

기지국의 온-오프 스위칭을 통한 에너지 절약 기술 현황

김선욱

LG 전자 차세대통신연구소

요약

최근 스마트폰의 보급으로 인해 모바일 데이터 요구량이 급속하게 증가함에 따라 효율적인 기지국 운영이 중요시되고 있다. 현재 기지국은 단말들의 트래픽 요구량에 관계없이 항상 켜져 있지만, 트래픽 요구량이 비교적 낮은 경우 불필요한 기지국의 전원을 오프함으로써 상당한 에너지를 절약할 수 있음이 밝혀졌다. 본고에서는 매크로셀, 릴레이, 소형셀, 무선랜 등 다양한 종류의 네트워크가 혼재하는 환경에서 기지국의 전원을 켜고 끄므로써 에너지를 절약하는 기술의 현황을 알아본다.

I. 서론

정보통신기술(Information and communication technology, ICT) 산업의 발달에 따라, 무선 통신 시스템의 에너지 절약에 대한 관심 역시 증가하고 있다. 전세계적으로 모바일 가입자의 수가 60억에 육박하고 있으며 2017년까지 모바일 데이터 트래픽이 13배 증가할 것으로 예측된다[1]. 급증하는 데이터 트래픽 요구를 만족시키기 위해 무선 네트워크는 상당히 많은 에너지를 소모해야 하고, 이는 이동통신사의 운용지출 (operational expenditure, OPEX) 증가와 온실 가스 배출 증가를 야기한다. 따라서 경제적, 환경적 이유로 인해 ICT 산업에서는 네트워크의 에너지 소모 절감에 많은 노력을 기울이고 있다.

최근 연구에 의하면 셀룰러 네트워크를 구성하는 기지국, 단말, 코어 네트워크 중 기지국에서 전체 에너지 소모 중 약 60~80% 정도가 소모된다고 한다[2]. 따라서 기지국의 에너지를 절약하는 방법에 대한 연구가 가장 활발하게 진행 중이다. 또한 오늘날 기지국들은 낮 시간에 폭증하는 트래픽 로드 대비하여 상당히 밀집되어 설치되고 있다. 하지만 트래픽 양은 실제로 시간에 따라 크게 변화하기 때문에, 각 기지국들의 밤 시간 동안 사용률(utilization)이 상당히 저조하다. 실제로 평일의 30%, 주말의 35% 정도의 시간 동안 트래픽 양은 최대 트래픽

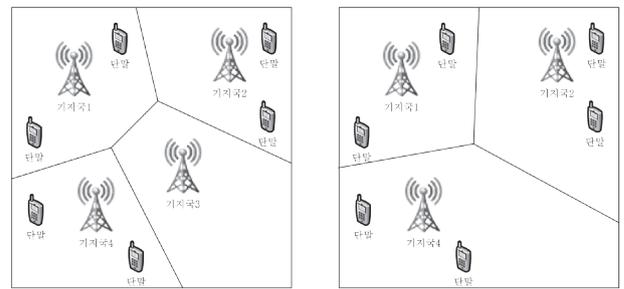


그림 1. 기지국의 온-오프 스위칭:
(a) 기존의 매크로셀 네트워크, (b) 기지국3의 전원 오프

양의 10%보다 낮다고 한다[3]. 그러므로 트래픽 로드가 낮은 시간에는 사용률이 낮거나 <그림 1>의 기지국3과 같이 사용되지 않고 있는 기지국들의 전원을 끄므로써 상당한 양의 에너지 소모를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

기지국에서 소모하는 전력은 크게 두 부분으로 나뉜다. 하나는 트래픽 로드 에 따라 동적으로 변하는 전력이고, 다른 하나는 트래픽 로드 에 관계없이 일정하게 소모되는 전력으로서 이는 쿨링, power supply, idle 모드 시그널링 등과 관련이 있다. [4]에 따르면 트래픽 로드 에 관계없이 일정하게 소모되는 전력량이 전체 소모 전력의 50% 이상을 차지한다고 한다. 따라서 본

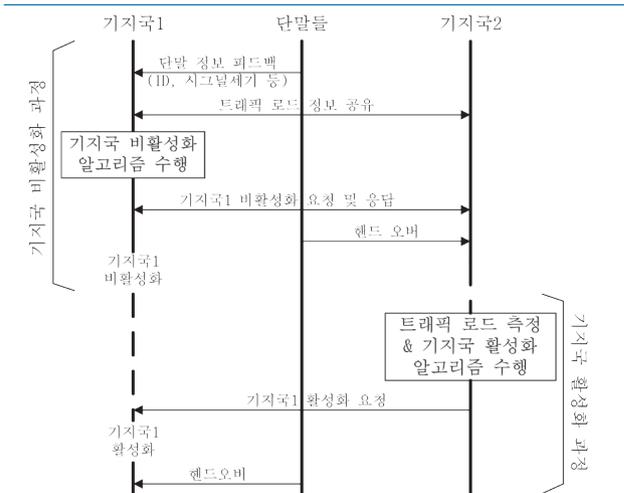


그림 2. 기지국 비활성화/활성화 과정

고에서는 네트워크의 에너지 소모를 가장 효율적으로 줄일 수 있는 기지국의 온-오프 스위칭 기법들에 대해 소개한다. 기존의 매크로셀 네트워크뿐만 아니라 릴레이, 소형셀, 및 무선랜과 결합한 매크로셀 네트워크 등 다양한 네트워크 환경에서의 연구 동향을 살펴해보도록 하겠다.

본고의 본문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 매크로셀 네트워크 환경, III장에서는 릴레이 네트워크 환경, IV장에서는 이종 네트워크 환경에서 기지국의 온-오프 스위칭 기법을 소개한다. V장에서는 결론을 맺고 향후 연구 방향을 살펴본다.

II. 매크로셀 네트워크

II장에서는 매크로셀로만 구성된 네트워크 환경에서 트래픽 변화에 따라 기지국의 전원을 켜고 끄으로써 에너지를 절약하는 기법들에 대해 알아본다. 또한 네트워크의 성능 향상을 위한 차세대 통신 기술로 주목 받고 있는 CoMP (coordinated multi-point) 및 캐리어 집성(carrier aggregation, CA) 환경에서의 기지국 온-오프 스위칭 기법들을 소개한다.

기지국의 온-오프 스위칭 절차는 일반적으로 <그림 2>와 같다. 단말들로부터 피드백 받은 트래픽 정보를 기지국 간에 공유하여 기지국1의 전원을 비활성화(오프) 할 수 있다면, 기지국 1이 옆 기지국으로 비활성화 요청 메시지를 보낸 후에 기지국1과 통신하던 단말들은 옆 기지국으로 핸드오버 하게 된다. 반대로 켜진 기지국들만으로 현재 활성화(active) 단말들을 모두 서비스 하기 힘든 경우에는 적절한 기지국을 활성화(온) 시킨 후 해당 기지국으로 핸드오버 시킨다.

서론에서 언급한 것과 같이 트래픽 로드가 낮은 시간에 사용률이 낮거나 사용되지 않고 있는 기지국들의 전원을 끄으로써 에너지를 절약하는 연구가 많이 발표되었다 [5]-[8]. [5]는 기지국의 온-오프 스위칭에 대한 첫 연구로서, 트래픽 로드가 낮아 기지국들의 전원을 끌 수 있는 시간대를 'night zone'으로 정의하고 night zone이 되면 정해진 기지국의 전원을 끄고 나머지 켜져 있는 기지국들의 전송 전력을 높임으로써 QoS를 보장하도록 하였다. [6]에서는 트래픽 변화 패턴이 주어졌을 때, night zone에서 끌 수 있는 최적의 기지국 개수를 구하고, 다양한 매크로셀 배치 시나리오에 대해 성능을 검증하였다. 하지만 [5]와 [6]은 주어진 트래픽 변화 패턴 하에서, 정해진 시간에 정해진 기지국의 전원을 끄는 방법을 제안했기 때문에 동적으로 변하는 실제 트래픽 환경에 적용하기 쉽지 않다.

[7]에서는 각 기지국으로부터 취합한 트래픽 로드 정보를 토대로 켜져 있는 기지국의 수를 최소화하는 중앙집중적 알고리

즘을 제안하였다. 또한 각 기지국에서 독립적으로 트래픽 로드를 측정하여 온-오프를 결정하는 분산적인 방법도 제안하여 알고리즘 수행 오버헤드를 줄이고자 하였지만 기지국의 전원을 켜는 알고리즘은 다루지 않았다. [8]에서는 기지국 간 거리 기반으로 기지국을 클러스터링하고, 클러스터 별로 트래픽을 일정 기간 측정하고 프로파일링된 트래픽 정보를 토대로 기지국의 온-오프 스위칭을 수행한다. 피크 시간대에는 모든 기지국을 활성화한 후 점진적으로 하나씩 기지국의 전원을 끄고, 클러스터를 서비스 할 수 있는 최소한의 기지국 개수가 되면 트래픽 로드에도 따라 다시 점진적으로 하나씩 기지국을 활성화한다. 즉, 각 기지국은 하루에 최대 한 번의 온-오프 스위칭만 필요로 한다. 성능 검증을 통해 한 번의 온-오프 스위칭 만으로도 상당한 에너지 절감 효과를 얻을 수 있음을 보였다.

트래픽 로드뿐만 아니라 다른 요소들(예를 들어, 핸드오버 수 용력, 기지국과 단말과 거리 등)을 고려하였거나 [9]-[12], 기지국의 온-오프 스위칭으로 인해 발생하는 커버리지 홀, 네트워크 성능 감소 등을 고려한 연구들 [13][14][15] 이 있다.

[9]에서는 시그널링 오버헤드로 인해 전원이 오프되는 기지국과 통신하던 모든 단말들이 켜져 있는 기지국으로 동시에 핸드오버할 수 없는 문제를 고려하였다. 모의 실험을 통해 각 기지국이 동시에 처리할 수 있는 핸드오버의 수가 2개로 제한되는 경우에는 모든 단말이 핸드오버 할 때까지 20초 내외의 시간이 소요됨을 보였다. [10]에서는 기지국과 단말간의 거리를 측정하고, 단말들과 떨어진 거리의 평균값이 가장 큰 기지국부터 전원을 끄는 알고리즘을 제안하였다. [11][12]에서는 다중 이동통신망 사업자가 존재하는 현실 상황을 고려하여 이동통신망 사업자 간 협력/비협력 게임을 통한 기지국 온-오프 스위칭 알고리즘을 제안하였다.

[13]에서는 기지국의 온-오프 스위칭 후 어느 기지국으로부터도 서비스를 받지 못하는 커버리지 홀이 생기는 문제를 고려하여, 커버리지 홀이 생기지 않고 에너지 소모를 최소화하는 최

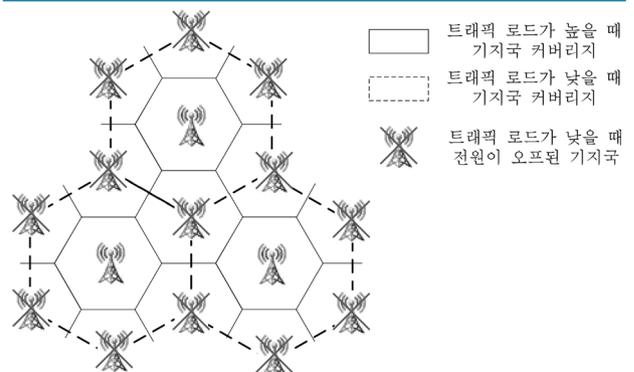


그림 3. 셀 주밍에 의한 기지국의 온-오프 스위칭

적의 셀 사이즈 및 활성 기지국의 수를 결정하는 기법을 제시하였다. [14]에서는 에너지 소모 절감을 위해 많은 수의 기지국의 전원을 끄면, 켜져 있는 기지국으로 트래픽 로드가 몰리게 되고 기지국과 단말 간 거리 또한 증가하게 되어 딜레이가 늘어나는, 즉 에너지-딜레이 사이의 트레이드오프 관계를 고려하였다. 기지국의 온-오프 스위칭뿐만 아니라 에너지 효율적인 단말 접속 기법을 제안하고 실제 네트워크 토폴로지에 적용하여 최대 70%의 에너지를 절감할 수 있음을 보였다. [15]에서는 비활성화되는 기지국으로 인해 주변 기지국에 추가되는 트래픽 로드의 양을 'network impact'로 정의하고 network impact를 고려하여 기지국을 하나씩 점진적으로 비활성화하는 분산적 알고리즘을 제시하였다.

전력 조절 기술 중 하나로서, 셀 주밍(cell zooming)은 트래픽 변화에 따라 기지국의 셀 크기를 적응적으로 변화시킨다. 셀 주밍을 활용하여 기지국 간 트래픽 로드를 밸런싱하거나 에너지 효율적으로 기지국을 동작시킬 수 있다. 이러한 셀 주밍 기술과 기지국 온-오프 스위칭을 결합하는 연구가 발표되었다 [16][17]. <그림3>과 같이 트래픽 로드가 낮은 시간대에는 일정 비율의 기지국을 완전히 끄고 일부 켜진 기지국들의 전송 전력을 높여 셀 크기를 늘림으로써 기지국의 전력 소모를 크게 줄일 수 있다.

1. CoMP

CoMP는 셀 가장자리 사용자의 전송률 향상을 위하여 LTE-A 시스템에서 현재 활발하게 논의되는 셀 간 협력 전송기법 중 하나이다. 네트워크 다중 안테나 시스템이라고도 불리는데, 지역적으로 떨어져 있는 기지국의 안테나들을 하나의 그룹으로 묶어 가상 다중 안테나 시스템을 구성하고 공동 연산 처리를 하여, 셀 간 간섭을 줄일 수 있고 시스템 전체 성능을 향상시킬 수 있다. CoMP를 위해 협력하는 기지국들이 협력 그룹에 속한 단말들과 형성되는 가상 다중 안테나 채널 또는 단말들이 전송해야 할 데이터를 백홀 네트워크를 통해 공유해야 하기 때문에 전

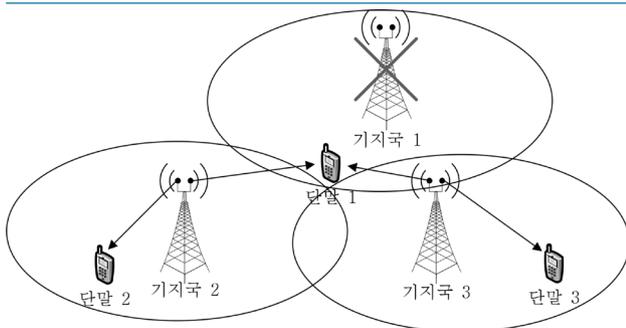


그림 4. 기지국의 온-오프 스위칭과 CoMP

력 소모가 증가한다. 또한 가상 다중 안테나 시스템의 공동 연산 처리를 위해 signal processing 전력이 증가하므로, 일부 기지국의 전원을 끈 후 CoMP를 수행하기 위해서는 백홀 전력 및 증가하는 signal processing 전력을 추가로 고려해야 한다.

<그림4>의 예시와 같이 기지국1의 전원을 끄더라도 단말1은 기지국2와 기지국3의 CoMP를 통해 서비스 할 수 있다. 이와 같이 CoMP와 기지국 온-오프 스위칭을 결합한 연구들이 발표되었다 [18][19]. [18]은 육각형 셀 구조에서 켜져 있어야 할 기지국의 비율(33%, 50%, 57%)에 따라 비활성화되는 기지국의 패턴을 정해 놓고 패턴에 따라 셀 간 CoMP 방식도 정해 놓은 후, 각 패턴 별 outage 확률을 분석하고 에너지 절감 효과를 시뮬레이션을 통해 보여 주었다. 하지만 일반적인 셀 설치 시나리오나 유동적으로 변하는 트래픽 변화에 적응이 힘들고, 백홀 전력을 고려하지 않았다. [19]는 CoMP시 백홀 전력과 증가하는 signal processing 전력을 고려하였다. 기지국의 전원을 끄더라도 주변의 켜진 기지국들의 전력 증가 없이 CoMP를 활용하여 단말을 서비스하는 기법을 제시하였으며, 이를 통해 spectral efficiency 뿐만 아니라 에너지 효율도 증가함을 보였다.

2. 캐리어 집성

캐리어 집성 기술은 더 높은 전송률을 달성할 수 있는 LTE-A 시스템의 핵심 기술 중 하나이다.

캐리어 집성은 최대 20 MHz의 컴포넌트 캐리어(component carrier, CC)를 최대 5개를 집성함으로써 100 MHz까지의 대역폭을 지원 할 수 있다. 이를 통해 단말은 동시에 하나 또는 그 이상의 CC를 동시에 사용할 수 있다. 캐리어 집성 기술과 기지국 온-오프 스위칭을 결합한 연구도 발표되었다[20]. [20]에서는 캐리어 집성에 적합한 기지국의 전력 소모 모델을 제시하였고, 기지국 간 협력을 통해 클러스터 전체의 트래픽 양을 측정하여 그 양에 따라 클러스터 내부 기지국들의 전원과 CC 자원

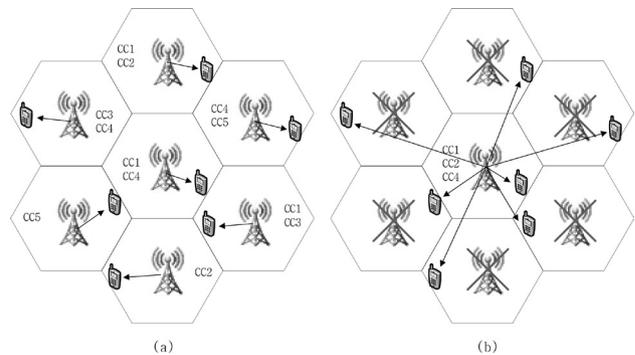


그림 5. 캐리어 집성 환경에서 기지국의 온-오프 스위칭: (a) 기지국별 CC 스케줄링, (b) 기지국 비활성화 후 CC 스케줄링

할당을 결정하는 알고리즘을 제안하였다. 클러스터 내부의 트래픽 양이 많다면 <그림5(a)>와 같이 모든 기지국의 전원을 켜고 각 기지국 별로 CC 스케줄링을 하고, 트래픽 양이 적다면 <그림5(b)>와 같이 클러스터 중앙에 위치한 기지국만 전원을 켜고 전송 전력을 높임으로써 클러스터 내부의 모든 단말을 서비스 할 수 있도록 CC 스케줄링을 수행한다.

III. 릴레이 네트워크

일반적으로 셀 경계에 위치한 사용자는 기지국과의 먼 거리와 옆 셀에 의한 간섭 때문에 서비스 품질이 매우 떨어진다. 이를 극복하기 위해 추가적인 기지국 설치가 논의될 수 있지만 설치 비용이 높고 빈번한 핸드오버 문제를 야기할 수 있기 때문에 값싼 릴레이를 셀 가장자리에 설치함으로써 셀 경계 사용자들의 서비스 품질을 향상시키는 협력 통신에 대한 연구가 각광받고 있다. 릴레이 네트워크에서 온-오프 스위칭은 크게 두 가지로 나뉘는데, 하나는 <그림6(a)>와 같이 사용률이 낮은 릴레이의 전원을 오프하는 방법이고, 다른 하나는 <그림6(b)>와 같이 기지국의 전원을 오프한 후, 비활성화된 기지국과 통신하던 단말은 옆 셀 기지국과의 릴레이 통신을 통해 서비스 받는 방법이다. 다음 단락에서 각각의 방법에 대해 자세히 알아보겠다.

[21]에서는 단일 셀 환경에서 각 릴레이의 커버리지에 포함된 단말의 수를 기반으로 릴레이를 켜고 끄는 두 가지 방법을 제안하였다. 하나는 릴레이를 거치지 않고 기지국과 직접적으로 통신하는 것보다 릴레이를 켜서 서비스하는 것이 에너지 소모 측면에서 더 이득이 되는 단말의 수를 결정하고, 그 수 이상의 단말이 커버리지 안에 존재하는 릴레이를 켜는 방법이다. 다른 하나는 릴레이를 켜고 끝 때 핸드오버 등으로 인한 온-오프 스위칭 비용을 고려하여 MDP (Markov decision process) 문제를 형성하고 단말 수 별로 최적의 policy를 찾는 방법이다.

[22]에서는 릴레이 네트워크 환경에서 기지국의 온-오프 스

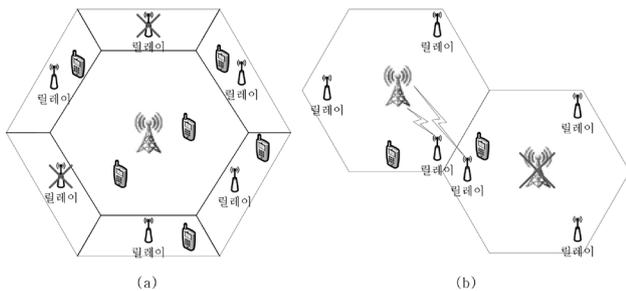


그림 6. 릴레이 네트워크에서 온-오프 스위칭: (a) 릴레이 비활성화, (b) 기지국 비활성화

위칭과 기지국-릴레이 간 동적 접속을 동시에 다뤘다. 기지국의 온-오프 스위칭과 접속 문제를 동시에 푸는 것은 어렵기 때문에, 기지국의 트래픽 로드 합이 최소가 되도록 우선 기지국-릴레이 간 접속을 결정한다. 이는 기지국에 남은 자원의 양을 최대화하여 주변 기지국들이 비활성화되더라도 핸드오버된 단말들의 트래픽을 수용할 수 있게 하기 위함이다. 다음으로 기지국의 온-오프 스위칭을 결정하는 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 성능 평가를 통해 트래픽 로드가 낮을 때 에너지 소모 측면에서 최대 40%의 이득이 있음을 보였다. 또한 트래픽 로드가 높더라도 에너지 소모 측면의 이득은 낮지만, 기지국-릴레이간 동적 접속으로 인해 QoS 보장 확률이 증가함을 보였다.

IV. 이종 네트워크

급증하는 모바일 트래픽을 분산하고 양질의 서비스를 제공하기 위해, 학계나 이동통신사들은 소형셀이나 무선랜을 매크로셀과 결합하여 활용하는 것을 고려하고 있다. 본고에서는 매크로셀과 소형셀이 결합한 네트워크와 매크로셀과 무선랜이 결합한 네트워크를 통칭하여 이종 네트워크라 일컫고, 각 네트워크 환경에서 기지국의 온-오프 스위칭 기법에 대한 연구들을 소개한다.

1. 매크로셀+소형셀

본고에서 고려하는 매크로셀+소형셀 이종 네트워크 환경은 <그림7>과 같다. 매크로셀은 전체 시스템에서 커버리지 홀이 발

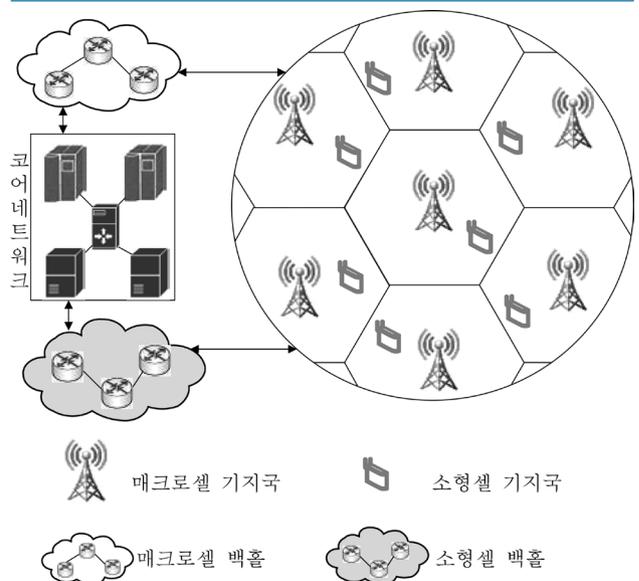


그림 7. 매크로셀+소형셀 이종 네트워크 환경

생하는 것을 막는 역할을 하여 서비스 중단이 발생하는 것을 미연에 방지한다. 소형셀은 기존에 펌토셀(femto-cell), 피코셀(pico-cell)과 같은 이름으로 불리던 개념들을 포함하는 집합으로써, 시스템의 용량 증대용으로 주로 사용된다. 소형기지국의 개수가 증가하면 트래픽 변화에 따라 접속된 단말이 없는 소형기지국이 발생할 수 있으므로, 해당 소형기지국을 동적으로 비활성화시켜 에너지 소모를 줄이는 연구들이 발표되었다[23][24][25].

[23]에서는 소형기지국이 사용되지 않는 경우에 전원을 오프하여 에너지 소모를 절감하는 SLEEP 알고리즘을 제안하였다. 또한 소형기지국의 온-오프 스위칭 제어 주체에 따라 세가지 전략을 소개하였는데 그 때 주체는 각각 단말, 소형기지국, 코어 네트워크이다. [24]에서는 코어 네트워크가 주체가 되어 소형기지국의 활성화/비활성화를 제어하는 알고리즘을 제안하였다. 매크로셀 커버리지 내 모든 단말들의 트래픽 정보와 위치 정보를 기반으로 MDP 문제를 형성하고 에너지 소모를 최소화하기 위한 최적의 소형기지국 온-오프 policy를 구했다. 하지만 코어 네트워크를 주제로 한 중앙집중형 온-오프 제어는 단말의 트래픽 양이나 위치 정보 피드백을 필요로 하는데 이는 상당한 시그널링 오버헤드를 야기한다. [25]에서는 각 소형기지국이 주체가 되는 분산적인 소형기지국 온-오프 제어를 제안하였다. 각 소형기지국은 커버리지 내에 서비스할 활성 단말이 없다면 전원을 오프하고, 주기적으로 깨어나 매크로셀-단말 간 신호를 감지하여 서비스해야 할 활성 단말을 발견하면 스스로 전원을 켜다.

2. 매크로셀+무선랜

무선랜은 매크로셀 네트워크에 비해 낮은 에너지 소모를 통해 더 높은 전송률을 제공할 수 있기 때문에 많은 데이터를 무선랜을 통해 offloading 시킨다면 더 많은 수의 기지국의 전원을 오프할 수 있고, 또한 에너지 소모를 줄일 수 있다. 하지만, 무선

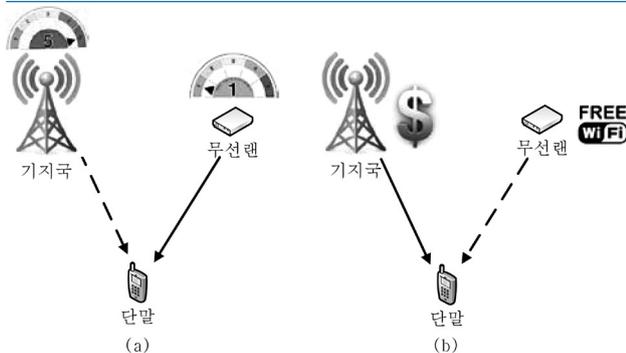


그림 8. 매크로셀+무선랜 환경에서 네트워크 선택:
(a) 에너지 효율 관점, (b) 네트워크 사업자 수입 관점

랜은 무료망이기 때문에 매크로셀 네트워크 데이터 중 대부분이 무선랜을 통해 offloading된다면 매크로셀 네트워크의 무선 사업자들은 수입이 상당히 감소한다. 따라서 <그림8(a)>와 같이 에너지 효율 관점에서는 무선랜을 선택하는 것이, <그림8(b)>와 같이 네트워크 사업자의 수입 관점에서는 매크로셀 네트워크를 선택하는 것이 유리하다. 즉, 에너지 소모와 네트워크 수입 사이에는 트레이드오프 관계가 성립하게 되고, 이를 반영한 연구가 필요하다.

[26]에서는 에너지-수입 사이의 트레이드오프 관계를 반영하는 전체 비용 함수를 정의하고 최적의 활성 기지국 집합과 단말 접속을 구하는 문제를 동시에 다루었다. 매크로셀 네트워크 기지국의 전원을 켜고 끄는 시간 간격은 몇 시간 간격으로 상당히 길다고 가정하고, 이에 반해 단말 접속은 그보다 훨씬 짧은 시간 간격으로 동작한다고 가정한다. 이러한 가정에 기반하여 형성된 최적화 문제를 두 개의 부분 문제로 쪼개어, 단말 접속 문제에 대해서는 최적의 에너지 효율적인 접속 policy를 도출하고 기지국의 온-오프 스위칭 문제에 대해서는 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다.

V. 결론 및 향후 연구

본고에서는 다양한 네트워크 환경에서 기지국의 온-오프 스위칭을 통해 에너지를 절약하는 연구 동향에 대해 알아보았다. 매크로셀 네트워크 환경에서 트래픽 변화에 따라 사용률이 낮은 기지국의 전원을 적응적으로 켜고 끄는 연구를 소개하였고, CoMP, 캐리어 집성과 같은 차세대 통신 기술을 적용시켰을 때의 기지국 온-오프 스위칭 연구를 살펴보았다. 릴레이 네트워크 환경에서는 사용률이 낮은 릴레이의 전원을 끄거나, 비활성화된 기지국으로 인해 발생하는 커버리지 홀을 메우기 위한 기지국-릴레이 간 접속을 결정하는 연구를 소개하였다. 매크로셀+소형셀 이중 네트워크에서는 제어 주체에 따른 소형기지국의 온-오프 스위칭 기법을 다뤘고, 매크로셀+무선랜 이중 네트워크에서는 에너지-수입 간 트레이드오프를 고려한 기지국의 온-오프 기법을 살펴보았다.

향후 연구로는 기지국의 온-오프 상태를 변화시킬 때 소모되는 에너지를 고려하는 연구가 필요하고, 기존 연구가 상향링크나 하향링크 중 하나의 관점에서만 다루고 있으나 상향링크와 하향링크를 동시에 다루는 연구가 필요하다. 또한 매크로셀+소형셀+무선랜 이중 네트워크 등 더 다양한 네트워크 환경에서 기지국의 온-오프 스위칭을 통한 에너지 절약에 대한 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] Cisco systems Inc., "Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2012–2017," White paper, Feb. 2013.
- [2] A. Fehske, G. Fettweis, J. Malmudin, and G. Biczok, "The global footprint of mobile communications: The ecological and economic perspective," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 8, pp. 55–62, Aug. 2011.
- [3] 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, June 2011.
- [4] C. Peng, S.-B. Lee, S. Lu, H. Luo, and H. Li, "Traffic-driven power saving in operational 3G cellular networks," in *Proc. ACM MobiCom*, Sep. 2011, pp. 121–132.
- [5] L. Chiaraviglio, D. Ciullo, M. Meo, and M. A. Marsan, "Energy-aware UMTS access networks," in *Proc. WPMC*, pp. 1–5, Sep. 2008.
- [6] M. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, and M. Meo, "Optimal energy savings in cellular access networks," in *Proc. IEEE ICC*, June 2009, pp. 1–5.
- [7] S. Zhou, J. Gong, Z. Yang, Z. Niu, and P. Yang, "Green mobile access network with dynamic base station energy saving," in *Proc. ACM MobiCom*, vol. 9, no. 262, pp. 10–12, Sep. 2009.
- [8] C. Peng, S.-B. Lee, S. Lu, and H. Luo, "GreenBSN: Enabling energy-proportional cellular base station networks," to appear in *IEEE Trans. Mobile Comput.*, 2014.
- [9] A. Conte, A. Feki, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, M. Meo, and M. Marsan, "Cell wilting and blossoming for energy efficiency," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 18, no. 5, pp. 50–57, Oct. 2011.
- [10] A. Bousia, E. Kartsakli, L. Alonso, and C. Verikoukis, "Dynamic energy efficient distance-aware base station switch on/off scheme for LTE-advanced," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1532–1537, Dec. 2012.
- [11] S. Lee, H. Hwang, and Y. Yi, "Cooperation for green cellular networks: The perspective of revenue of mobile network operator and energy saving," in *Proc. KICS JCCI*, May 2011, pp. 1–3.
- [12] C. Hasan, E. Altman, and J.-M. Gorce, "The coalitional switch-off game of service providers," in *Proc. IEEE GROWN*, Oct. 2013, pp. 223–230.
- [13] C.-Y. Chang, W. Liao, and D. Shiu, "On the coverage preservation problem in green cellular networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Dec. 2012, pp. 3496–3501.
- [14] 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.
- [15] E. Oh, K. Son, and B. Krishnamachari, "Dynamic base station switching-on/off strategies for green cellular networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 2126–2136, May 2013.
- [16] X. Weng, D. Cao, and Z. Niu, "Energy-efficient cellular network planning under insufficient cell zooming," in *Proc. IEEE VTC*, May 2011, pp. 1–5.
- [17] Z. Niu, "Tango: Traffic-aware network planning and green operation," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 18, no. 5, pp. 25–29, Oct. 2011.
- [18] F. Han, Z. Safar, W. S. Lin, Y. Chen, and K. J. R. Liu, "Energy-efficient cellular network operation via base station cooperation," in *Proc. IEEE ICC*, June 2012, pp. 4374–4378.
- [19] G. Cili, H. Yanikomeroglu, and F. R. Yu, "Cell switch off technique combined with coordinated multi-point (CoMP) transmission for energy efficiency in beyond-LTE cellular networks," in *Proc. IEEE ICC*, June 2012, pp. 5931–5935.
- [20] H. Chen, Y. Jiang, J. Xu, and H. Hu, "Energy-efficient coordinated scheduling mechanism for cellular communication systems with multiple component carriers," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 5, pp. 959–968, May 2013.
- [21] D. Quintas and V. Friderikos, "On dynamic policies to switch off relay nodes," in *Proc. IEEE ICC*, June 2012, pp. 2945–2950.
- [22] Z. Yang and Z. Niu, "Energy saving in cellular

networks by dynamic RS-BS association and BS switching,"IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 62, no. 9, pp. 4602-4614, Nov. 2013.

- [23] I. Ashraf, F. Boccardi, and L. Ho, "Sleep mode techniques for small cell deployments,"IEEE Commun. Mag., vol. 49, no. 8, pp. 72-79, Aug. 2011.
- [24] L. Saker, S. E. Elayoubi, R. Combes, and T. Chahed, "Optimal control of wake up mechanisms of femtocells in heterogeneous networks,"IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 30, no. 3, pp. 664-672, Apr. 2012.
- [25] M. Wildemeersch, T. Q. S. Quek, C. H. Slump, and A. Rabbachin, "Cognitive small cell networks: Energy efficiency and trade-offs,"IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 9, pp. 4016-4029, Sep. 2013.
- [26] S. Kim, S. Choi, and B. G. Lee, "A joint algorithm for base station operation and user association in heterogeneous networks,"IEEE Commun. Lett., vol. 17, no. 8, pp. 1552-1555, Aug. 2013.

약 력



김 선 욱

2007년 서울대학교 공학사
2014년 서울대학교 공학박사
2014년~현재 LG전자 차세대통신연구소
선임연구원
관심분야: 무선 자원 관리, 이종 네트워크,
에너지 효율적 네트워크