

논문 2013-50-1-1

기지국 공유가 가능한 셀룰러 네트워크에서 에너지 효율화를 위한 기지국 운영 방안

(Energy-Efficient Base Station Operation With Base Station Sharing in
Wireless Cellular Networks)

오 은 성*

(Eunsung Oh)

요 약

본 논문은 기지국 공유가 가능한 셀룰러 네트워크에서 에너지 효율화를 위한 기지국 운영 방안에 관한 것이다. 기지국 운영에 따른 에너지 사용 비용과 기지국 공유에 따라 나타나는 서비스 사업자 간의 트래픽 교환을 함께 고려하기 위하여 에너지와 트래픽에 대한 비용 모델을 수립하여 에너지 비용 최소화에 관한 최적화 문제로 나타낸다. 최적해를 구하기 위하여 게임 이론을 기반으로 정보교환을 기반으로 각각의 서비스 사업자가 독립적으로 기지국을 운영할 수 있는 방안을 제시한다. 또한 제안된 방안이 항상 유일한 Nash equilibrium을 가지며 최적화 문제의 해가 됨을 보인다. 모의실험을 통하여 제안된 기지국 운영 방안이 에너지 비용 절감을 이룰 수 있음을 보이고, 다양한 파라미터와 에너지 비용 절감 간의 상관관계를 논의한다.

Abstract

In this paper, we present an energy-efficient base station operation with base station sharing in wireless cellular networks. Firstly, cost functions are modeled related with the amount of energy usage and traffic load. We use game theory and formulate an energy bill game, where the players are the service operators which are operating base stations and their strategies are the bill of their base station energy consumption and hand-over traffic load to the others service operators. We show that the global optimal performance in terms of minimizing the energy costs is achieved at the Nash equilibrium of the formulated energy bill game. Simulation results confirm that the proposed approach can reduce the energy bill of the service operator, and show the relationship between the energy cost saving and various parameters.

Keywords: 에너지 효율적 운영, 에너지 비용 절감, 셀룰라 네트워크

I. 서 론

정보통신 분야는 다양한 멀티미디어 서비스의 개발과 모바일 기기의 증가로 인하여 에너지 사용량이 매해 15-20% 씩 증가하여 5년 마다 에너지 소비가 2배씩 증가하는 경향을 보이고 있으며^[1], 이로 인하여 전력 사용에 따른 비용으로 2013년 약 220억 달러가 소모될 것으로 예상된다^[2].

정보통신 분야에서 사용되는 에너지 중 약 37%가 무선 네트워크 인프라 부분에서 사용되며, 이 중 60 - 80%의 에너지가 기지국의 유지 및 운영에서 사용되고 있다^[3]. 그러나 기지국에서 소모되는 전력은 데이터 전송을 위하여 40W 정도의 전력만이 사용되며, 대부분의 전력은 기지국 유지를 위하여 사용되고 있어, 데이터 전송이 없는 경우에도 많은 전력을 소모하게 되는 문제를 발생시킨다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 최근 기지국의 에너지 효율적 운영에 대한 연구가 이루어지고 있다. 참고 문헌 [4]와 [5]에서 보는 것과 같이 기존 협력 통신 방

* 정회원, 건국대학교 전기공학과
(Dept. of Electrical Eng., Konkuk University)
접수일자: 2012년9월21일, 수정완료일: 2012년12월27일

식이나 신재생과의 결합을 통하여 에너지 효율을 개선시키는 연구뿐 아니라, 트래픽의 시간적 특성을 고려하여 사용량이 낮은 시간대에 기지국을 스위치 오프시킴으로써 에너지 효율이 증가할 수 있는 기초적인 수학 모델링이 연구되었으며^[3,6], 네트워크의 다양한 특성을 고려하여 기지국을 운영함으로써 에너지 효율화를 이룰 수 있는 방법들이 개념적으로 소개되었다^[7]. 그러나 이러한 대부분의 연구들은 트래픽의 시간적 특성만을 고려하여 기지국을 스위치 온 또는 오프 함으로써 에너지 소비를 감소시키는 것을 목적으로 하고 있다.

참고문헌 [7]의 개념적 결과에서 보듯이 기지국을 운영하는데 있어 서비스 사업자(SO, service operator) 간의 기지국 공유를 고려하면 각각의 SO가 기지국을 독립적으로 운영 할 때에 비하여 추가적인 에너지 감소를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 기지국 설치 등에 소요되는 비용 등을 감소시킬 수 있다. 이와 같은 이유로 3GPP 등에서 기지국 공유에 관한 고려가 논의되고 있으나^[8], 아직은 개념정립 단계에 머무르고 있다.

따라서 본 논문에서는 SO 간 기지국 공유가 가능한 셀룰러 네트워크 환경에서 에너지 효율화 기지국 운영 방안 제시를 목적으로 한다. 먼저 에너지 사용량과 기지국 공유를 통하여 나타나는 트래픽 변화량을 고려하기 위하여 에너지 효율화 문제를 비용 최적화 문제로 나타낸다. 이때 기지국을 운영하는 각각의 SO는 배타적 경제 개념을 갖는 사업자임으로 게임 이론을 적용한다. 게임 이론을 바탕으로 제안되는 기지국 운영 방안은 SO 간 정보교환을 포함하는 분산적 운영 방안으로, SO가 자신의 기지국 운영만을 결정하게 되며, 이에 따라 부가적으로 중앙 집중형 운영 방안에 비하여 계산 복잡도 감소를 이룰 수 있다. 모의실험을 통하여 기지국 공유에 따른 에너지 효율화 이득을 검증하고, 다양한 조건의 실험을 통하여 비용 및 네트워크 요인들이 에너지 효율화에 미치는 영향에 대하여 논의한다.

II. 기본 모델 및 문제 제시

1. 기본 모델

가. 시스템 모델

본 논문에서는 SO들의 집합 S 에 대하여, 각각의 SO ($s \in S$)가 B_s 의 기지국 집합을 운영하는 모델을 고려한다. 이때 각 집합의 크기는 $|S|$ 와 $|B_s|$ 로 표시한다.

모든 기지국들의 주파수 재사용 비율(frequency reuse factor)은 1이며, SO가 다른 경우 기지국 간 간섭은 없다고 가정한다*. 또한 정보전송에 있어 하향링크만을 고려하며, 이에 따른 결과는 수정을 통하여 상향링크에도 적용될 수 있다^[6].

s 번째 SO의 사용자 u_s 는 γ_{u_s} [bits/s]의 트래픽량을 요구하며, 신호 세기가 가장 큰 기지국으로부터 서비스를 받게 된다. 기지국의 전송 파워를 P_i , 기지국 i 와 사용자 u_s 사이의 채널 이득을 $g(i, u_s)$ 라고 하면 서비스 기지국 b 는 다음과 같이 결정된다.

$$b = \operatorname{argmax}_{i \in B_s} g(i, u_s) \cdot P_i. \quad (1)$$

이를 기반으로 Shannon 캐패시티를 이용한 사용자 u_s 가 서비스 받는 전송량은

$$\psi_{u_s} = BW \cdot \log_2(1 + \text{SINR}_{u_s}), \quad (2)$$

이다. BW는 시스템 대역폭을 나타내며, 잡음 전력이 σ^2 일 때 신호 대 간섭 및 잡음비는 다음과 같다.

$$\text{SINR}_{u_s} = \frac{g(b, u_s) \cdot P_b}{\sum_{i \in B_s/b} g(i, u_s) \cdot P_i + \sigma^2}. \quad (3)$$

기지국 공유를 통하여 다른 사업자 s' 의 기지국을 사용하게 된다면, 신호 대 간섭 잡음비에 영향을 미치는 기지국 집합이 B_s 에서 $B_{s'}$ 으로 변화하게 된다.

본 논문에서는 기지국 단위의 운영을 목적으로 하고 있기 때문에, 기지국에 대한 파라미터로 시스템 로드를 고려하며, 서비스 영역이 A_b 인 기지국 b 의 시스템 로드는 다음과 같이 구해진다.

$$\rho_b = \sum_{u_s \in A_b} \frac{\gamma_{u_s}}{\psi_{u_s}}. \quad (4)$$

시스템 로드는 개념적으로 기지국이 서비스 영역에 있는 사용자들의 트래픽 요구량을 서비스하는데 필요한 단위 시간 비율을 나타낸다^[9].

* 일반적으로 SO가 서로 다른 주파수 대역을 사용하기 때문에 SO간 간섭은 발생하지 않음. 기지국 공유를 위해서는 사용자의 기기가 다중 주파수 대역을 지원하거나, OFDM과 같은 다중 주파수 시스템의 경우 SO별 서로 다른 부반송파 영역을 사용하게 됨^[8]

나. 비용 모델

에너지 사용량과 트래픽 량에 대한 정량적 비교를 위하여 비용 모델을 이용한다.

에너지 사용량에 대한 비용 모델에 대해서, 실제 에너지 비용은 사용량에 따라 단조 증가하는 형태를 가지며 사용하는 구간에 따라 기울기가 다른 형태의 비용을 갖게 되나, 일반적으로 2차 함수로 근사화하여 사용한다^[10]. 그러나 기지국의 경우에는 사용하는 에너지 량의 변화가 크지 않기 때문에 다음과 같이 고정값을 사용하는 모델을 사용할 수 있다^[11].

$$C_e(\text{Load}) = C_1 \times \text{Load} [\text{W}/k\text{Wh} \times k\text{Wh}]. \quad (5)$$

기지국 공유를 통하여 다른 SO의 기지국을 사용하게 되면 비용을 지불하게 되는데, 이에 대한 비용 모델은 SO 간의 특성을 반영하여 결정되게 된다. 이에 대해서는 트래픽 량에 대한 선형 또는 2차 함수로 가정할 수 있는데, 본 연구에서는 에너지 사용량 모델과 마찬가지로 선형모델을 사용한다.

$$C_\gamma(\text{Load}) = C_2 \times \text{Load} [\text{W}/\text{Mbps} \times \text{Mbps}]. \quad (6)$$

2. 문제 제시

본 연구의 목적은 기지국 운영을 통하여 에너지 비용을 최소화하는 것이다. 따라서 목적함수는 다음과 같다.

$$U(\hat{B}) = \sum_{s \in S} C_e(|B_s|) + \{C_\gamma(\Gamma_{s \rightarrow S/s}) - C_\gamma(\Gamma_{S/s \rightarrow s})\} \quad (7)$$

이때, \hat{B} 는 기지국 운영(스위치 온/오프)에 따라 결정되는 기지국 운영 상태를 의미한다.

목적함수에서 첫 번째 항은 SO가 사용하고 있는 기지국에 따른 에너지 비용을 나타내며, 두 번째 항은 다른 사업자의 기지국을 사용함으로써 지불해야 하는 비용과 다른 사업자의 트래픽을 서비스 해 줌으로써 얻게 되는 이득을 나타낸다.

사용자들은 기지국이 오프되는 경우에 현재 오프되는 기지국 이외에 신호 세기가 가장 큰 기지국으로 핸드오버하게 되는데, 이때 기지국의 시스템 로드가 일정 경계값보다 큰 경우는 사용자의 요구되는 트래픽 량을 만족시키지 못할 수 있다. 따라서 기지국은 다음과 같은 가용 영역(feasible region) 안에서 운영되어야 한다.

$$F(\hat{B}) = \{\hat{B} | 0 \leq \rho_b \leq \rho^{th}, \forall b \in B_s \& s \in S\}, \quad (8)$$

여기서, ρ^{th} 는 시스템 로드에 대한 경계값을 나타내며 시스템 로드가 경계값보다 작은 경우 기지국은 서비스 영역 안에 있는 사용자들의 요구되는 트래픽 량을 서비스 할 수 있다고 가정한다^[9].

수식 (7)과 (8)을 이용하여 기지국 운영에 따른 에너지 비용 최소화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\min_{\hat{B}} \{U(\hat{B}) | \hat{B} \in F(\hat{B})\}. \quad (9)$$

수식 (9)의 최소화 문제에서 가용 영역은 로그 함수의 역수 형태를 갖는 함수들로 구성되고, 목적함수는 선형 함수의 선형 조합임으로 convex 최적화 문제가 된다.

III. 에너지 비용 효율적 네트워크 운영 방안

앞서 언급한 것과 같이 에너지 비용 최소화를 위한 기지국 운영에 대한 문제는 convex 최적화 문제로 simplex method 또는 interior point method를 통하여 최적해를 구할 수 있다^[12]. 이 경우는 모든 SO들에 대한 정보를 가지고 있는 중앙 집중형 제어기를 필요로 한다. 그러나 SO간에는 배타적 경제 개념이 포함되어야 함으로, 본 장에서는 경쟁적 문제해결 방식인 게임 모델링과 정보 교환을 통하여 SO들이 분산적 기지국 운영을 통하여 에너지 비용 최소화를 이룰 수 있는 방안을 제안한다.

목적함수에서 기지국 공유에 따른 트래픽 량의 변동은 기지국 운영이 바뀔에 따라 사용자들이 핸드오버됨으로써 자동적으로 결정되는 값으로, 제어에 의하여 결정되는 값이 아니라 기지국 운영에 따르는 값이다. 따라서 수식 (9)의 최적화 문제를 게임 모델링하면 SO가 플레이어로 참가하여 자신의 기지국의 스위치 온 또는 오프를 선택하는 문제로 표현된다. 이때 모든 에너지 비용을 최소화하는 최적화 문제와는 다르게, 각각의 SO가 자신의 이득을 최대화 하는 문제로 나타남으로 게임 모델의 payoff는 최적화 문제 목적함수의 음수 형태로 표현된다.

[서비스 사업자간 에너지 비용 게임]

- **Players:** 서비스 사업자 $s \in S$
- **Strategies:** 각각의 서비스 사업자는 payoff가 최대가 되도록 자신의 기지국의 운영(스위치 온/오프)

프)을 결정

- **Payoffs:** 서비스 사업자 s 에 대한 payoff는 $\Theta_s(\hat{B}_s; \hat{B}_{-s})$ 로 표현되며, 다음과 같다.

$$\Theta_s(\hat{B}_s; \hat{B}_{-s}) = -U(\hat{B}).$$

$$\text{이때, } \hat{B}_{-s} \triangleq \{\hat{B}_1, \dots, \hat{B}_{s-1}, \hat{B}_{s+1}, \dots, \hat{B}_{|S|}\}.$$

제안된 에너지 비용 게임은 concave 형태의 payoff를 갖는 \hat{B}_s 에 대한 concave N-person 게임으로, 이는 참고문헌 [13]의 정리 1과 정리 3을 통하여 항상 유일한 Nash equilibrium을 갖는다. 또한 Nash equilibrium \hat{B}_s^* 에 대한 정의는,

$$\Theta_s(\hat{B}_s^*; \hat{B}_{-s}^*) \geq \Theta_s(\hat{B}_s; \hat{B}_{-s}^*), \quad \forall s \in S, \quad (10)$$

임으로, Nash equilibrium을 통하여 구해진 해는 다른 모든 기지국 운영을 통하여 나타난 payoff보다 항상 큰 payoff를 얻게 되는 해가 되어, 이는 수식 (9)의 최적화 문제를 최소화하는 유일한 최적해가 된다.

Nash equilibrium을 얻기 위하여 각각의 SO는 다음과 같은 알고리즘에 따라 기지국 운영을 결정한다.

[서비스 사업자별 기지국 운영 알고리즘]

- 각각의 SO는 자신의 traffic 변화에 따른 랜덤 시간 주기 또는 다른 SO로부터 새로운 \hat{B}_{-s} 정보가 수신된 경우 아래 동작을 수행

표 1. 모의실험 파라미터
Table 1. Simulation parameter.

파라미터	값
시스템 대역폭	10MHz
기지국 전송 전력	43dBm
기지국 전송 안테나	전방향 안테나 (12dBi)
경로 감소 모델	Modified COST 231 Hata model
페이딩 모델	로그 정규 분포 모델 (std = 8dB)
잡음 모델	정규 분포 모델 ($\sigma^2 = -176\text{dBm/Hz}$)

- **Step1 기지국 운영 결정:** 비용 게임의 payoff, $\Theta_s(\hat{B}_s; \hat{B}_{-s}) = -U(\hat{B})$ 를 최대화 하는 \hat{B}_s 결정
- **Step2 정보 갱신:** step 1)에서 결정된 \hat{B}_s 가 운영 중인 \hat{B}_s 와 다른 경우 기지국 운영 상태를 변경하

고 자신의 기지국 운영 상태를 브로드캐스트하며, 상태 변화가 없는 경우 동작을 끝냄.

이때 SO가 비동기적으로 동작한다면, 참고문헌 [10]의 정리 3에 의하여 항상 Nash equilibrium으로 수렴한다. 또한 중앙 집중형 방법을 통한 해법은 전체 기지국 개수에 대한 계산 복잡도 $O(\sum_{s \in S} |B_s|)$ 를 갖지만, 제안된 분산적 방법은 SO의 기지국 개수 만큼의 계산 복잡도 $O(|B_s|)$ 만을 요구한다.

IV. 모의실험

모의실험에 사용된 파라미터는 표 1에서 정리되어 있는 것과 같다. 기술되지 않은 파라미터는 [14]에서 기술하고 있는 도심 환경 파라미터를 사용하였다.

$5\text{Km} \times 5\text{Km}$ 의 관찰 영역에 대하여 SO별 기지국과 사용자들이 균등 분포를 가지고 확률적으로 배치되어 있는 환경을 고려하였다. 실험에서 2개의 SO가 있는 경우, SO별 기지국이 관찰영역에 16개가 존재하는 환경을 가정하는데, 이는 기지국 간 평균 거리가 1200m인 경우이다. 기지국 당 초기 사용자는 평균 20명이 서비스 받는 환경을 가정하였다. 경제값은 초기 상태 환경에서 각각의 기지국이 서비스를 수행하고 있다고 가정할 수 있기 때문에 모든 기지국 중 가장 큰 시스템 로드를 갖는 값, $\rho^{th} = \max(\rho_{b \in B})$ 으로 설정하였다.

비용 파라미터는 기지국 당 전력 사용 비용인 C_1 을 단위 파라미터로 하여, $C_2 = C_{rate} \cdot C_1$ 의 형태로 사용하였으며, 이는 C_{rate} 이 0.1인 경우 에너지 사용 비용의 단위 가격과 트래픽 10Mbits/s 당 단위 가격이 같음을 의미한다.

1. 사용자 트래픽 요구량 변화에 따른 결과

그림 1 - 3은 SO 1의 사용자 트래픽 요구량이 512Kbits/s인 경우, SO 2의 사용자 트래픽 요구량을 변화하며 관찰한 결과이다.

그림 1에서 보는 것과 같이 SO간 기지국 공유가 가능한 경우, SO별로 기지국을 운영하는 경우에 비하여 추가적인 에너지 소비량 감소를 얻을 수 있다. SO간 트래픽 요구량이 달라질수록 기지국 공유로 인한 이득은 줄어들는데 이는 기지국 공유를 하는 경우 핸드오버되는 트래픽으로 자유도가 줄어드는 반면, 공유를 하지 않는 경우는 자유도가 증가하기 때문이다.

그림 2에서 보는 것과 같이 SO 간 사용자 트래픽 요

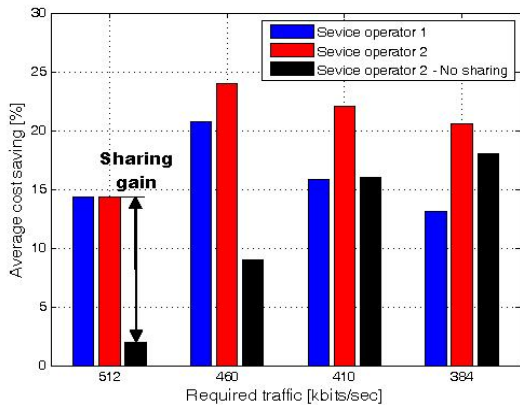


그림 1. SO 2의 사용자 트래픽 요구량 변화에 따른 에너지 사용 감소량 비교
Fig. 1. Comparison of energy saving versus the required traffic of SO2.

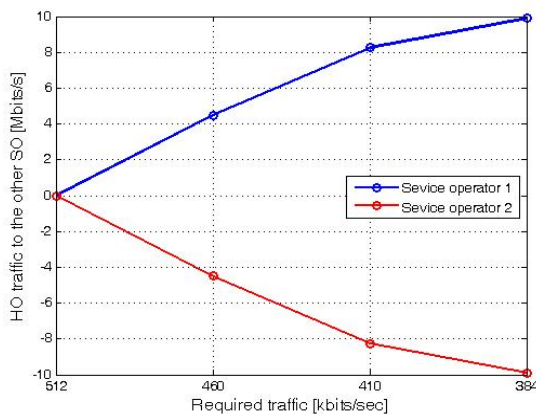


그림 2. SO 2의 사용자 트래픽 요구량 변화에 따라 다른 SO로 핸드오버 되는 트래픽 량 비교
Fig. 2. Comparison of hand-over traffic versus the required traffic of SO2.

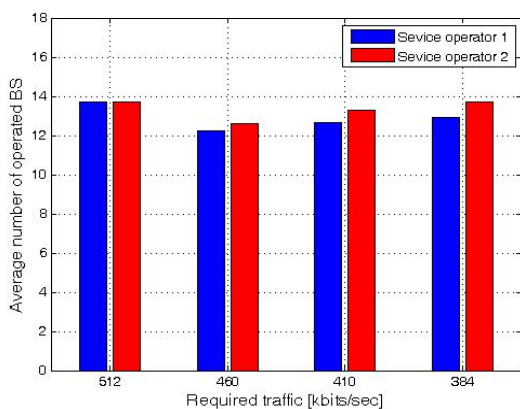


그림 3. SO 2의 사용자 트래픽 요구량 변화에 따른 기지국 운영 상황 비교
Fig. 3. Number of operated BS versus the required traffic of SO2.

구량이 같은 경우 서로 간에 공유되는 트래픽 량은 평균적으로 같다. 그러나 기지국 공유로 인하여 기지국 선택의 자유도가 향상되고 이에 따라 트래픽이 분산되기 때문에, 그림 3에서 보는 것과 같이 운영되는 기지국 수가 감소하여 에너지 비용 절감을 얻을 수 있다.

SO간 사용자 트래픽 요구량이 다른 경우, 그림 1에서 보는 것과 같이 트래픽 요구량이 낮은 SO 2가 더 많은 에너지 비용 절감을 할 수 있는데, 이는 SO 2가 더 많은 기지국을 운영하지만(그림 2), SO 1의 트래픽이 상대적으로 트래픽이 낮은 SO 2의 기지국으로 핸드오버 되면서(그림 3) 발생하는 비용이득으로 인하여 전체 비용이 줄어들기 때문이다. 또한 SO 2의 사용자 트래픽 요구량이 감소하면 에너지 비용 절감 량이 줄어들게 되는데, 이는 SO 1에서 핸드오버 되는 트래픽 량이 증가함에 따라 기지국 운영에 대한 자유도가 줄어들기 때문이다.

2. 비용 파라미터 변화에 따른 결과

표 2는 SO 1과 2의 사용자 트래픽 요구량이 각각 512, 460Kbits/s인 경우에 C_{rate} 의 변화에 따른 실험 결과이다.

앞서 살펴본 결과와 마찬가지로 $C_{rate} = 0.05$ 인 경우에도 SO 1과 SO 2사이에는 사용자 트래픽 요구량이 SO 2가 적기 때문에 SO 1 사용자 트래픽이 SO 2로 핸드오버 하게 되며, 이에 따라 SO 1의 기지국 사용량이 SO 1에 비하여 많아지는 결과가 된다.

그러나 C_{rate} 이 줄어드는 경우 에너지 비용 절감이 급격히 줄어들게 된다. 이는 C_{rate} 이 줄어드는 것은 기지국 운영비용에 비하여 트래픽 단위 비용이 낮아지는 것을 의미한다. 따라서 SO 사용자 트래픽이 쉽게 다른 SO 기지국으로 핸드오버 하게 됨으로써 기지국 운영에 대한 자유도를 제한하기 때문이다. 앞 장의 트래픽 량의 비대칭성이 커지는 경우에 에너지 비용 절감 량이 줄어드는 것과 같은 이유이다.

표 2. C_{rate} 변화에 따른 결과 비교

Table 2. Results related with C_{rate} .

		C_{rate}	
		0.05	0.1
Operated BS [개]	SO1	15.7	12.2
	SO2	15.9	12.6
HO traffic [Mbits/s]	SO1	-3.1	-4.5
	SO2	3.1	4.5
Cost saving [%]	Total	1.0	22.4
	SO1	0.5	20.7
	SO2	1.6	24.0

V. 결 론

본 논문에서는 기지국 공유가 가능한 셀룰러 네트워크 환경에서 에너지 비용 최소화를 위한 방법을 제안하고 있다. 먼저 에너지와 트래픽에 대한 비용 모델을 기반으로 에너지 비용 최소화 문제를 제시하였으며, 게임 이론을 기반으로 SO별 분산적 운영을 통하여 최적해를 찾는 방법을 제안하였다. 제안된 방법에 대한 모의실험을 통하여 기지국 공유가 가능한 경우, SO별로 기지국을 운영하는 경우에 비하여 에너지 비용을 줄일 수 있음을 보였다. 결론적으로 에너지 비용 감소를 위해서는 기지국 공유를 이용하여 자유도를 높이면서, 비용 조정 등의 방법으로 핸드오버 트래픽 제어를 통한 자유도 유지가 필요함을 알 수 있다.

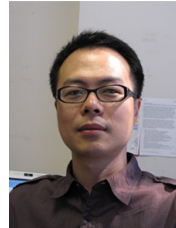
참 고 문 헌

- [1] G. Fettweis and E. Zimmermann, "ICT energy consumption - trends and challenges," in *Proc. of IEEE WPMC*, Sep. 2008.
- [2] "Mobile network energy OPEX to rise dramatically to \$22 billion in 2013," Article appearing in Cellular News, Jul. 3, 2008.
- [3] M. A. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, and M. Meo, "Optimal energy savings in cellular access networks," in *Proc. of IEEE GreenComm*, Jun. 2009.
- [4] 권은미, 김정호, "센서 네트워크기반 협동 릴레이의 에너지 효율성 분석," 전자공학회논문지-TC 49권, 5호, pp.66-71, 2012년 5월
- [5] 박성수, 이석원, 방극준, 홍대식, "에너지 수집 기능이 있는 인지 무선 시스템의 협력 스펙트럼 센싱 기법," 전자공학회논문지-TC 49권, 3호, pp.8-13, 2012년 3월
- [6] E. Oh, B. Krishnamachari, "Energy savings through dynamic base station switching in cellular wireless access networks," in *Proc. of IEEE Globecom*, 2010.
- [7] E. Oh, B. Krishnamachari, X. Liu, and Z. Niu, "Towards dynamic energy-efficient operation of cellular network infrastructure," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 56 - 61, Jun. 2011.
- [8] 3GPP TS 23.251, Network sharing; Architecture and functional description
- [9] K. Son, H. Kim, Y. Yi, and B. Krishnamachari, "Base station operation and user association mechanisms for energy-delay tradeoffs in green cellular networks," *IEEE J. Sel. Areas*

Commun., vol. 29, no. 8, pp. 1525 - 1536, Sep. 2011.

- [10] A. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, and A. Leon-Garcia, "Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 320-331, Dec. 2010.
- [11] 전기요금표, 한국전력공사, <http://www.kepco.co.kr>
- [12] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. : Cambridge University Press, 2004.
- [13] J. B. Rosen, "Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games," *Econometrica*, vol. 33, pp. 347 - 351, 1965.
- [14] "IEEE 802.16m evaluation methodology document (EMD)," IEEE 802.16m-08/004r5, Sep. 2009.

저 자 소 개



오 은 성(정회원)

2003년 연세대학교 기계전자공학부 학사 졸업.

2006년 연세대학교 전기전자공학과 석사 졸업.

2009년 연세대학교 전기전자공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 자원할당, 스케줄링, 에너지 효율적 운영 방안, 무선통신시스템, 스마트그리드>