

에너지 효율적인 셀룰러 네트워크를 위한 플로킹 모델 기반 분산 송신전력제어 알고리즘

최현호*

Distributed Transmit Power Control Algorithm Based on Flocking Model for Energy-Efficient Cellular Networks

Hyun-Ho Choi*

Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Institute for Information Technology Convergence, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea

요 약

셀룰러 네트워크를 운용하는데 드는 에너지의 대부분은 기지국에 의해서 소비되므로 에너지 효율적인 셀룰러 네트워크를 위하여 기지국의 송신 전력을 줄이는 것이 필요하다. 본 논문에서는 셀룰러 네트워크의 에너지 효율을 향상시키기 위한 목적으로 플로킹(flocking) 모델에 기반한 분산 송신전력제어 알고리즘을 제안한다. 새 무리에서 각각의 새가 자신의 속도를 인접한 이웃 새들의 평균 속도로 맞춰 날아가는 것과 같이, 제안 방안에서는 각 셀의 단말의 전송률이 인접 셀의 같은 채널을 사용하는 단말의 평균 전송률과 같도록 서빙 기지국의 송신 전력을 제어한다. 모의실험 결과 제안한 분산 송신전력제어 알고리즘은 플로킹 모델과 같은 수렴 속성을 가지며, 셀 간 간섭이 증가함에 따라 낮은 아웃티지 확률을 유지하면서도 기지국의 전력 소모를 효과적으로 줄일 수 있음을 보여준다. 이를 통하여 제안 방안은 기지국 수가 20개 이상일 때 셀룰러 네트워크의 에너지 효율을 기존 방식 대비 두 배 이상 향상시킨다.

ABSTRACT

Most of the energy used to operate a cellular network is consumed by a base station (BS), and reducing the transmission power of a BS is required for energy-efficient cellular networks. In this paper, a distributed transmit power control (TPC) algorithm is proposed based on the flocking model to improve the energy efficiency of a cellular network. Just as each bird in a flock attempts to match its velocity with the average velocity of adjacent birds, in the proposed algorithm each mobile station (MS) in a cell matches its rate with the average rate of the co-channel MSs in adjacent cells by controlling the transmit power of its serving BS. Simulation results show that the proposed TPC algorithm follows the same convergence properties as the flocking model and also effectively reduces the power consumption at the BSs while maintaining a low outage probability as the inter-cell interference increases. Consequently, it significantly improves the energy efficiency of a cellular network.

키워드 : 송신전력제어, 플로킹 모델, 에너지 효율, 에너지 효율적인 셀룰러 네트워크

Key word : Transmit power control, Flocking model, Energy efficiency, Energy-efficient cellular networks

Received 12 August 2016, Revised 16 August 2016, Accepted 20 August 2016

* Corresponding Author Hyun-Ho Choi(E-mail:hhchoi@hknu.ac.kr, Tel:+82-31-670-5297)

Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Institute for Information Technology Convergence, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.10.1873>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

수년간 발전을 거듭해온 이동통신 서비스에 의해 수많은 기지국이 설치되었다. 셀룰러 네트워크를 운용하는데 드는 에너지의 대부분은 기지국에서 소비가 된다. 따라서 서비스 사업자들의 운용비용을 줄이기 위해서는 기지국의 에너지 소모량을 줄여야 한다. 기지국은 무선 전송, 기저대역 처리, 송전선 등에서 전력을 소모하는데, 소모 전력의 80%는 무선 전송 부분에서 발생한다고 알려져 있다[1]. 따라서 무선 전송에 드는 에너지는 주로 RF 신호의 증폭에서 발생하므로 송신 전력을 줄이면 네트워크 에너지 소비를 현저히 줄일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 에너지 효율적인 셀룰러 네트워크를 위하여 기지국의 송신 전력을 조절하는 방안을 고려했다[2].

송신단에서 소모되는 에너지량과 수신단에서 얻는 신호의 품질 간에는 트레이드오프(tradeoff) 관계가 있다고 알려져 있다[3-10]. 이러한 트레이드오프 관계를 고려하여 기존 많은 연구에서는 송신 파워를 조절하여 요구되는 수신 신호의 품질을 보장하면서 에너지 소비를 최소화하려는 시도를 하였다. 셀 브리딩(cell-breathing) 또는 셀 주밍(cell-zooming)이라고 불리는 장기적인(long-term) 송신전력제어 알고리즘이 트래픽 부하량과 셀 용량의 변화에 따라 기지국의 에너지 소모를 최소화하기 위해 개발되었다[4, 5]. 이들 방식은 트래픽 부하량이 높은 셀의 경우 기지국의 송신 파워를 줄여 셀을 작게 만들고, 부하량이 적은 이웃 셀의 송신 파워를 높여 초과된 트래픽을 넘겨준다. 또한 신호대 간섭 및 잡음 비(signal-to-interference-plus-noise ratio; SINR) 기반의 송신전력제어 알고리즘이 제안되었다[6, 7].

이는 수신 노드의 SINR을 만족시키는 한도 내에서 송신 파워를 최대한 낮춰서 전송하는 방식으로 인접한 다른 노드에게 간섭을 줄이면서도 송신 노드의 파워 소모를 줄일 수 있다. 비슷하게 채널 상태 정보(channel state information; CSI) 기반의 송신전력제어 방식이 제안되어, 페이딩 환경에서 비트 에러율(bit error rate; BER)을 만족시키면서 송신 파워의 최소화를 꾀하였다[8]. 또한 멀티셀 네트워크 환경에서 전체 네트워크 용량을 최대화하기 위한 기지국 송신 파워의 최적화가 연구되었으며, 이를 통해 트래픽의 서비스 품질(quality-

of-service; QoS)을 보장하면서 네트워크 에너지 효율을 향상시키는 방안이 제안되었다[9]. 추가적으로 송신 전력제어와 자원 할당을 동시에 최적화하는 문제가 멀티셀 네트워크, multiple input and multiple output (MIMO) 안테나 기반 셀룰러 네트워크, 이종의 계층적 셀룰러 네트워크 환경에서 다루어졌으며 이를 통해 네트워크 용량과 QoS를 향상시킬 수 있었다[10].

하지만 지금까지의 대부분의 송신전력제어 알고리즘은 수신단에서 SINR이나 BER과 같은 QoS를 보장하면서 송신 파워를 최소화하는데 목적을 두고 연구되어 왔다. 이들은 적당히 낮은 수준의 간섭 환경에서는 만족스러운 성능을 제공하지만, 높은 셀 간 간섭이 존재하는 환경에서는 송신 파워의 증가 및 최대치의 사용을 요구하면서도 QoS를 만족시키지 못하는 아웃티지(outage)를 발생시킨다. 따라서 일정 SINR을 요구하는 파워 최소화 기반의 접근 방식은 간섭이 많은 환경에서는 적절한 목표 SINR 값의 설정이 매우 중요한데, 이를 위해서는 모든 단말과 기지국간 많은 양의 채널 정보의 공유가 필요하며 중앙 집중형으로 동작하여 높은 계산 복잡도를 갖는다[11]. 이는 실제 셀룰러 네트워크 환경에서 사용하기에는 많은 오버헤드와 비효율성을 내포하고 있어 현실적으로 동작 가능한 송신전력제어 기법이 필요하다.

본 논문에서는 계산 복잡도와 오버헤드를 낮추기 위하여 자연계 새 떼의 나는 모습을 모델링한 플로킹(flocking) 모델을 적용한 분산형 송신전력제어 알고리즘을 제안한다. 플로킹 모델은 단순하고 분산적으로 동작하면서 좋은 수렴 속성을 보이므로 이를 적용한 제안 방안도 중앙 제어 없이 낮은 복잡도로 동작하면서 같은 수렴 속성을 갖는다. 제안 방안은 셀 간 간섭이 존재하는 환경에서 동일 채널 단말들의 전송률의 최소값이 최대가 되도록 기지국의 송신전력을 낮추고 수신 신호의 아웃티지 확률을 감소시켜 네트워크 에너지 효율을 극대화시킬 수 있다.

논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 고려하는 셀룰러 네트워크의 시스템 모델을 기술한다. III장에서 플로킹 모델과 제안하는 분산 송신전력제어 알고리즘에 대해서 자세히 설명하고, IV장에서는 시뮬레이션 결과를 보여준다. V장에서 본 연구의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

그림 1은 셀이 두 개 일 때 고려하는 셀룰러 네트워크의 시스템 모델을 보여준다. 고려하는 시스템은 OFDMA 방식을 기반으로 하며 모든 셀은 동일한 주파수를 재사용한다. 실제로는 N 개의 셀로 구성된 네트워크를 고려하여 사전 스케줄링에 의해 각 셀에서 동시에 같은 채널을 할당받아 사용하는 단말이 N 개 존재한다고 가정한다[11]. 즉, 임의의 사전 스케줄링을 통하여 셀 내 사용자들에게 무선 자원할당이 사전에 이루어지며, 같은 자원을 사용하는 각 셀의 단말은 하나씩 존재한다고 가정한다. 단말 i 는 기지국 i 에 의해 서비스를 받으며, P_i 는 기지국 i 의 송신 전력 값, n_i 는 단말 i 의 잡음 전력 값, G_{ij} 는 기지국 j 로부터 단말 i 로의 채널 이득을 나타낸다.

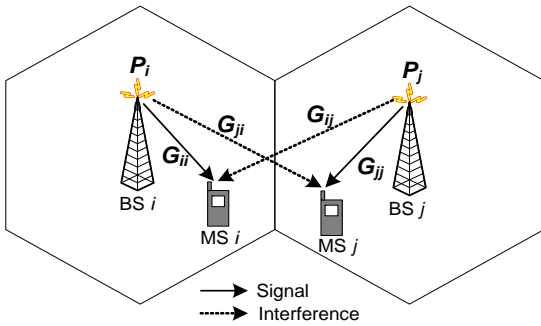


Fig. 1 System model for the two-cell case

단말 i 의 SINR은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_i = \frac{G_{ii}P_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ij}P_j + n_i}, \quad 1 \leq i \leq N \quad (1)$$

새는(Shannon) 용량으로부터 단위 대역폭 당 단말 i 의 전송률은 다음과 같이 주어진다.

$$R_i = \log_2(1 + \gamma_i) \quad [\text{b/s/Hz}] \quad (2)$$

또한 단말 i 의 아웃티지는 단말 i 에서 수신되는 신호의 SINR γ_i 가 요구되는 SINR γ_{req} 보다 낮을 확률로 다음과 같이 정의된다.

$$Q_i := \Pr\{\gamma_i < \gamma_{req}\} \quad (3)$$

마지막으로 단말 i 의 에너지 효율은 단위 에너지 및 대역폭 당 에러 없이 전송 가능한 데이터 비트수로 정의된다. 따라서 아웃티지의 발생은 전송 에러를 유발하므로 단말의 에너지 효율은 다음과 같이 표현된다[12].

$$E_i := \frac{(1-Q_i)R_i}{P_i} \quad [\text{b/Hz/J}] \quad (4)$$

III. 플로킹 모델 기반 분산 송신전력제어 알고리즘

3.1. Cucker-Smale 플로킹 모델

새 떼가 무리지어 날 때 각각의 새들은 주변 이웃 새들의 속도에 따라 자신의 속도를 스스로 맞추어 나가는데, 이는 결국 모든 새들의 속도가 같아지는 결과로 이어진다. 이러한 새 떼가 나는 행동 양식을 모델링한 대표적인 모델은 Cucker-Smale 플로킹 모델로 다음과 같이 표현된다[13].

$$v_i(t+1) - v_i(t) = \frac{\lambda}{N} \sum_{j=1}^N \psi(|x_j - x_i|)(v_j(t) - v_i(t)) \quad (5)$$

여기에서 $v_i(t)$ 는 시간 t 에서 i 번째 새의 속도를 나타내며, N 은 전체 새의 개수, $\lambda \leq 1$ 는 결합 강도이며, x_i 는 i 번째 새의 위치를 나타낸다. ψ 는 두 새 사이의 거리에 의존하는 통신 반경 함수로 일반적으로 두 새의 거리 $|x_j - x_i|$ 가 새의 가시거리보다 작으면 1로 코다면 0으로 설정된다. 따라서 플로킹 모델은 지역적인 평균(local-averaging) 알고리즘으로 해석될 수 있다. 플로킹 알고리즘은 모든 새들의 속도를 동일하게 맞추으로써 새의 최소 속도를 최대화하고 새들의 에너지 소모를 줄일 수 있다. 따라서 플로킹 알고리즘은 새들 간에 공기역학적인 상호작용이 존재할 때 낙오 없이 모든 새들이 가장 빨리 목적지에 도착하는 가장 좋은 방법으로 알려져 있다[2].

3.2. 제안 송신전력제어 알고리즘

새 무리에서 각 새들이 최소 속도를 갖는 새의 속도

를 최대화하기 위하여 분산적으로 자신의 속도를 주변 세들의 속도와 맞춰나가는 플로킹 모델을 적용하여, 제안 방식은 모든 단말의 전송률이 같아지도록 기지국의 송신 파워를 제어한다. 이는 셀 간 간섭이 존재하는 환경에서 기지국의 전력 소모를 줄이면서 단말의 최소 전송률을 최대화함으로써 아웃티지 확률을 줄일 수 있게 해주어 네트워크 전체 에너지 효율을 증대시킨다. 각 단말의 전송률은 자신의 서빙 기지국의 송신 파워 뿐만 아니라 주변 셀 기지국의 송신 파워와도 밀접하게 관련되므로, 모든 단말이 최종적으로 동일한 전송률을 갖도록 하려면 플로킹 모델과 반복 동작이 필요하다. 매 단계에서 각 단말은 이웃 기지국에서 방송되는 제어 정보로부터 다른 이웃 단말의 전송률을 인지하고 이들의 평균값으로 다음번 목표 전송률을 결정한다. 이후 각 단말은 이 목표 전송률을 자신의 서빙 기지국에게 알려주고, 이 값을 전달 받은 기지국은 목표 전송률을 달성하기 위한 송신 파워 값을 계산하여 이 값으로 다음 전송을 수행한다.

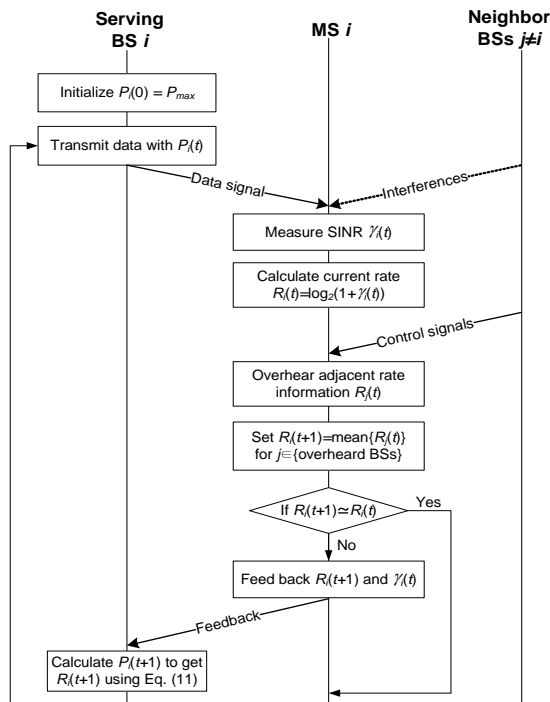


Fig. 2 Flow chart of the proposed transmit power control algorithm

이와 같이 분산 및 지역적으로 단말의 전송률을 평균화하는 동작은 더 이상 목표 전송률이 변하지 않을 때까지 (즉, 모든 단말의 전송률이 같아질 때까지) 반복된다. 이러한 동작 방식은 기지국간 관련 정보를 주고받아 중앙 노드에서 모든 정보를 가지고 각 기지국의 송신 전력 값을 계산하는 기존 중앙 집중형 방식대비 기지국간 정보 교환을 필요로 하지 않고 분산적으로 각 셀 내에서 송신 전력 값을 계산하기 때문에 복잡도가 훨씬 낮아진다.

제안하는 송신전력제어 알고리즘의 구체적인 동작 절차는 그림 2와 같으며 다음과 같은 순서로 동작한다.

- ① 기지국 i 는 초기에 송신 파워를 최대값 P_{max} 로 설정한다.
- ② 기지국 i 는 자신의 단말 i 에게 시간 t 에서 결정된 송신 파워 값 $P_i(t)$ 를 사용하여 패킷을 전송한다.
- ③ 단말 i 가 패킷을 수신하면 SINR γ_i 를 측정하고 현재 수신한 패킷의 전송률 $R_i(t)$ 를 식 (2)를 통하여 계산한다.
- ④ 단말 i 는 이웃 기지국 $j \neq i$ 가 방송하는 헤더 정보로부터 이웃 단말 j 의 전송률 $R_j(t)$ 를 엿듣는다.
- ⑤ 단말 i 는 다음 목표 전송률 $R_i(t+1)$ 을 다음과 같이 계산한다.

$$R_i(t+1) - R_i(t) = \frac{\lambda}{N} \sum_{j=1}^N \psi(|x_j - x_i|)(R_j(t) - R_i(t)) \quad (6)$$

이는 식 (5)와 같은 형태를 따르며 단지 차이점은 새의 속도 v 대신 단말의 전송률 R 이 사용된다는 점이다. 기지국 j 와 단말 i 가 엿듣기 가능 범위 내에 존재할 때 통신 반경 함수 ψ 는 1이 되며, 그렇지 않으면 0이 된다. 이와 같은 통신 반경 함수와 $\lambda = 1$ 을 사용할 때 식 (6)은 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$R_i(t+1) = \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} R_j(t) \quad (7)$$

여기에서 N_i 는 단말 i 가 엿들을 수 있는 이웃 기지국의 집합이며, $|N_i|$ 는 이 기지국들의 개수를 나타낸다. 식 (7)은 명백하게 제안 방식이 단말의 전송률에 대한 지역적인 평균 알고리즘을 취하고 있음을 알려준다.

- ⑥ 결정된 목표 전송률 $R_i(t+1)$ 과 현재 전송률 $R_i(t)$ 가

같다면 단말 i 는 이전 송신 파워를 유지하고 다음번 목표 전송률 및 수신 SINR 값을 서빙 기지국으로 피드백하지 않는다.

- ⑦ 하지만 그렇지 않다면 단말 i 는 다음 목표 전송률 $R_i(t+1)$ 및 수신 SINR 값 $\gamma_i(t)$ 를 서빙 기지국으로 피드백 한다.
- ⑧ 이들 값을 수신한 기지국 i 는 다음 관계식을 이용하여 목표 전송률 $R_i(t+1)$ 을 달성하기 위한 다음 송신 파워 $P_i(t+1)$ 을 결정한다.

$$\begin{aligned}
 R_i(t+1) &= \log_2(1 + \bar{\gamma}_i(t+1)) \\
 &= \log_2\left(1 + \frac{G_{ii}P_i(t+1)}{\sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ij}P_j(t) + n_i}\right) \quad (8) \\
 &= \log_2\left(1 + \frac{\gamma_i(t)}{P_i(t)} \cdot P_i(t+1)\right)
 \end{aligned}$$

여기에서 $\bar{\gamma}_i(t+1)$ 은 시간 $t+1$ 에서 단말 i 의 SINR 추정치이다. 이 식 (8)로 부터 시간 $t+1$ 에서 기지국 i 의 송신 전력 값이 다음과 같이 결정된다.

$$P_i(t+1) = \min\left[P_{\max}, \left(2^{R_i(t+1)} - 1\right) \frac{P_i(t)}{\gamma_i(t)}\right] \quad (9)$$

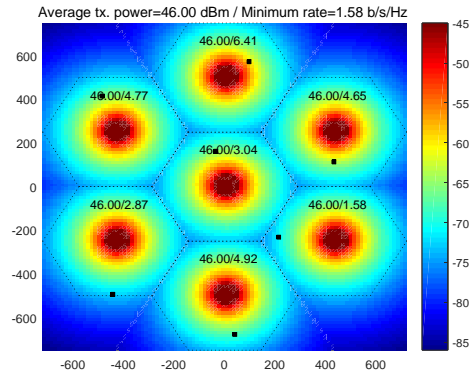
IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

표 1은 사용한 시뮬레이션 파라미터들을 보여준다. MATLAB을 사용하여 Monte Carlo 시뮬레이션 수행하였다. 네트워크 토폴로지는 기지국간 거리가 500 m인 육각형의 멀티셀 환경을 고려하였다. 단말은 각 셀에 랜덤하게 분포하며 최대 송신파워, 경로 손실, 페이딩 모델, 노이즈 값들은 모두 3GPP의 시뮬레이션 방법론을 따랐다[14]. 기지국의 최대 송신파워는 43 dBm으로 설정하였으며 단말에서 요구되는 SINR은 0 dB로 설정하였다.

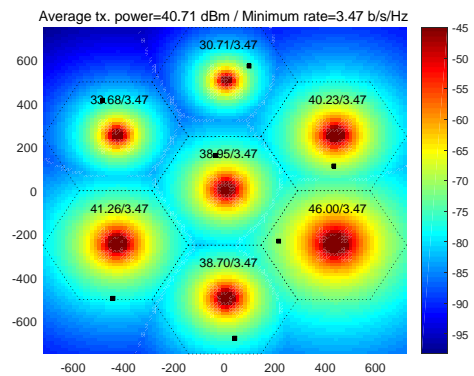
비교 방식으로 송신전력 제어 없이 최대 파워를 사용하는 maximum equal power 할당 방식과 목표 SINR을 설정하고 이를 만족시키도록 하는 SINR 기반 송신전력 제어 방식을 고려하였다[6, 7]. 이때 목표 SINR 값 θ 는 0, 3, 10 dB를 가정하였다.

Table. 1 Simulation Parameters

Parameter	Value
Cell layout	Hexagonal, one sector per cell
Number of BSs	3~20
Inter-BS distance	500 m
Maximum BS transmit power	46 dBm
Distance-dependent path loss	$128.1 + 37.6 \log_{10} R$ [dB], R in km
Shadowing model	Log-normal with standard deviation of 8 dB
Fast fading model	Rayleigh
Noise figure	9 dB
Channel bandwidth allocated to an MS	100 kHz
Required SINR (γ_{req})	0 dB
Coupling strength (λ)	1
Threshold for convergence check	10^{-4}
Simulation trials	10,000



(a)



(b)

Fig. 3 Distribution of received signal strength in two dimensions: (a) maximum equal power allocation and (b) proposed transmit power control algorithm

그림 3은 동일 최대 전력 할당 방식과 제안한 송신 전력제어 방식의 2차원 평면에서 수신된 신호의 강도를 보여준다. 각 셀의 검은색 점은 동일 채널을 사용하는 단말의 위치를 나타낸다. 각 셀마다 각 기지국에서 사용하는 송신 파워와 단말의 전송률이 표시되어 있다. 보는바와 같이 최대 송신 파워를 쓰는 경우에는 일정한 수신 신호 강도 분포를 보이면서 각 단말이 서로 다른 전송률을 갖지만, 제안 방식의 경우 다른 송신 파워를 사용하기 때문에 동적인 수신 신호 강도 분포를 가지면서 모든 단말이 서로 같은 전송률을 보인다. 이 경우 제안 방식은 기존 최대 파워를 사용하는 경우보다 5.29 유의 송신 파워를 덜 사용하면서도 단말의 최소 전송률을 1.58에서 3.47 b/s/Hz로 증가시키고 있음을 알 수 있다.

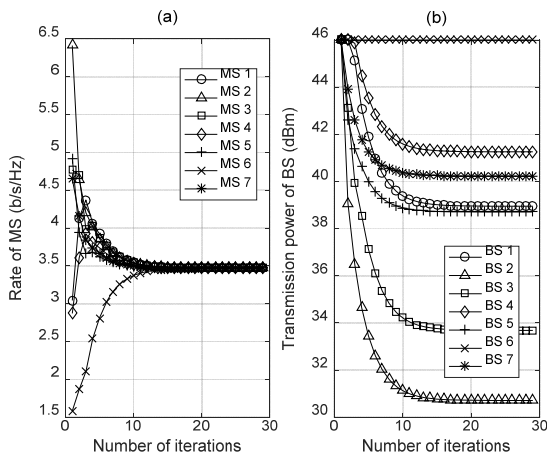


Fig. 4 (a) Rate of MS and (b) transmit power of BS vs. number of iterations

그림 4는 셀이 7개일 때 제안 방식에서 시간에 따른 각 노드의 전송률과 송신 파워의 변화를 보여준다. 시간의 흐름에 따라 모든 노드의 전송률은 같은 값으로 수렴하고, 송신 파워의 최대 차이는 일정 범위 내로 한정된다. 이는 플로킹 모델의 수렴 속성과 같은 결과를 보여주는 것이다. 수렴시 초기에 가장 좋은 전송률을 가졌던 단말 2의 기지국이 가장 낮은 파워를 사용하며, 가장 나쁜 전송률을 가졌던 단말 6의 기지국은 최대 송신 파워를 사용하게 된다. 즉, 좋은 링크 품질을 가진 단말들이 희생하여 송신 파워를 낮춰줌으로써 모든 단말의 전송률을 동일하게 됨을 알 수 있다.

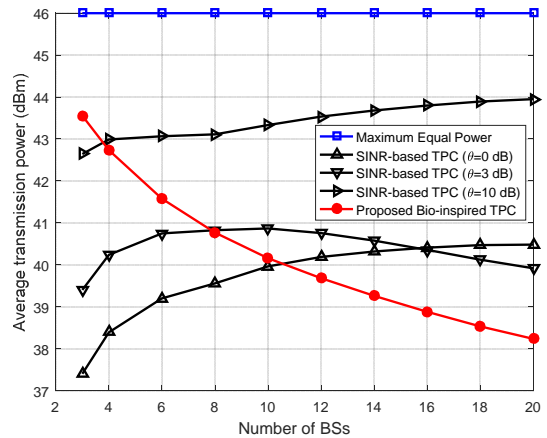


Fig. 5 Average transmission power vs. number of BSs

그림 5는 기지국 수에 따른 기지국의 평균 송신 파워를 보여준다. 셀 수가 증가할수록 셀 간 간섭이 증가하므로 간섭을 줄이기 위하여 제안 방식은 기존 방식보다 더 낮은 송신 파워를 사용하게 된다. 제안 방식은 간섭 수준에 따라서 적응적으로 송신 파워를 낮추기 때문에 간섭이 증가할수록 기존 다른 방안보다 더 낮은 전력 소비를 보인다. 반면 SINR 기반의 송신전력제어 방법은 높은 간섭 환경에서 더 센 송신 파워를 사용하며 적합한 목표 SINR 값이 간섭레벨에 따라 변함을 볼 수 있다.

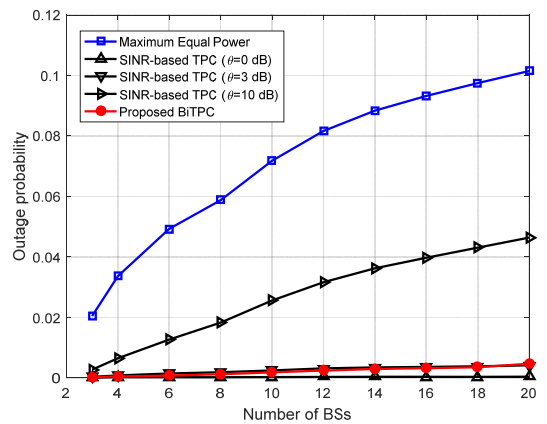


Fig. 6 Outage probability vs. number of BSs

그림 6은 기지국 수에 따른 아웃티지 확률을 보여준다. 목표 SINR(θ)이 0 dB인 경우에 가장 낮은 아웃티지

를 보이는데, 이는 목표 SINR이 요구되는 SINR 임계치와 같기 때문이다. 다음으로 제안 방안이 낮은 아웃티지 확률을 갖는다. 제안 방안은 간섭 레벨에 따라 송신 전력 제어를 수행하여 셀 간 간섭을 줄이면서 최소 전송률을 최대화하기 때문에 낮은 아웃티지 확률을 유지한다. 반면 다른 방법들은 간섭 증가시 높은 송신 파워를 사용하여 낮은 SINR을 가진 단말에게 심각한 간섭을 미치기 때문에 아웃티지 확률이 증가한다.

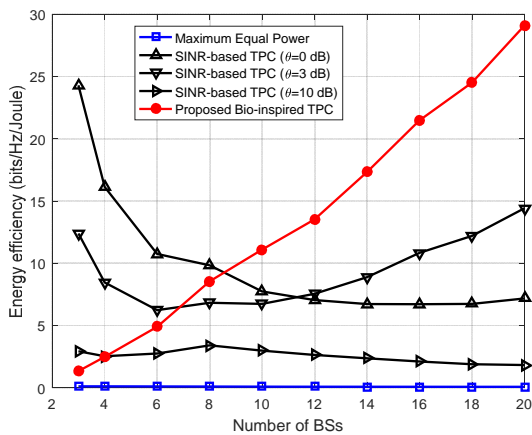


Fig. 7 Energy efficiency vs. number of BSs

그림 7은 기지국 수에 따른 에너지 효율 성능을 보여준다. 에너지 효율은 단위 에너지와 대역폭 당 에러 없이 보낼 수 있는 데이터 비트 수로 낮은 파워를 사용함에 따라서 아웃티지 발생이 적음에 따라서 값이 증가한다. 따라서 기지국 수가 증가함에 따라 송신 파워를 줄이면서도 낮은 아웃티지 확률을 유지하는 제안 방안이 기존 방식대비 선형적으로 증가하는 우수한 에너지 효율 성능을 보여준다. 송신전력 제어를 하지 않는 최대 송신 파워 할당 방식은 매우 낮은 에너지 효율을 보이며, SINR 기반의 송신전력제어 방식은 간섭이 증가할수록 낮은 에너지 효율을 보이면서 여전히 목표 SINR 값에 따라 성능이 서로 역전되는 현상을 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 새 무리가 에너지 효율적인 방법으로 날아다니는 행동 양식을 모방한 플로킹 모델을 기반으

로 셀룰러 네트워크에서 에너지 효율적인 분산형 송신 전력제어 알고리즘을 제안하였다. 제안 방식은 셀 간 간섭 환경에서 모든 동일 채널 단말의 전송률이 서로 같아지도록 송신전력을 제어한다. 이를 통해 기지국의 송신 전력을 줄이면서도 최소 전송률을 최대화하여 아웃티지 발생을 낮추고 단말의 에너지 효율을 기존 방식 대비 2배 이상 향상시킬 수 있었다. 제안 방식은 기본적으로 간단하고 오버헤드가 적은 플로킹 알고리즘을 기반으로 하고 있기 때문에 낮은 복잡도와 제어 오버헤드를 가지면서 좋은 수렴 특성을 보이므로 미래 대규모 셀룰러 네트워크 환경에서 유용하게 사용 가능하리라 예상된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (NRF-2016 R1C1B1016261).

REFERENCES

- [1] C.L. I, et al., "Toward green and soft: a 5G perspective," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2 pp. 66-73, Feb. 2014.
- [2] H. Choi and J. Lee, "A biologically inspired power control algorithm for energy-efficient cellular Networks," *MDPI Energies*, vol. 9, no. 3, pp. 1-16, Mar. 2016.
- [3] Y. Chen, S. Zhang, S. Xu, and G.Y. Li, "Fundamental trade-offs on green wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 30-37, June 2011.
- [4] S. Das, H. Viswanathan, and G. Rittenhouse, "Dynamic load balancing through coordinated scheduling in packet data systems," in Proc. *IEEE INFOCOM*, pp. 786-796, 2003.
- [5] Z. Niu, Y. Wu, J. Gong, and Z. Yang, "Cell zooming for cost-efficient green cellular networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 11, pp. 74-79, Nov. 2010.
- [6] M.R. Javan and A.R. Sharafat, "Efficient and Distributed SINR-Based Joint Resource Allocation and Base Station Assignment in Wireless CDMA Networks," *IEEE Trans. on*

- Communications*, vol. 59, no. 12, pp. 3388-3399, Dec. 2011.
- [7] L. Belke, T. Kesselheim, A. M.C.A. Koster, and B. Vocking, "Comparative study of approximation algorithms and heuristics for SINR scheduling with power control," *Theoretical Computer Science*, vol. 553, pp. 64-73, Oct. 2014.
- [8] P. Wang and P.Y. Kam, "Feedback Power Control with Bit Error Outage Probability QoS Measure on the Rayleigh Fading Channel," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 61, no. 4, pp. 1621 - 1631, Apr. 2013.
- [9] Y. Xi and E.M. Yeh, "Throughput Optimal Distributed Power Control of Stochastic Wireless Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 18, no. 4 pp. 1054-1066, Apr 2010.
- [10] Y. Kwon, T. Hwang, and X. Wang, "Energy-Efficient Transmit Power Control for Multi-Tier MIMO HetNets," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 10, pp. 2070-2086, Oct. 2015.
- [11] H. Choi and J. Lee, "Bio-Inspired Transmission Power Control for Green Base Station in Wireless Cellular Networks," in *Proc. International Conference on Future Information & Communication Engineering (ICFICE) 2016*, Da Nang, Vietnam, pp. 86-90, June 2016.
- [12] H. Choi, "Energy-Efficient Uplink Power Control Based on Flocking Model in Cellular Networks," *J. KICS*, vol. 41, no. 10, Oct. 2016.
- [13] F. Cucker and S. Smale, "Emergent behavior in flocks," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 52, no. 5, pp. 852-862, May 2007.
- [14] 3GPP, Technical specification group radio access network; further advancements for E-UTRA physical layer aspects (release 9). TR 36.814 v9.0.0, Mar. 2010.



최현호(Hyun-Ho Choi)

2001년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학사
2003년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학석사
2007년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학박사
2007년 3월 ~ 2011년 2월: 삼성종합기술원 전문연구원
2011년 3월 ~ 현재: 국립환경대학교 전기전자제어공학과 부교수
※관심분야 : 매체접속제어, 분산자원관리, 저전력 프로토콜, 생체모방 알고리즘, 차세대 이동통신 시스템