

멀티 셀 멀티 채널 셀룰러 네트워크의 전력 절약 효과

곽정호^o, 손규호*, 이윤, 정송

한국과학기술원 전기 및 전자공학과

*서던캘리포니아대학 전자공학과

Greening effects on multi-cell multi-channel cellular networks

Jeongho Kwak^o, Kyuho Son*, Yung Yi and Song Chong

Department of Electrical Engineering, KAIST

*Dept. of Electrical Engineering, University of Southern California

E-mail: jh.kwak@netsys.kaist.ac.kr, kyuho.son@usc.edu, {yiyung, songchong}@kaist.edu

요 약

최근 네트워크 Greening 에 대한 관심이 높아지면서, 네트워크 성능을 어느 정도 유지하면서 전력소모를 최소화하는 연구들이 많이 진행되어 왔다. 정보통신 (ICT) 산업은 매우 많은 양의 에너지를 사용하는 산업 중 하나이고, 셀룰러 네트워크, 그 중에서도 셀룰러 기지국의 에너지 사용량은 상당히 높은 비중을 차지하고 있다. 기지국에서 소모하는 전송전력은 20W 정도로 상당히 낮지만, 기지국 전력소모 모델로부터 전송전력을 적게 사용하는 것으로 전체 전력을 상당히 낮출 수 있다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 멀티 셀 멀티 채널 셀룰러 네트워크에서 일정한 전송 전력 예산을 가지고 있을 때, 전송 전력을 상당히 낮추더라도 성능 열화가 작음을 보이고, 그 전송 전력 예산을 최적으로 각 subchannel 에 분배한다면, 동일한 성능을 낼 때, 상당한 양의 전력절감효과를 보일 수 있음을 확인한다.

1. 서론

최근 CO₂ 배출에 따른 환경오염과 천연자원의 고갈로 인해, 국가마다 CO₂ 배출량을 일정 수준 이하로 낮추기 위한 노력을 기울이고 있다 [1]. 따라서 가까운 미래에 정부는 국내 산업 전반에 걸쳐 에너지 소모를 줄일 것을 요구할 것으로 예상된다. 정보통신 (ICT) 산업은 상당히 많은 양의 에너지를 사용하는 산업 중 하나이다. 특히, 셀룰러 네트워크 산업은 정보통신 산업의 25%의 에너지를 소모하고, 셀룰러 기지국 (BS)은 셀룰러 네트워크 산업의 60~80%의 에너지를 소모하고 있다 [2].

언뜻 보았을 때, 기지국의 전송전력 (10-20W)은 전체 기지국에서 사용되는 전력 (500-2000W)에 비해 상당히 작기 때문에 기지국의 전송전력을 조절하는 것이 전체 기지국의 전력절감에 효과가 미미할 것으로 보이지만, Arnold [3]가 제시한 기지국 전력 소모 모델로부터 전송전력이 전체 전력에 선형적으로 비례하기 때문에 매크로 기지국의 경우 10W의 전송전력을 줄이는 것으로 234W의 전체전력 절감의 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

모든 셀에서 동일한 주파수 대역을 사용하는 멀티 셀 네트워크에서는 셀간 간섭이 네트워크 성능

에 중요한 영향을 미친다. 본 논문에서는 이러한 네트워크 환경과 주어진 사용자간 공평성 기준 하에서 네트워크 성능을 최적화하는 전송전력 조절과 사용자 선택 알고리즘을 제안하고, 제안한 알고리즘을 사용하였을 경우, 전송전력 조절을 하지 않았을 경우에 대비하여 전송전력 절감효과가 얼마나 나타나는지를 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 시스템 모델

멀티 셀, 멀티 채널, slotted 시간 환경에서 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 하향 링크를 고려한다. 그리고 BS는 사용자에게 보내고자 하는 데이터가 무한대로 있고 사용자들의 위치는 각 셀 내에 고정되어 있다고 가정한다. 또한 각 사용자는 하나의 기지국에서만 서비스 받는다고 가정한다.

N 개의 기지국과 K 명의 사용자, 그리고 S 개의 subchannel 을 가정한다. 각각은 $N = \{1, \dots, N\}$, $K = \{1, \dots, K\}$, $S = \{1, \dots, S\}$ 의 벡터로 표현된다. K_n 은 기지국 n 에 association 되어 있는 사용자들의 집합이다. 그리고 $t=0,1,\dots$ 인 time-slotted 시스템을 가정하고, 한 타임슬롯 안에는 채널이 변하지 않고, 각 기지국은 한 타임슬롯과 각 subchannel 에 한 명의 사용자만 서비스할 수 있다고 가정한다. P_s^n 은 기지

*본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원 사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2011-(C1090-1111-0011))

국 n 의 subchannel s 에 할당되는 전송전력이다. 사용자 k 가 기지국 n 의 subchannel s 로부터 받는 전송률은 다음과 같이 표현된다.

$$r_s^{k,n}(p_s^k) = \frac{B}{S} \log_2 \left(1 + \frac{1}{\Gamma} \text{SINR}_s^{k,n}(p_s^k) \right) \quad (1)$$

B 와 Γ 는 각각 대역폭과 이상적인 Shannon 의 용량 공식을 보정해 주는 SINR gap to capacity 를 나타낸다.

2. 동일 전송전력 할당의 전력 절약 효과

전송 전력 조절을 통한 전력 절약 효과를 살펴보기 이전에 모든 기지국의 모든 subchannel 에서 동일한 전력을 사용하는 방식의 전력절약 효과를 살펴 보도록 한다. 먼저, *greening effect* 를 기지국의 전송 전력을 줄이지 않았을 때 대비 전송전력을 줄였을 때, 유지되는 사용자의 상대적인 성능의 비율로 정의한다. 비록 우리가 기지국의 전송 전력을 상당히 낮추더라도 네트워크의 동작점이 그림 2-(a) 그래프의 간섭 제한 영역 (Interference limited region)에서 동작하거나, 2-(b) 그래프의 큰 SINR 영역에서 동작한다면, 상대적으로 작은 성능 열화를 기대할 수 있다. 즉, 사용자 별로 높은 *greening effect* 를 달성할 수 있다. 그림 1 의 멀티 셀 환경에서 양 극단의 환경을 가지고 있는 셀 center 와 셀 edge 에 분포되어 있는 사용자들을 고려해 보자. 일반적으로 셀 edge 에 분포되어 있는 사용자는 주변 셀로부터 받는 간섭량이 커서 잡음전력량에 비해 훨씬 높다. 따라서 그림 2-(a) 그래프의 간섭 제한 영역에서 동작할 것이고, 따라서 높은 *greening effect* 를 달성할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 반면에 셀 center 에 분포되어 있는 사용자는 2-(a) 그래프에서 셀 edge 에 분포되어 있는 사용자에 비해 상대적으로 간섭 제한 영역에서 동작하지 않는다 하더라도 사용자가 속한 셀의 기지국과 가까운 이유로 기지국으로부터 받는 신호의 세기가 크기 때문에 큰 SINR 영역에서 동작할 것이고, 따라서 역시 높은 *greening effect* 를 달성할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

3. 셀간 간섭관리 알고리즘

기지국마다 동일한 전력 예산을 두고, 전력 예산을 줄일 때, 셀간 간섭을 고려하여 각 subchannel 의 전송전력을 조절하고 사용자를 선택하는 알고리즘을 제안한다. 우리는 다음과 같은 최적화 문제를 세울 수 있다.

$$\max \sum_{k \in K} U_k(R_k), \quad \text{s.t.} \quad \sum_{s \in S} p_s^n \leq \beta P^{n,max} \quad (2)$$

$U_k(\cdot)$ 함수는 사용자 k 의 효용함수로 미분가능하고, concave 한 연속함수이다. 또한 R_k 는 사용자 k 의 시간평균 전송률이다. 우리의 목적은 주어진 사용자들 간 공평성 기준 하에, 각 기지국마다 전송전력 예산 제한을 두고, 네트워크 내의 모든 사용자들의

공평성 기준에 따른 효용함수 값의 합을 최대화 하

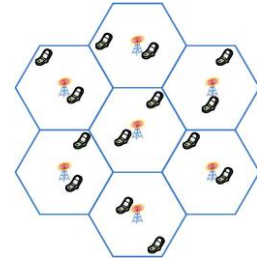


그림 1. 멀티 셀 셀룰러 네트워크의 토폴로지

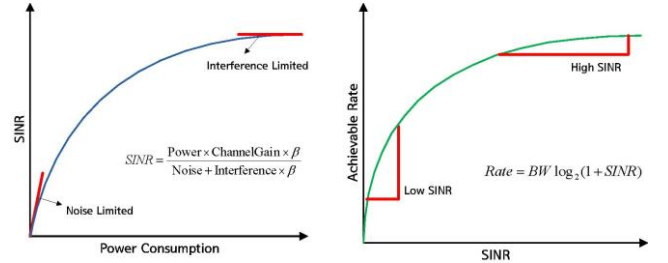


그림 2. (a) SINR 과 전력소모 (b) Achievable rate 과 SINR

도록 매 타임슬롯마다 각 subchannel 에 전송전력을 할당하고, 사용자를 선택하는 것이다. 주어진 long-term 최적화 문제 (2)을 stochastic gradient-based technique [4]을 사용하여 다음과 같은 타임슬롯마다의 최적화 문제로 변환할 수 있다.

$$\max_{p, I} \sum_{k \in K} w_k \sum_{s \in S} r_s^{k,n}(p_s^n, I_s^{k,n}), \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K_n} I_s^{k,n} \leq 1, \quad \forall n \in N, \forall s \in S, \quad (4)$$

$$\sum_{s \in S} p_s^n \leq \beta P^{n,max} \quad (5)$$

w_k 는 사용자 k 의 효용함수의 미분값이다. (4) 식은 long-term 문제가 타임슬롯마다의 문제로 변환되면서 매 타임슬롯마다 기지국 n 의 subchannel s 에 한 명의 사용자만이 선택될 수 있음을 나타낸다.

이제 매 타임슬롯별로 전력을 할당하고, 사용자를 선택하는 알고리즘을 제시한다. 가능한 전력할당과 사용자 선택의 수가 무수히 많기 때문에 주어진 전력할당하에 사용자를 선택하는 방법과 사용자가 선택되었을 때, 전력할당을 결정하는 방법을 순환적으로 사용자 선택과 전력할당의 해가 수렴할 때까지 반복한다. 또한 사용자 선택이 결정된 상태에서라도 타임슬롯마다의 최적화 문제의 목적함수 (3)이 convex 함수이거나 concave 함수가 아니기 때문에 정확한 전역 최적해를 구하기 위해서 전력값을 모든 범위에서 검색해야만 한다. 따라서 전역 최적해를 구하는 것은 높은 복잡도를 가지기 때문에, 목적함수 (3)을 concave 근사화하여 근사 최적해를 구한다. Concave 근사화 하는 방법은 [5]를 참고하면 된다. Concave 근사화된 최적화 문제는 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 조건을 통해서 닫힌 전력 할당해 (6)을 구할 수 있다. 주어진 전력할당 하에서 사용자 선택문제는 각 셀 별 문제로 분리할 수 있게 되고,

따라서 각 기지국에서 그 셀 내의 사용자들 중, $w_k \cdot r_s^{k,n}(p_s^n)$ 이 최대인 사용자를 선택하면 된다.

전력할당 & 사용자 선택

$$p_s^n = \left[\frac{w_n / \ln 2}{\lambda_n + t_s^n} - \frac{\sum_{m \neq n} g_s^{n,m} p_s^m + \sigma_s^n}{g_s^n} \right]^+, \quad (6)$$

$$t_s^n = \sum_{m \neq n} w_m a_s^{n,m} - \sum_{m \neq n} w_m \frac{\ln 2}{\sum_p g_s^{m,p} p_s^p + \sigma_s^m}, \quad (7)$$

$$a_s^{m,n} = \frac{|h_s^{n,m}|^2 / \ln 2}{\sum_{q \neq n} |h_s^{n,q}|^2 p_s^q + \sigma_s^n}, \quad \lambda_n \left(\sum_{s \in S} p_s^n - P^{n,max} \right) = 0, \quad (8)$$

$$I_s^{k,n} = \begin{cases} 1, & \text{if } k = \operatorname{argmax}_{k \in K_n} w_k r_s^{k,n}(p_s) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

5. 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 환경

각 셀의 반지름이 2km 인 19 개의 균일한 육각형 셀을 고려한다. 한 셀 내에는 10 명의 사용자가 균일하게 분포되어 있고, 각 기지국은 기본적으로 최대 20W 의 전송전력 예산을 가지고 있고, 8 개의 subchannel 을 사용한다. 시뮬레이션에 사용된 metric 은 GAT (Geometric Average Throughput)로, GAT 를 최대화하는 것은 주어진 목적함수를 최대화하는 것과 같다.

5.2 시뮬레이션 결과

<그림 3>을 보면, (a)와 (b) 각각 대부분의 사용자에 대해 β 가 1.0 일 때와 β 가 0.5 일 때의 GAT 의 비가 80%, 75% 이상으로 전송전력 절감에 비해 성능열화가 작기 때문에, 대부분의 사용자가 높은 *greening effect* 를 달성하고 있음을 확인할 수 있다. 셀간 간섭 관리의 *greening effect* 가 동일 전력 할당 방식보다 낮은 사용자가 많은 이유는 셀간 간섭관리를 함으로써 셀 edge 사용자가 받는 셀간 간섭의 영향이 작아지기 때문에, 셀 edge 사용자의 그림 2-(a) 그래프에서의 동작점이 상대적으로 덜 간섭 제한 영역에 위치하기 때문이다.

<그림 4>는 동일 전력 할당 방식에 비해 셀간 간섭 관리 방식이 동일한 GAT 성능을 달성하면서 92%의 전력 절감 효과를 낼 수 있음을 보여준다. 동일한 전송 전력 예산에서 셀간 간섭 관리 방식의 GAT 이득 (β 가 1.0 일 때 68.9%, β 가 0.1 일 때 44.8%)보다 동일한 GAT 성능 하에 전력 절감 효과가 훨씬 더 큰 이유는 멀티 셀 네트워크의 *greening effect* 때문이다. 즉, 사용 가능한 전력량이 감소하는 것 보다 실제 GAT 성능이 천천히 감소하기 때문에 GAT 이득보다 훨씬 더 높은 전력 절감 효과를 얻을 수 있는 것이다.

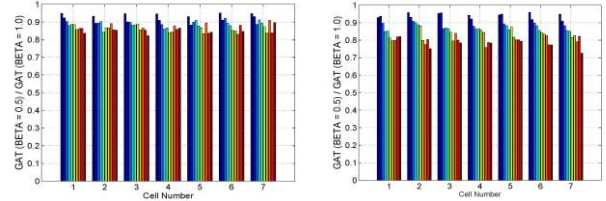


그림 3. 사용자 별 *greening effect* 비교

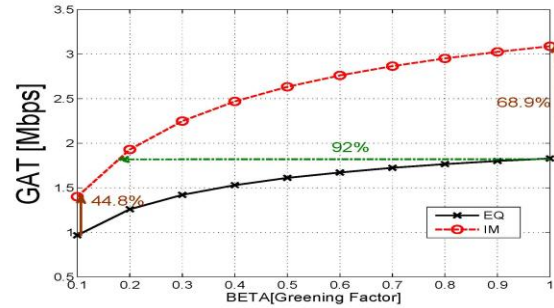


그림 4. 동일 전력 할당 방식과 셀간 간섭 관리 방식의 GAT 비교

6. 결론

본 논문에서는 셀 간 동일한 주파수 대역을 사용하는 멀티 셀 멀티 채널 셀룰러 네트워크에서 모든 subchannel 이 동일한 전력할당을 사용하는 경우와 사용자들의 전송률을 늘리기 위해 셀간 간섭을 줄이는 방법을 사용하는 경우 모두 충분한 *greening effect* 를 달성한다는 것을 보였다. 시뮬레이션 결과를 보면, 셀간 간섭 관리 방식은 동일 전력 할당 방식에 비해 edge 사용자가 받는 셀간 간섭이 줄어들어 간섭 제한 영역을 상대적으로 벗어나므로 *greening effect* 가 약간 작지만, 그렇다 하더라도 간섭관리에 의한 이득을 충분히 얻을 수 있기 때문에 동일 전력 할당 방식에 비해 92%의 전송전력 절감 효과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

7. 참고 문헌

- [1] "Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change," <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>.
- [2] M. Marsan, L., Chiaraviglio, D. Ciullo, and M. Meo, "Optimal energy savings in cellular access networks," in Proc. of the International Workshop on GreenComm, Dresden, Germany, June 2009, pp. 1-5.
- [3] O. Arnold, F. Richter, G. Fettweis, and O. Blume, "Power consumption modeling of different base station types in heterogeneous cellular networks," in Proc. of the Future Network & Mobile Summit, Florence, Italy, June 2010, pp. 1-8.
- [4] A. 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.
- [5] P. Tsiaflakis, M. Diehl, and M. Moonen, "Distributed spectrum management algorithms for multiuser DSL networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 10, pp. 4825-4843, Oct. 2008