 는 유저 n 이 타임 슬롯 t 에서 스케줄 되었을 때 실제로 받을 수 있는 데이터 전송률을 의미하므로, 만약 유저 n 이외의 다른 유저가 스케줄 될 경우에 유저 n 이 받는 실제 데이터 전송률은 0이 된다.

III. 문제 정의 및 최적의 알고리즘

본 단원에서는 네트워크 최적화 문제를 세우고, 이를 해결하는 위한 최적의 기지국 전송 전력 on/off 및 유저 스케줄링 방법에 대해 살펴본다. 우선, 다음과 같은 long-term 네트워크 유틸리티를 최대화하는 최적화 문제를 세울 수 있다.

$$\max_{\bar{\mathbf{R}}} \sum_{n \in \Psi} U(\bar{R}_n) \quad s.t. \quad \bar{\mathbf{R}} \in \Gamma \quad (4)$$

$\bar{\mathbf{R}} = (\bar{R}_n, n \in \Psi)$ 은 모든 유저의 long-term 평균 전송률에 대한 벡터로 표현되고, Γ 은 평균 전송률의 영역을 의미한다. 또한, long-term 유틸리티 함수 $U(\cdot)$ 은 연속 미분 가능하고, 절대적으로 증가하는 성질을 가지는 concave 함수이다. 본 논문에서는 다음과 같이 정의되는 일반적인 유틸리티 함수를 고려한다^[15].

$$U(\bar{R}_n) = \begin{cases} \log \bar{R}_n, & \text{if } \alpha = 1, \\ (1 - \alpha)^{-1} \bar{R}_n^{1 - \alpha}, & otherwise. \end{cases} \quad (5)$$

위의 식에서 α 는 유저 간 공평성과 효율성 사이의 상관관계를 조절하는 변수이다.

본 연구에서는 매 타임 슬롯마다 기지국들의 전송 전력 on/off 및 유저 스케줄링을 결정하는 알고리즘

을 제안하고자, (4) 식으로 정의된 long-term 유틸리티 최대화 문제에 stochastic gradient 기반의 알고리즘¹⁶⁾을 적용하였다. 그 결과, 다음과 같은 최적화 문제를 매 타임 슬롯마다 풀으로써, (4) 식의 문제에 대한 최적의 솔루션으로 asymptotic하게 근접할 수 있다.

$$\max_{x(t), I(t)} \sum_{n \in \Psi} U'(\bar{R}_n(t-1))r_n(t) \quad (6)$$

$r_n(t)$ 는 슬롯 t 에서 유저 n 이 받는 실제 데이터 전송률을 의미한다. 또한, \bar{R}_n 은 유저 n 의 슬롯 t 까지 long-term 평균 전송률을 의미하며, 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \bar{R}_n(t) &= \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t r_n(\tau) \\ &= \bar{R}_n(t-1) + \frac{1}{t} [r_n(t) - \bar{R}_n(t-1)] \end{aligned} \quad (7)$$

그러나 식 (6)의 최적화 문제에 대해서 최적의 솔루션을 얻기 위해서는 가능한 모든 on/off 패턴에 대해서, 기지국들의 모든 유저 스케줄링의 조합을 고려하여야 하기 때문에, $O((2^M - 1) \cdot \prod_m |\Psi_m|)$

에 해당하는 매우 높은 계산 복잡도를 요구한다.

이러한 exhaustive한 방법으로부터의 계산 복잡도를 줄이기 위해 Son¹⁴⁾은 임의의 어떠한 전송 전력 하에서도 식 (6)이 각각의 독립적인 셀 내의 최적화 문제로 분할될 수 있다는 것을 보였다. 다시 말해, 임의의 패턴이 결정된 상태에서 각 기지국이 독립적으로 유저 스케줄링을 함으로써 최적의 솔루션을 얻을 수 있게 된다. 이러한 특성에 기초하여, 다음과 같은 최적의 패턴 결정 및 유저 스케줄링 알고리즘을 얻게 된다. 각 패턴 x 에 대해서 각 기지국들이 가장 높은 $U'(\bar{R}_n(t-1))r_{n,x}(t)$ 값을 가지는 유저를 선택하였을 때, 중앙 기지국에서는 선택된 유저들의 $U'(\bar{R}_n(t-1))r_{n,x}(t)$ 값의 합을 최대화하는 최적의 패턴 $x^*(t)$ 를 찾고, 최적의 패턴 $x^*(t)$ 하에서 각 기지국들은 베스트 유저를 스케줄링 하게 된다.

최적의 패턴 결정 및 유저 스케줄링

$$x^*(t) = \operatorname{argmax}_{x \in \mathcal{X}} \sum_{m \in \Phi_x} \max_{n \in \Psi_m} U'(\bar{R}_n(t-1))r_{n,x}(t), \quad (8)$$

$$n_m^*(t) = \operatorname{argmax}_{n \in \Psi_m} U'(\bar{R}_n(t-1))r_{n,x^*(t)}, \quad \forall m \in \Phi_x \quad (9)$$

비록 위와 같은 최적의 알고리즘의 계산 복잡도가 $O((2^M - 1) \cdot \sum_m |\Psi_m|)$ 로 줄어들지만, 매 타임 슬롯마다 모든 가능한 패턴을 비교하기 위해서는 여전히 중앙 기지국에서 모든 유저의 채널 정보를 필요로 한다. 따라서 각 기지국은 매 타임 슬롯마다 중앙 기지국에게 자신에게 할당된 유저들의 채널 정보를 알려 주어야 하며, 이를 위해서는 높은 캐패시티와 낮은 딜레이를 가지는 이상적인 유선 백홀망이 필요로 한다. 하지만, 이러한 유선 백홀망은 펨토셀과 같은 소형 셀에는 적절히 갖추어 지지 않는다는 문제점이 있다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 각 기지국이 중앙 기지국의 도움 없이 스스로 적절한 전송 전력 on/off를 결정하도록 하는 방법이 필요하다.

IV. 제안 방식

본 단원에서는 매우 낮은 복잡도를 가지는 분산화된 방법으로 기지국의 전송 전력 on/off를 결정하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법에서 각 기지국은 오직 할당된 유저들의 정보 (채널 정보, 평균 전송률)와 주변 기지국으로부터의 간섭에 대한 정보만을 가지고 주변 기지국과의 경쟁을 통해 자신의 전송 전력 on/off를 결정한다.

4.1. 알고리즘 동작 설명

그림 1은 본 연구에서 제안하는 기지국 전송 전력 on/off 컨트롤 및 유저 스케줄링 방법의 프레임 구조를 나타낸다. 기본 프레임은 경쟁 구간과 데이터 전송 구간인 유저 스케줄링 슬롯들로 구성되며, 경쟁 구간은 대기 시간 슬롯들로 구성된다. 본 연구에서는 경쟁 구간으로 인한 오버헤드를 줄이기 위해 유저 스케줄링 슬롯을 긴 타임 스케일 (T)로 그룹화하고, T 슬롯 마다 경쟁 구간이 나타나도록 하였

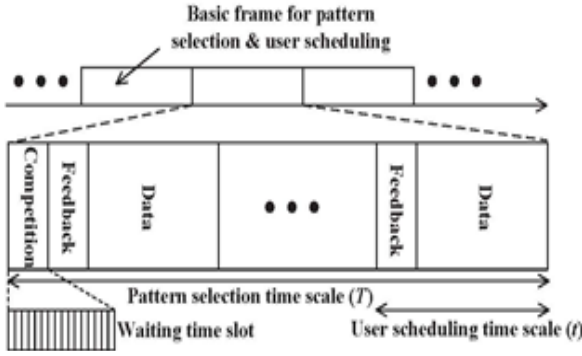


그림 1. 제안 방법의 프레임 구조
Fig. 1. Frame structure of proposed scheme

다. 따라서 각 기지국은 T 를 주기로 주변 기지국과의 경쟁을 통해 전송 전력 on/off를 결정하게 되고, 반면 유저 스케줄링은 매 타임 슬롯 (t)마다 시행된다. 유저 스케줄링을 위해 각 유저들은 매 타임 슬롯마다 해당 기지국에게 채널 정보와 자신의 평균 전송률에 대한 정보를 피드백 해주며, 이를 통해 기지국에서는 최적의 유저를 스케줄링 하게 된다. 제안하는 경쟁구조는 다음의 두 동작으로 구성된다. (i) 기지국 대기시간 선택: 각 기지국의 대기 시간은 기지국이 자신의 전송 전력을 결정하는 것에 대한 우선순위를 의미한다. 예를 들어, 낮은 대기 시간을 갖는 기지국일수록 전송 전력을 결정하는데 있어서 더 높은 우선순위를 가지게 된다. (ii) 주변 기지국으로부터 받는 간섭을 추정: 경쟁 과정에서 승리한 기지국은 주변 기지국들에게 “기준 신호”를 전송하게 되고, 다른 기지국들은 기준 신호의 세기를 통해 간섭의 양을 측정할 수 있다.

본 연구에서는, 기지국들의 전송 전력 결정에 있어서 “간섭 임계 값” 라는 변수를 고려한다. 대기 시간 이후, 자신의 전송 전력 on/off를 결정할 순서가 된 기지국은 주변 기지국으로부터 받는 간섭의 합을 측정한 뒤, 간섭 임계값과 비교를 통해 전송 전력 on/off를 결정하게 된다. 측정한 간섭의 합이 임계값보다 크다는 것은 자신에게 할당된 유저들이 받는 간섭의 양이 크다는 의미이므로, 이 경우 자신의 전송 전력을 켜서 유저들이 얻는 이득은 적다고 볼 수 있다. 따라서, 기지국은 측정한 간섭의 합이 임계값보다 적을 경우에만 전송 전력을 켜므로써 불필요한무선 자원 낭비를 줄이고, 유저들이 받는 실제 데이터 전송률 또한 높일 수 있도록 동작한다.

그림 2는 제안하는 경쟁 프로토콜에 대한 흐름도를 보여준다. 본 논문에서는 $\tilde{\mu}_m$ 와 μ_m 을 각각 기지

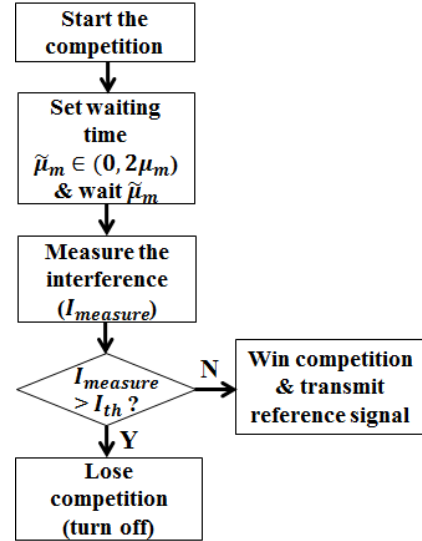


그림 2. 기지국 간 경쟁 프로토콜
Fig. 2. Competition protocol

국 m 의 선택 대기시간과 평균 대기시간으로 표기하며, 경쟁이 시작되면 각 기지국은 0 과 $2\mu_m$ 값 사이에서 임의로 각자의 대기시간 $\tilde{\mu}_m$ 을 결정한다. 각자의 대기시간 동안 기다린 후, 자신의 전송 전력 on/off를 결정할 순서가 된 기지국은, 이미 경쟁에서 승리한 주변 기지국들이 보내는 기준 신호의 세기 합을 측정한 뒤 간섭 임계값과 비교를 하고, 측정된 간섭의 합이 임계값보다 작을 경우에만 기준 신호를 주변 기지국들에게 전송함으로써, 다른 기지국들이 자신으로부터의 간섭을 측정할 수 있도록 동작한다. 모든 기지국의 on/off 결정과 경쟁 구간이 끝나면, 오직 승리한 기지국들만 최종적으로 자신의 전송 전력을 켜게 되고, 이로써 기지국 전송 전력 on/off 패턴을 얻게 된다.

그림 3은 기지국 전송 전력 on/off 제어에 대한 간단한 예제를 보여준다. 두 개의 기지국이 서로의 간섭 영역 내에서 근접하여 존재할 때, 전체 가능한 on/off 패턴은 3개의 경우로 나누어진다 (모든 기지국이 off하는 경우는 제외). 두 기지국은 같은 크기의 간섭 임계값을 가지며, 이 값은 이웃 기지국으로부터의 간섭 크기보다 작다고 가정한다. 또한, 기지국 1의 대기 시간이 기지국 2의 대기 시간보다 작은 경우를 고려한다. 따라서, 기지국 1이 자신의 전송 전력을 결정할 우선권을 먼저 얻는다. 기지국 1은 이웃 기지국으로부터 받는 간섭이 없으므로, 전송 전력을 켜는 결정을 내린다. 반면, 기지국2는 자신의 대기시간이 지났을 때 기지국 1로부터 임계

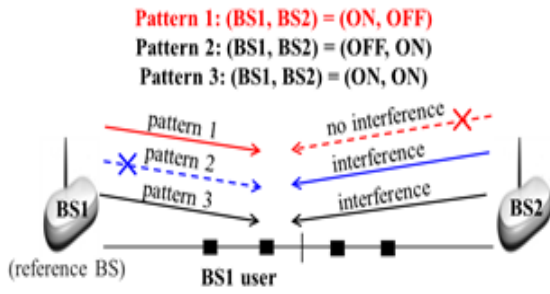


그림 3. 두 개의 기지국 네트워크 예제
Fig. 3. Example of a linear two-BS network

값보다 큰 간섭을 받기 때문에, 이 경우 만약 기지국 2가 자신의 전송 전력을 켜게 되면 자신에게 할당된 유저, 특히 엡지 유저들은 극심한 ICI로 인해 낮은 데이터 전송률을 받게 된다. 이는 불필요한 무선 자원의 낭비가 되기 때문에 기지국 2는 자신의 전송 전력을 끄는 것이 합리적인 결정이며, 이 예제에서 최종적인 기지국 전송 전력 on/off 패턴은 (ON, OFF) 가 된다. 이 예제에서 볼 수 있듯이, 기지국들의 대기시간과 간섭 임계값은 기지국들의 전송 전력 on/off 패턴을 결정하는 주요 변수가 된다. 따라서, 최적의 on/off 패턴을 얻기 위해서는 이러한 변수들에 대한 신중한 결정이 필요하다.

4.2. 평균 대기시간 결정 및 유저 스케줄링

본 하위 단원에서는 식 (6)의 솔루션을 찾기 위한, 평균 대기시간과 유저 스케줄링 알고리즘에 대해 설명한다. 평균 대기시간 계산에 앞서, 본 연구에서는 $\bar{r}_n(t)$ 를 정의하고, 이는 유저 n 의 서비스 기지국이 자신의 전송 전력을 켜었을 때, 유저들이 받게 되는 평균 순간 전송률을 의미한다. 식 (6)은 네트워크 전체 유저의 가중된 데이터 전송률의 합으로 표현되는 식이지만, 이전 슬롯까지의 $\bar{r}_n(t-1)$ 값을 이용하여 각 셀마다 할당된 유저 집합에 대한 독립적인 식으로 분할될 수 있다. 각 기지국에서는 이러한 셀-독립적인 부분을 최대화하기 위해 동작하며, 이로써 전체 식 (6)의 솔루션에 근접할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 셀-독립적인 수식 부분을 셀-가중치로 정의하며, 기지국 m 의 셀-가중치를 w_m 으로 표현한다. 따라서, 각 기지국의 셀-가중치는 할당된 유저들의 가중된 데이터 전송률의 합으로 표현되며, 이 때 데이터 전송률은 해당 기지국이 전송 전력을 켜었을 때 유저가 받는 평균적인 순간 전송률을 의미한다.

셀-가중치와 대기 시간은 긴 타임 스케일 (T)마다 결정되는 값이며, 셀-가중치를 기반으로 각 기지국의 대기 시간이 결정된다. 즉, 셀-가중치가 높은 기지국일수록 짧은 대기 시간을 가지게 된다. 또한, 경쟁을 통해 얻은 패턴 하에서 오직 활성화된 기지국들은 다음 경쟁 시까지 매 데이터 전송 슬롯마다 다음과 같이 유저 스케줄링을 실시한다.

평균 대기 시간 결정

At each time slot $t = kT(k = 1, 2, \dots)$, compute ω_m and μ_m as follows:

$$w_m(t) = \sum_{n \in \Psi_m} U'(\bar{R}_n(t-1))\bar{r}_n(t-1), \quad (10)$$

$$\mu_m(t) = e^{-Bw_m(t)}, \quad (11)$$

where B is positive constant value.

유저 스케줄링 알고리즘

Given pattern x , only activated BSs select the best user at each time slot t :

$$n_m^*(t) = \operatorname{argmax}_{n \in \Psi_m} U'(\bar{R}_n(t-1))r_{n,x}(t), \quad \forall m \in \Phi_x \quad (12)$$

평균 전송률 및 평균 순간 전송률 업데이트

$\bar{R}_n(t)$ and $\bar{r}_n(t)$ of user n is updated at every time slot t :

$$\bar{R}_n = (1 - \beta_1)\bar{R}_n(t-1) + \beta_1 I_n(t)r_{n,x}(t), \quad (13)$$

$$\bar{r}_n = \begin{cases} (1 - \beta_2)\bar{r}_n(t-1) + \beta_2 r_{n,x}(t), & \text{if } m_n \in \Phi_x, \\ \bar{r}_n(t-1), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (14)$$

where β_1 and β_2 are positive constant values.

식 (13) 과 (14)에서 볼 수 있듯이, $\bar{R}_n(t)$ 와 $\bar{r}_n(t)$ 는 각각 $I_n(t)r_{n,x}(t)$ 와 $r_{n,x}(t)$ 의 long-term 평균으로 표현된다.

4.3. 간섭 임계 값 결정

본 연구에서는 셀 간 간섭이 심한 환경에서 기지국이 활성화 되는 것을 제한하기 위해 경쟁 프로토콜에 간섭 임계값을 적용하였다. 하지만, 임계값에 따라 경쟁으로 인한 on/off 패턴은 달라지며, 적절하지 않은 간섭 임계값의 설정은 오히려 불필요한 무선 자원 낭비를 야기한다. 예를 들어, 너무 낮은 간섭 임계값은 기지국이 전송 전력을 켜도 되는 상황임에도 불구하고 불필요하게 끄도록 만들기 때문에 유저들이 높은 전송률을 얻을 수 있는 기회를 박탈시키게 되고, 반대로 너무 높은 간섭 임계값은 셀 간 간섭 관리를 위해 전송 전력을 꺼야 되는 상황에서 무리하게 기지국을 켜게 만듦으로써 기지국이 전송 전력을 켜어도 불구하고 유저들은 낮은 전송률을 받게 된다. 다시 말해, 각 기지국이 켜지게 되는 시간 비율과 기지국이 켜졌을 때 스케줄링 되는 유저가 받는 전송률 사이에는 상관관계가 존재하게 되고, 기지국이 전송 파워를 켜줄 때 유저가 받지 못하게 되는 전송률을 보상하기 위해서는 기지국이 낮은 간섭 상황에서 켜므로써, 유저들에게 높은 전송률을 제공해 주어야 한다는 직관을 얻을 수 있다. 따라서, 이러한 요구사항을 만족 시킬 수 있는 적절한 간섭 임계값을 찾는 방법이 요구되며, 본 연구에서는 앞서 언급한 예제를 통하여 두 개의 기지국이 있는 상황에서 적절한 간섭 임계값을 구하는 휴리스틱 방법을 제안한다.

그림 3의 예제와 같이 두 개의 기지국 서로 간섭을 미치는 상황이고 총 3개의 가능한 패턴이 있을 때, 기지국 1에 속한 임의의 옛지 유저 \bar{n} 을 고려한다. 이 경우, 패턴 1과 패턴 3에서 유저 \bar{n} 이 받는 전송률은 각각 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$r_{\bar{n},1}(t) = W \log_2 \left(1 + \frac{1}{\gamma} SNR_{\bar{n},1}(t) \right) \quad (15)$$

$$r_{\bar{n},3}(t) = W \log_2 \left(1 + \frac{1}{\gamma} SINR_{\bar{n},3}(t) \right) \quad (16)$$

패턴 1에서 유저 \bar{n} 은 기지국 2로부터 아무런 간섭도 받지 않으므로, SINR 대신 SNR 값으로 전송률이 계산된다. 일반적으로 각 기지국이 1/2의 확률로써 자신의 전송 전력을 켜거나 끈다고 가정하게 되면, 위의 직관으로부터 유저 \bar{n} 이 1/2의 시간 비율로써 기지국 1로부터 받는 전송률은, 두 기지국이 항상 전송 전력을 켜줄 때에 받을 수 있는 전송률보

다는 적어도 크거나 같아야 하므로 아래와 같은 식을 얻을 수 있고, 이를 만족하는 간섭 값 (I)를 간섭 임계값으로 설정하게 된다.

$$\frac{1}{2} r_{\bar{n},1}(t) = r_{\bar{n},3}(t) \quad (17)$$

하지만, 위의 식을 통해 결정된 값은 임의의 옛지 유저를 기준 결정된 값이므로, 유저들이 기지국과 근접하여 분포하여 옛지 유저가 적은 환경에서는 적절하지 않은 결과를 초래할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 기지국이 두 개의 간섭 임계 값 (I_{high} 와 I_{low})을 가지고 경쟁에 참여하는 방법을 제안한다. I_{high} 값은 임의의 큰 값으로써, 주변 모든 기지국들이 전송 전력을 켜줄 때 받는 간섭의 합보다 큰 값으로 설정하고, I_{low} 은 식 (17)에 의해 구하며, 각 기지국은 두 개의 간섭 임계 값 중 하나의 값을 적응적으로 선택하여 자신의 전송 전력을 결정한다. 예를 들어, 만약 기지국 1의 유저들이 셀 중앙에 집중하여 분포해 있다면, 이들은 상대적으로 적은 ICI를 받기 때문에 기지국 1가 전송 전력을 끄는 것은 불필요한 결정이 될 수 있다. 따라서 기지국 1는 I_{high} 값으로 임계값을 선택하여, 자신의 전송 전력을 켜는 결정을 하게 되고, 이로써 유저들의 분포 상황을 고려하여 최적의 on/off 패턴을 찾을 수 있게 된다. 다음 단원에서는 시뮬레이션을 통해 두 개의 임계값을 적용함으로써 얻게 되는 성능 효과를 검증한다.

V. 시뮬레이션

5.1. 시뮬레이션 환경

본 시뮬레이션에서는 육각 형태를 가지는 7개의 소형 셀 네트워크를 고려하였다. 각 소형 셀 기지국 사이의 거리는 60m이며, wrap-around 모델을 적용하여 네트워크를 구성하였다. 무선 채널 모델은 8dB 편차를 가지는 랜덤 shadowing 과 거리 손실 모델 ($-16.62 - 37.6 \log_{10} d[m]$)을 고려하였고, 그 외의 변수들과 채널 모델은 기존의 연구에서 사용된 값을 활용하였다^[17,18]. 또한, 각 기지국의 최대 전송 전력과 대역폭은 각각 2W 와 10MHz로 설정하였고, 각 기지국은 6명의 할당된 유저를 가지고 있으며, 모든 유저는 로그형태의 유틸리티 함수 ($\log \bar{R}_n$)를 가진다고 가정하였다. 대기 시간 변수 B 와 타임 스케일 T

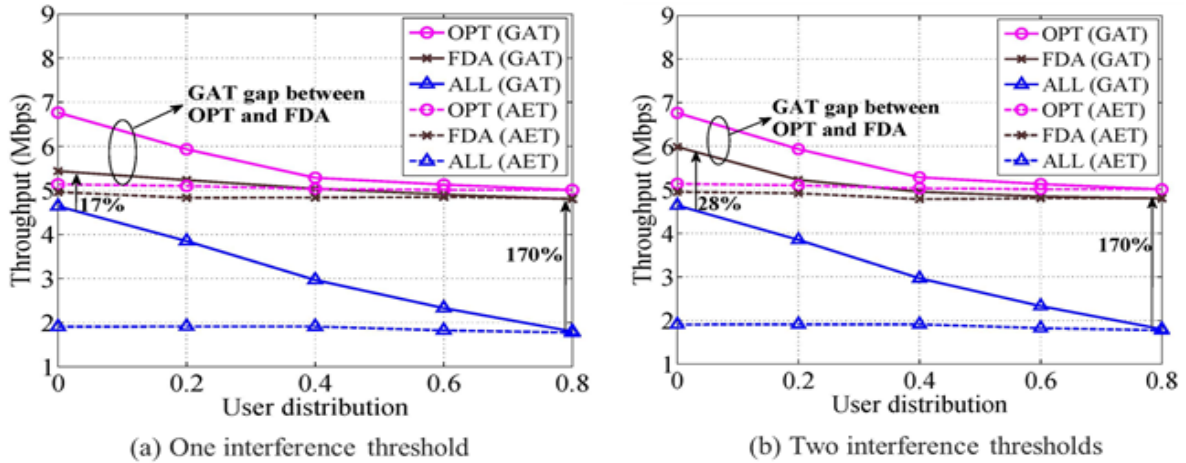


그림 4. OPT, FDA, ALL 알고리즘의 성능 비교
 Fig. 4. Performance comparison of four algorithms : optimal algorithm (OPT), proposed fully distributed algorithm (FDA) and always on algorithm (ALL).

는 각각 0.05 와 10으로 설정하였으며, 그 외의 변수 β_1 와 β_2 는 충분히 작은 값으로 설정하였다 ($\beta_1 = \beta_2 = 0.001$). 초기 슬롯 ($t=1$)에서는, 모든 기지국이 전송 전력을 켜 상태로 유저들의 데이터 전송률과 평균 전송률을 초기화한다. 시뮬레이션은 8000 타임 슬롯 동안 실행되었다.

본 연구에서는 다양한 유저 분포 환경을 고려하기 위해 “유저 분포치” $\rho \in [0, 1]$ 의 개념을 정의한다. ρ 는 유저와 해당 기지국 사이의 최소 거리를 제한하는 값으로써, $\rho \times$ (기지국 반경) 의 값으로 최소 거리가 정해진다. 예를 들어 $\rho = 0.5$ 일 경우, 유저들은 기지국 반경의 중간 지점부터 외곽 영역까지 균일하게 분포하게 된다. 또한, ρ 값이 1에 가까울수록 유저들은 셀 엣지 영역에 분포하게 된다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 다양한 ρ 값에 따른 성능 변화를 검토한다.

시뮬레이션 성능 검증 시, 본 논문에서 제안하는 알고리즘 (FDA)과 다음 두 알고리즘의 성능을 비교 하였다: 1) 모든 기지국이 항상 전송 전력을 켜는 알고리즘 (ALL), 2) 3단원에서 소개된 최적의 알고리즘 (OPT). 본 논문에서는 성능 지표로써 geometric average throughput (GAT) 와 average edge user throughput (AET)를 사용하였다. 이러한 성능 지표는 다음과 같은 점에서 중요한 지표가 된다: 1) GAT를 최대화 하는 것이 네트워크 유틸리티의 합을 최대화 하는 것과 같은 형태가 된다, 2) 엣지 유저의 성능을 개선하는 것은 소형 셀 네트워크의 주요 목표로 삼고 있는 부분이

다. 본 논문에서는 해당 기지국으로부터 24m 이상 떨어져 있는 유저를 엣지 유저로 정의한다.

5.2. 시뮬레이션 결과

그림 4는 유저 분포를 변화 시켜가면서 세 알고리즘의 성능을 비교한 결과를 보여준다. 그림 4-(a) 는 하나의 간섭 임계 값 경우에, 세 알고리즘의 GAT, AET 성능을 비교한 결과를 보여준다. 유저 분포에 따라, FDA는 ALL과 비교했을 때 17-170%의 GAT 성능 개선 및 170% 에 달하는 AET 성능 개선을 보였다. 특히, 유저 분포치 ρ 값이 커짐에 따라 GAT 성능 차이가 커지게 되는데, 이는 엣지 유저의 비율이 증가함에 따라 적절한 ICI 관리의 필요성이 증가하기 때문이다. OPT 알고리즘과 비교 했을 때, FDA는 유저 분포에 따라 80% ($\rho=0$) 에서 96% ($\rho=0.8$) 에 달하는 GAT 성능을 보였다. 반면, OPT 와 FDA는 다양한 유저 분포 하에서도 AET 성능 측면에서 차이가 거의 나타나지 않음을 검증하였다.

하지만, 그림 4-(a)에서 ρ 값이 작을 경우, FDA 와 OPT 의 80% 정도 GAT 성능 차이를 확인할 수 있었다. 이러한 차이를 줄이기 위해, 제안하는 방법에서 각 기지국은 IV-3에서 소개한 바와 같이 I_{high} 와 I_{low} 두 개의 간섭 임계값 중 하나의 값을 적응적으로 선택하여 경쟁하게 된다. 그림 4-(b)는 이러한 경우에 대한 FDA와 나머지 두 알고리즘과의 GAT 및 AET 성능 비교 결과를 보여 준다. $\rho=0$ 경우, FDA는 ALL과 비교했을 때, 28%의 GAT 성능 개선을 보이는 것을 확인할 수 있었고, 이는 그림 4-(a) 에서의 차이 값인 17%

에 비해 훨씬 개선된 결과이다. 또한, OPT 와 FDA의 GAT 성능 차이가 하나의 간섭 임계 값 경우에 비해 훨씬 줄어든 결과를 보인다.

결론적으로, 두 개의 간섭 임계값을 적용할 경우 성능 개선이 나타나는 이유는 가능한 패턴 집합이 늘어나기 때문이라고 볼 수 있다. 다시 말해, 각 기지국은 할당된 유저들의 분포에 따라 적절한 임계값을 가지고 경쟁에 참여하게 되고, 그렇게 함으로써 패턴 결과가 최적의 알고리즘의 패턴과 유사하게 나타난다. 예를 들어, $\rho=0$ 일 경우 심한 ICI를 받는 유저수가 적기 때문에 기지국은 I_{high} 을 선택함으로써 기지국의 전송 전력을 켜고자 노력한다. 반면, ρ 값이 1에 근접함에 따라 심한 ICI를 받는 엣지 유저의 수가 늘어나게 된다. 이 경우, 기지국들은 하나의 임계 값 경우와 같은 값인 I_{low} 을 선택하게 되므로, 시뮬레이션 결과가 하나의 임계값에 대한 경우와 유사하게 나타난다.

VI. 결 론

최근 소형 셀 네트워크에서 가장 고려되는 부분은 셀 엣지 유저들의 성능 열화를 해결하는 것이다. 본 연구에서는 엣지 유저들의 성능을 개선하기 위한 셀간 간섭(ICI) 관리 알고리즘을 제안한다. 각 기지국은 자신에게 할당된 유저들의 정보만을 이용하여 대기 시간을 결정하고, 이를 기반으로 기지국간 경쟁을 통하여 전송 전력 on/off 를 결정한다. 이러한 분산화된 방법의 기지국 전송 전력 제어를 통해, 중앙 집권적 알고리즘에 비하여 계산 복잡도를 훨씬 줄일 수 있다. 또한, 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 알고리즘이 셀 간 간섭을 관리하지 않는 알고리즘에 비해 뛰어난 성능 개선을 보임을 검증 하였고, 다양한 유저 분포 환경 하에서도 제안하는 알고리즘이 최적의 알고리즘 성능과 유사한 결과를 보임을 검증 하였다.

References

[1] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gatherer, "Femtocell networks: a survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, Sep. 2008.

[2] K. Son, Y. Yi, and S. Chong, "Adaptive multi-pattern reuse in multi-cell networks," in *Proc. Int. Conf. Modeling, Optimization*

Mobile, Ad hoc, Wireless Networks (WiOPT), pp. 1-10, Seoul, Korea, June 2009.

[3] A. Gjendemsj, D. Gesbert, G. E. Oien, and S. G. Kiani, "Binary power control for sum rate maximization over multiple interfering links," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 8, pp. 3164-3173, Aug. 2008.

[4] K. Son, Y. Yi, and S. Chong, "Utility optimal multi-pattern reuse in multicell networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 142-153, Jan. 2011.

[5] J.-W. Cho, J. Mo, and S. Chong, "Joint network-wide opportunistic scheduling and power control in multi-cell networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 3, Mar. 2009.

[6] R. Giuliano, C. Monti, and P. Loreti, "WiMAX fractional frequency reuse for rural environments," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 15, no. 3, pp. 60-65, June 2008.

[7] K. Son, S. Chong, and G. de Veciana, "Dynamic association for load balancing and interference avoidance in multi-cell networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3566-3576, July 2009.

[8] C. U. Saraydar and A. Yener, "Adaptive cell sectorization for CDMA systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 19, no. 6, pp. 1041-1051, June 2001.

[9] C. Y. Lee, H. G. Kang, and T. Park, "Dynamic sectorization of microcells for balanced traffic in CDMA: Genetic algorithms approach," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 51, no. 1, pp. 63-72, Jan. 2002.

[10] J. Liu, Y. Yi, A. Proutiere, M. Chiang, and H. V. Poor, "Convergence and tradeoff of utility-optimal CSMA," *Submitted to IEEE Commun. Lett.*, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/0902.1996>

[11] L. Jiang and J. Walrand, "A distributed CSMA algorithm for throughput and utility maximization in wireless networks," in *Proc. 46th Annu. Allerton Conf. Commun., Control, Comput.*, pp. 1511-1519, Urbana-Champaign, U.S.A., Sep. 2008.

- [12] J. Ni, B. Tan, and R. Srikant, "Q-CSMA: Queue length based CSMA/CA algorithms for achieving maximum throughput and low delay in wireless networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1-5, San Diego, U.S.A., Mar. 2010.
- [13] H.-H. Choi, "Carrier Sensing Multiple Access with Collision Resolution (CSMA/CR) protocol for next-generation wireless LAN," *J. Korea Inform. Commun. Soc. (KICS)*, vol. 38, no. 1, pp. 33-43, Dec. 2012.
- [14] A. J. Goldsmith and S.-G. Chua, "Variable-rate variable-power mqam for fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 10, pp. 1218-1230, Oct. 1997.
- [15] J. Mo and J. Walrand, "Fair end-to-end window-based congestion control," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 8, no. 5, pp. 556-567, Oct. 2000.
- [16] 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, Jan. 2005.
- [17] 3GPP TSG Working Group 4 meeting, *Home NodeB Output Power*, TSG-RAN WG1 Contribution R4-070 969, June 2007. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/ftp/tsgan/WG4Radio/TS GR443bis/Docs/>.
- [18] Ofcom, *Sitfinder: Mobile phone base station database*, [Online]. Available: <http://www.sitfinder.ofcom.org.uk/>.

이 창 식 (Changsik Lee)



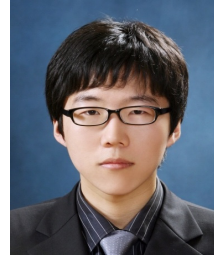
2012년 2월 고려대학교 전기 전자전파공학부 학사
 2012년 2월~현재 KAIST 전기 및 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 무선 자원 관리

김 지 환 (Jihwan Kim)



2009년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 학사
 2011년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 석사
 2011년 2월~현재 KAIST 전기 및 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 무선 자원 관리

곽 정 호 (Jeongho Kwak)



2008년 8월 아주대학교 전자공학부 학사
 2011년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 석사
 2011년 2월~현재 KAIST 전기 및 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 무선 자원 관리,

단말 전력 최적화

김 은 경 (Eunkyung Kim)



2003년 2월 연세대학교 정보산업공학과 학사
 2005년 2월 포항공과대학교 컴퓨터공학과 석사
 2005년~현재 한국전자통신연구원 통신인터넷연구부문 선임연구원

2010년 2월~현재 KAIST 전기 및 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 차세대 무선 통신 시스템

정 송 (Song Chong)



1988년 서울대학교 제어계측공학과 학사
 1990년 서울대학교 제어계측공학과 석사
 1995년 The University of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터 공학과 박사

1994년~1996년 AT&T Bell Lab, Holmdel, 연구원
 1996년~2000년 서강대학교 전자공학과 교수
 2000년~현재 KAIST 전기 및 전자공학과 교수
 <관심분야> 무선네트워크, 모바일시스템, 네트워크 최적화 및 알고리즘, 인간 이동성, 네트워크 데이터 분석