

스몰-셀 네트워크에서 에너지 효율 향상을 위한 메시지 전달 기반 분산 사용자 연계

정 현 우*, 김 윤 희^o

Distributed User Association Based on Message Passing for Energy Efficiency in a Small-Cell Network

Hyun Woo Jeong*, Yun Hee Kim^o

요 약

본 레터는 매크로-셀 위에 스몰-셀이 중첩된 셀룰러 망에서 전력 소모를 최소화하도록 사용자와 기지국을 연계하고 동작 스몰-셀 기지국을 결정하는 문제를 고려한다. 상기 문제의 해를 분산적으로 구하는 메시지 전달 알고리즘을 유도하고, 모의실험을 통해 기존 방식 대비 제안 알고리즘의 우수성을 보인다.

Key Words : Energy efficiency, Message passing, Small cell network, User association

ABSTRACT

This letter considers a problem of associating users to small-cell base stations (sBSs) and selecting a set of operating sBSs in a small-cell network to minimize the power consumption. We derive a message passing algorithm to obtain a solution distributively. Simulation results show that the proposed algorithm is superior to the conventional schemes.

I. 서 론

3GPP는 4세대 LTE 시스템의 성능 향상을 위해 장기 계획을 가지고 스몰-셀 성능 개선 연구를 진행하

고 있다. 현재까지는 기존의 LTE 구조를 크게 바꾸지 않으면서도 성능을 향상시키는 방법을 고려했으나, 추후 새로운 주파수 대역과 새로운 전송 기술 등을 고려하여 다방면에서 성능 개선 연구가 진행될 것으로 예상되고 있다^[1].

스몰-셀 성능 개선의 한 방법으로 매크로-셀 위에 스몰-셀을 중첩배치하고 매크로-셀은 사용자의 이동성 관리를 주로 담당하는 반면 스몰-셀은 고용량 데이터 전송을 주로 담당하는 방법이 있다. 이 경우 스몰-셀 간의 잦은 핸드오버를 방지하면서 무선 채널 환경을 개선하여, 사용자 위치에 상관없이 데이터 수신 품질을 향상시키고 네트워크 용량을 증대할 수 있다.

본 레터에서는 스몰-셀이 중첩된 매크로-셀에서 네트워크 전력 효율을 높이기 위해 사용자 환경에 따라 동작 스몰-셀 기지국을 선정하고 해당 기지국과 사용자를 효율적으로 연계하는 방법을 연구한다. 구체적으로, 최근 분산 자원 할당에 성공적으로 적용되고 있는 메시지 전달 프레임워크^[2-3] 적용하여 동작 기지국 선정과 사용자 연계를 수행하는 분산 알고리즘을 유도하고 그 성능을 검증한다.

II. 시스템 모형과 문제 정의

매크로-셀 내에 N 스몰-셀이 중첩해 있고, 총 K 사용자가 있는 셀룰러 네트워크를 고려한다. 그림 1은 $N=3$ 이고 $K=4$ 인 네트워크를 보인 것이다. 매크로-셀 기지국 mBS는 셀 내 모든 사용자를 관리하면서 필요시 데이터 송수신을 지원한다. 한편 스몰-셀 기지국 sBS는 데이터 송수신만을 지원한다. 각 기지국 위 변수 $x_i \in \{0,1\}$ 는 기지국 i 의 ($i=0$ 일 때 mBS를 $i=1,2,\dots,N$ 일 때 sBS를 가리킴) 상태 변수로, $x_i=1$ 이면 동작 상태이고 0이면 대기 상태임을 가리킨다. 기지국 i 와 사용자 k 를 잇는 선 위의 변수 $x_{ki} \in \{0,1\}$ 는 사용자 k 가 기지국 i 로부터 데이터를 받을 때만 1인 연계 변수이다.

본 연구의 목적은 각 사용자 k 의 요구 전송률 r_k 를 만족시키면서 네트워크 전력 소모를 최소화하는 동작 sBS를 선정하고 각 사용자를 동작 sBS에 연계하는 것이다. 이 때 소모 전력으로 기지국이 동작 상태에서 추가로 필요한 전력 P_i 와 사용자 k 로의 데이터 전송

* 본 연구는 2012년도 정부(교육부) 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2012R1A1A2040091).

• First Author : Department of Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University, jhw5529@khu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Department of Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University, yheekim@khu.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2015-07-233, Received July 22, 2015; Revised August 3, 2015; Accepted August 3, 2015

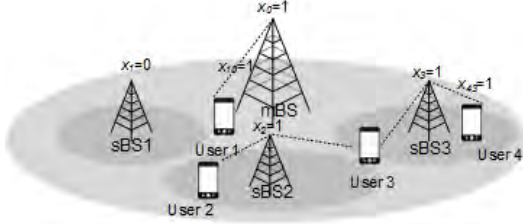


그림 1. 스몰-셀이 중첩된 매크로-셀 시스템 모형.
Fig. 1. System model for a macro-cell network overlaid with small-cells.

시 필요한 전력 P_{ki} 만을 고려한다⁴⁾.
위 문제를 공식화하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & \min \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^U P_{ki} x_{ki} + \sum_{k=1}^U P_{k0} x_{k0} + \sum_{i=1}^N P_i x_i \right\} \\ & \text{subject to} \\ & \text{(c1)} \quad \sum_{i \in B(k)} x_{ki} = 1, \quad k = 1, 2, \dots, K, \\ & \text{(c2)} \quad \sum_{k \in U(i)} x_{ki} = K_i, \quad K_i \leq K_{\max} x_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \\ & \text{(c3)} \quad x_{ki}, x_i \in \{0, 1\}. \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $B(k)$ 는 사용자 k 와 연계 가능한 후보 기지국 집합이고, $U(i)$ 는 sBS i 와 연계 가능한 후보 사용자 집합이다. 또한, $K_i \in \{0, 1, \dots, K_{\max}\}$ 는 sBS i 에 연계된 사용자 수로, 최대 K_{\max} 사용자까지 연계될 수 있다. 조건 (c1)은 각 사용자가 $N+1$ 기지국 가운데 하나와 반드시 연계되어야 함을, 조건 (c2)는 각 sBS가 최대 K_{\max} 사용자를 지원하고 사용자가 한 명이라도 연계 되면 동작 상태를 나타낸다.

III. 분산 메시지 전달 알고리즘

최적화 문제 (1)은 순열조합문제이므로 해를 직접 구하기가 매우 어렵다. 이에 본 절에서는 그래프 상의 메시지 전달 프레임워크를²⁾ 바탕으로 구현이 가능한 분산 알고리즘을 유도한다.

알고리즘 유도를 위해 그림 1에 해당하는 그래프 모형을 그림 2에 제시하였다. 문제 (1)에서의 변수 x_i 와 x_{ki} 는 원으로, 제한 조건 (c1)과 (c2)에 해당하는 인수 Q_k 와 R_i 는 정사각형으로 표시하였다. 여기서 인수는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} Q_k(X_{k^*}) &= \begin{cases} -\infty, & \text{if } \sum_{i \in B(k)} x_{ki} \neq 1, \\ -P_{k0} x_{k0}, & \text{otherwise,} \end{cases} \\ R_i(X_{i^*}) &= \begin{cases} -\infty, & \text{if } \sum_{k \in U(i)} x_{ki} > K_{\max} x_i, \\ -P_i x_i, & \text{otherwise.} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

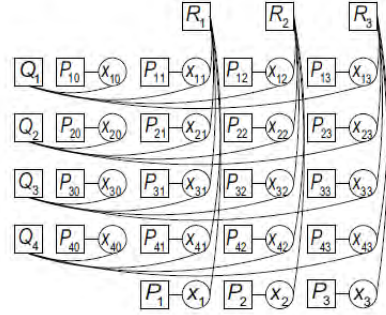


그림 2. 그림 1에 대응하는 그래프 모형.
Fig. 2. Graphical model for Fig. 1.

여기서 $X_{k^*} = \{x_{ki} : i \in B(k)\}$ 는 Q_k 에 연계된 변수들, $X_{i^*} = \{x_i, x_{ki} : k \in U(i)\}$ 는 R_i 에 연계된 변수들의 집합이다. 각 변수 x_{ki} 가 목적 함수에 기여하는 값을 $S_{ki}(x_{ki}) = -P_{ki} x_{ki}$ 로 정의하면 문제 (1)은

$$\begin{aligned} & \max \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^U S_{ki}(x_{ki}) + \sum_{k=1}^K Q_k(X_{k^*}) + \sum_{i=1}^N R_i(X_{i^*}) \right\} \\ & \text{subject to } x_{ki}, x_i \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (3)$$

로 다시 쓸 수 있다. 해당 문제는 AP (affinity propagation) 문제와²⁾ 비슷하므로, 해를 구하는 알고리즘을 메시지 전달 형태로 구할 수 있다.

이를 위해 먼저 그림 2에서 노드 A 에서 노드 B 로 전달되는 메시지를 $\mu_{A \rightarrow B}(\cdot)$ 로 정의하면 그래프 상의 메시지를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_{ki} &= \mu_{x_{ki} \rightarrow R_i}(x_{ki} = 1) - \mu_{x_{ki} \rightarrow R_i}(x_{ki} = 0), \\ \alpha_{ki} &= \mu_{R_i \rightarrow x_{ki}}(x_{ki} = 1) - \mu_{R_i \rightarrow x_{ki}}(x_{ki} = 0), \\ \beta_{ki} &= \mu_{x_{ki} \rightarrow Q_k}(x_{ki} = 1) - \mu_{x_{ki} \rightarrow Q_k}(x_{ki} = 0), \\ \eta_{ki} &= \mu_{Q_k \rightarrow x_i}(x_{ki} = 1) - \mu_{Q_k \rightarrow x_i}(x_{ki} = 0), \\ \rho_i &= \mu_{x_i \rightarrow R_i}(x_i > 0) - \mu_{x_i \rightarrow R_i}(x_i = 0) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 메시지 ρ_{ki} 는 (β_{ki}) 인수 R_i 에 (Q_k) 의해 sBS i 가 사용자 k 와 연계하려는 선호도를 나타내고, α_{ki} 는 (η_{ki}) 사용자 k 가 sBS i 와 연계하지 않으려는 성질을 나타낸다. 인수가 하나만 연계된 x_i 와 x_{k0} 에 대한 메시지는 $\rho_i = -P_i$ 와 $\beta_{k0} = -P_{k0}$ 로 고정이고, 인수 R_i 와 Q_k 에 연계된 변수 x_{ki} , $i > 0$ 에 대한 메시지는 다음과 같이 업데이트한다.

$$\begin{aligned} \rho_{ki} &= \eta_{ki} - P_{ki}, \\ \beta_{ki} &= \alpha_{ki} - P_{ki}, \\ \eta_{ki} &= \min \left[-\max_{j \in B(k) \setminus \{0, i\}} \beta_{kj}, P_{k0} \right], \\ \alpha_{ki} &= \min \left[-\{\text{rnk}(\{\rho_{bi}\}_{b \in U(i) \setminus k}, K_i)\}_-, \right. \\ & \quad \left. \sum_{l=1}^{K_i-1} \{\text{rnk}(\{\rho_{bi}\}_{b \in U(i) \setminus k}, l)\}_+ - P_i \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\{x\}_- = \min(x, 0)$, $\{x\}_+ = \max(x, 0)$ 이고, $\text{rnk}(S, l)$ 는 집합 S 에서 l 째로 큰 원소이다. 식 (5)의 β_{ki} 와 η_{ki} 를 ρ_{ki} 에 대입하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\rho_{ki} = \min\{\min_{j \in B(k) \setminus \{0, i\}} (P_{ki} - \alpha_{kj}), P_{k0}\} - P_{ki} \quad (6)$$

각 기지국과 사용자와의 연계는 $b_{ki} = \alpha_{ki} + \rho_{ki}$ 로 얻고 ($b_{ki} > 0$ 이면 $x_{ki} = 1$), sBS i 의 상태는

$$b_i = \max_{k \in U(i)} \rho_{ki} + \sum_{l=2}^{|U(i)|} \{\text{rnk}(\{\rho_{ki}\}_{k \in U(i)}, l)\}_+ - P_i \quad (7)$$

로 얻는다 ($b_i > 0$ 이면 $x_i = 1$). 유도한 알고리즘을 요약하면 표 1과 같다.

표 1 분산 메시지 전달 알고리즘.
Table 1. Distributive message passing algorithm.

초기화: $\alpha_{ki} = 0, k = 1, 2, \dots, K; i = 0, 1, \dots, N$
메시지가 모두 수렴하거나 최대 반복 횟수에 도달할 때까지 1-3를 반복한다.
1. 사용자: 사용자 k 는 기지국 후보 $i \in B(k)$ 에 대해 식 (6)에 따라 ρ_{ki} 를 업데이트하고 기지국으로 다시 전달한다.
2. 기지국: 기지국 i 는 사용자 후보 $k \in U(i)$ 에 대해 식 (5)에 따라 α_{ki} 를 업데이트하고 사용자에게 다시 전달한다.
3. 결정: 모든 기지국은 b_i 와 b_{ki} 를 계산하여 기지국 상태와 사용자 연계 상태를 결정한다.

IV. 성능 평가 및 결론

제안하는 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 모의실험 조건은 다음과 같다. 매크로-셀은 반지름이 3km인 원으로 가정하고 그 중심에 mBS가 위치한다. K 사용자는 매크로-셀 안에 고른 분포를 가진다. sBS는 $N = 6, 18$ 일 때를 고려하고 주파수 재사용 패턴이 7인 경우와 19인 경우와 같은 셀 모양을 고려하였다. 동작 상태 시 기지국 소모 전력은 피코셀에 대한 $P_i = 2.5W$ 를 적용하고 P_{ki} 는 $r_k = \log_2(1 + g_{ki}P_{ki}/\sigma^2) = 1$ bps/Hz를 만족하도록 설정하였다. 여기서, g_{ki} 는 거리가 d_{ki} km인 사용자 k 와 기지국 i 사이의 채널 이득이며, 새도우잉 S_{σ_s} 을 포함한 LTE 경로 손실 모형 $128.1 + 37.6 \log_{10} d_{ki} + S_{\sigma_s}$ [dB]로 생성하였다. 새도우잉 표준편차는 8 dB이고 잡음전력은 $\sigma^2 = -104.5$ dBm이다. sBS당 최대 사용자 연계는 $K_{\text{max}} = 10$ 을 가정하였다.

그림 3은 제안하는 알고리즘의 성능을 복잡도가 비슷한 기존의 탐욕 (Greedy) 알고리즘과 K-중앙값

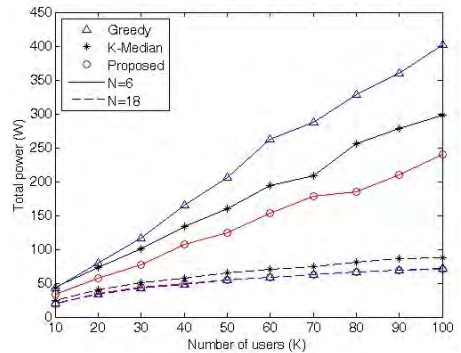


그림 3. 사용자 수에 따른 네트워크 전력 소모량.
Fig. 3. Network power consumption for the number of users.

(K-Median) 알고리즘 성능과 비교한 것이다. 제안하는 메시지 전달 알고리즘은 기존 방식과 성능이 비슷하거나 향상된 성능을 제공함을 볼 수 있다. 기지국 수가 $N=18$ 과 같이 많은 경우 경로 손실 영향이 적어 사용자와 기지국간의 연계보다 동작하는 기지국 수에 의해 성능이 결정됨으로 제안 방식과 기존 방식이 모두 비슷한 성능을 보인다. 그러나, 기지국 수가 $N=6$ 과 같이 작아지면 기지국 동작 상태와 사용자 연계 상황에 따라 전력 소모 차이가 커지기 때문에 목적에 맞는 해를 잘 찾아주는 제안 기법이 기존 기법보다 성능이 우수함을 볼 수 있다.

References

- [1] S. W. Jeon and W. Y. Shin, "Dynamic opportunistic interference alignment for random-access small-cell networks," *J. KICS*, vol. 39C, no. 11, pp. 675-681, Nov. 2014.
- [2] B. J. Frey and D. Dueck, "Clustering by passing messages between data points," *Science Mag.*, vol. 315, no. 5814, pp. 972-976, Feb. 2007.
- [3] J. Fan, et al., "Joint user pairing and resource allocation for LTE uplink transmission," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 8, pp. 2838-2837, Aug. 2012.
- [4] G. Auer, et al., "Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown," *Earth Project Deliverables*, INFISO-ICT-247733, D2.3, 2010.