

셀룰러 네트워크에서 플로킹 모델 기반 에너지 효율적인 상향링크 전력 제어

최 현 호*

Energy-Efficient Uplink Power Control Based on the Flocking Model in Cellular Networks

Hyun-Ho Choi*

요 약

셀룰러 단말의 에너지 효율을 높이기 위하여 플로킹(flocking) 모델을 기반으로 상향링크 송신전력 제어 알고리즘을 제안한다. 플로킹 모델에서 각각의 새가 주변 새들의 평균 속도로 자신의 속도를 맞추어 나가는 것처럼, 각 셀의 단말은 주변 셀 동일 채널 단말들의 상향링크 전송률의 평균값과 자신의 상향링크 전송률이 같도록 송신 파워를 분산적으로 제어한다. 모의실험 결과 제안한 상향링크 송신전력제어 방법은 낮은 아웃티지 확률을 유지하면서 단말의 전력 소비를 효과적으로 낮추어 단말의 에너지 효율을 향상시킨다.

Key Words : Uplink power control, Flocking model, Energy-efficient cellular network

ABSTRACT

A distributed uplink power control algorithm based on flocking model is proposed to improve the energy efficiency of mobile station (MS) in cellular networks. As each bird in a flock matches its velocity with the average velocity of the adjacent birds, each MS in a cell matches its uplink rate with the average uplink rate of the co-channel MSs

in adjacent cells by controlling its transmission power. Results show that the proposed algorithm effectively reduces the power consumption in the MS, while maintaining a low outage probability, which eventually improves the energy efficiency of the MS.

I. 서 론

셀룰러 네트워크에서 단말의 전력 소모는 RF 신호 증폭에서 가장 크게 발생하므로 단말의 생존 시간을 늘리기 위해서는 단말의 송신 파워를 줄이는 것이 필요하다^[1]. 기존 연구들은 주로 셀 용량을 최대화하거나 아웃티지(outage)를 최소화하는 목적으로 중앙 집중형이나 부분 분산형으로 상향링크 송신전력 제어 방식이 제안되었다^[1,2]. 하지만 이들은 높은 계산 복잡도를 갖거나 큰 오버헤드를 발생시키며, 단말의 전력 소모는 크게 고려하지 않았다.

본 논문에서는 복잡도와 오버헤드를 낮추기 위하여 자연계 새 떼의 나는 모습을 모델링한 플로킹(flocking) 모델을 적용한 분산형 상향링크 전력 제어 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 셀간 간섭이 존재하는 환경에서 상향링크 전송률의 최소값이 최대가 되도록 단말의 송신전력을 낮추어 상향링크 전송률의 아웃티지 확률을 감소시키고 단말의 에너지 효율을 극대화시킨다.

II. 시스템 모델

N 개의 셀로 구성된 OFDMA 기반의 셀룰러 네트워크를 고려한다. 각 셀에는 한 개 이상의 상향링크 단말이 존재하여 같은 채널을 사용하여 동시에 전송하는 상향링크 단말이 총 N 개 존재한다고 가정한다^[2]. 단말 i 는 기지국 i 에 의해 서비스를 받으며, P_i 는 단말 i 의 송신 파워, n_i 는 기지국 i 의 노이즈 파워, G_{ij} 는 단말 j 에서 기지국 i 로의 채널 이득을 나타낸다. 그림 1은 두 셀이 존재할 때 시스템 모델을 보여준다.

단말 i 의 signal-to-interference-plus-noise ratio

* 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1C1B1016261)

• First Author : Hankyong National University, Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, and Institute for Information Technology Convergence, hhchoi@hknu.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2016-08-193, Received August 11, 2016; Reviewed August 31, 2016; Accepted September 1, 2016

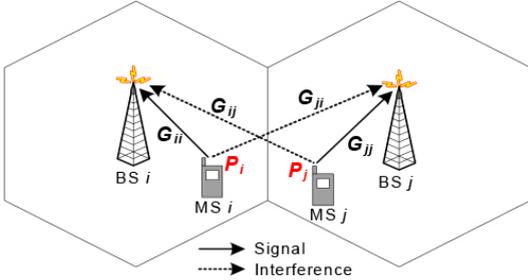


그림 1. 두 셀의 경우 시스템 모델
Fig. 1. System model for the two-cell case

(SINR)는 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 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 기지국 i 에서 수신되는 단말 i 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. 아웃티지의 발생은 전송 에러를 유발하므로 단말의 에너지 효율은 다음과 같이 표현된다^[1].

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

III. 제안하는 상향링크 전력 제어 알고리즘

새들이 무리지어 날 때 각 새들은 주변 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-Smale의 플로킹 모델로 다음과 같이 표현된다^[3].

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

여기에서 $v_i(t)$ 는 시간 t 에서 i 번째 새의 속도를 나타내며, N 은 전체 새의 개수, $\lambda \leq 1$ 는 결합 강도이

며, x_i 는 i 번째 새의 위치를 나타낸다. ψ 는 새들 간의 거리에 의존하는 통신 반경 함수로 두 새의 거리 $|x_j - x_i|$ 가 새의 가지거리보다 작으면 1로 아니면 0으로 설정된다. 따라서 플로킹 모델은 지역 평균(local-averaging) 알고리즘으로 해석될 수 있다.

플로킹 모델에서 새들이 각자의 속도를 주변 새들의 평균 속도로 맞춰나가는 것을 적용하여, 제안 방식은 각 셀의 단말의 상향링크 전송률이 주변 셀의 동일 채널 단말들의 상향링크 전송률의 평균값과 같아지도록 송신 파워를 분산적으로 제어한다. 각 단말의 전송률은 자신의 송신 파워 뿐만 아니라 주변 셀 단말의 송신 파워와도 관련되므로 모든 단말이 최종적으로 동일한 전송률을 갖도록 하려면 플로킹 모델과 같이 반복 동작이 필요하다. 매 단계에서 각 단말은 이웃 기지국에서 방송되는 제어 정보로부터 이웃 단말의 상향링크 전송률을 인지하고 이들의 평균값으로 다음 번 목표 전송률을 결정한다. 이후 각 단말은 이 목표 전송률을 달성하기 위한 송신 파워 값을 계산하여 이 값으로 상향링크 전송을 수행한다.

제안 방식의 자세한 동작 절차는 다음과 같다.

단말 i 는 최초 송신 파워를 P_{max} 로 설정한다.

단말 i 는 서빙 기지국 i 에게 시간 t 에서 결정된 송신 파워 $P_i(t)$ 를 사용하여 패킷을 전송한다.

기지국 i 가 패킷을 수신하면 SINR γ_i 를 측정하고 현재 상향링크 전송률 $R_i(t)$ 를 계산한다.

단말 i 는 이웃 기지국 j 가 방송하는 헤더 정보로부터 이웃 단말 j 의 전송률 $R_j(t)$ 를 엿듣는다.

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 형태로 새의 속도 v 대신 단말의 전송률 R 이 적용되었다. 기지국 j 와 단말 i 가 엿듣기 가능 거리 내에 있을 때 통신 반경 함수 $\psi=1$ 이고 $\lambda=1$ 임을 가정하면 식 (6)은 다음과 같이 지역 평균 알고리즘으로 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 집합으로 이 셀들 내에 위치한 단말들 간 식 (7)의 알고리즘이 수행된다.

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

같다면 단말 i 는 현재 송신 파워를 유지하고, 그렇지 않으면 목표 전송률 $R_i(t+1)$ 을 달성하기 위한 다음 송신 파워 $P_i(t+1)$ 을 결정한다.

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

여기에서 $\bar{\gamma}_i(t+1)$ 은 시간 $t+1$ 에서 단말 i 의 SINR의 추정치이다. 식 (8)로 부터 시간 $t+1$ 에서 단말 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

기지국간 거리가 500 m인 육각형의 멀티셀 환경을 고려한다. 단말은 각 셀에 랜덤하게 분포하며 이웃 기지국 정보의 엮들기 가능 거리는 기지국간 거리와 동일하게 500 m로 설정된다. 단말의 최대 송신파워, 경로 손실, 페이딩 모델, 노이즈 값들은 모두 3GPP의 시뮬레이션 방법론을 따랐다⁴⁾. 요구되는 SINR은 0 dB로 설정되며, 비교 방식으로 송신전력 제어 없이 최대 파워를 사용하는 방식과 목표 SINR을 설정하고 이를 만족시키도록 하는 SINR 기반 송신전력 제어 방식을 선택하였다¹⁾.

그림 2는 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 내

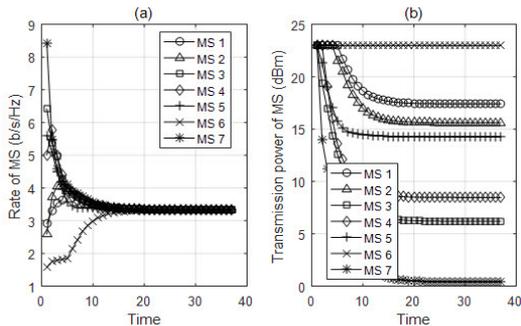


그림 2. 시간에 따른 단말의 (a) 전송률과 (b) 송신 파워
Fig. 2. (a) Rate and (b) transmit power of MS vs. time

로 한정된다. 수렴시 초기에 가장 좋은 전송률을 가졌던 단말 7은 가장 낮은 파워를 사용하며, 가장 나쁜 전송률을 가졌던 단말 6은 최대 송신 파워를 사용하게 된다. 즉, 좋은 링크 품질을 가진 단말들이 희생하여 송신 파워를 낮춰줌으로써 모든 단말의 전송률을 동일하게 됨을 알 수 있다.

그림 3은 셀 개수에 따라 단말의 평균 송신 파워, 평균 전송률, 아웃티지 확률, 에너지 효율을 보여준다. 셀 수가 증가할수록 셀 간 간섭이 증가하므로 간섭을 줄이기 위하여 제안 방식은 기존 방식보다 더 낮은 송신 파워를 사용하게 된다. 이로 인하여 평균 전송률은 감소하지만, 제안 방안은 셀간 간섭을 줄이면서 최소 전송률을 최대화하여 낮은 아웃티지 확률을 유지할 수 있게 해준다. 결과적으로 제안 방안은 송신 파워를 줄이면서도 낮은 아웃티지 확률을 유지하기 때문에 기존 방식대비 선형적으로 증가하는 우수한 에너지 효율 성능을 보여준다.

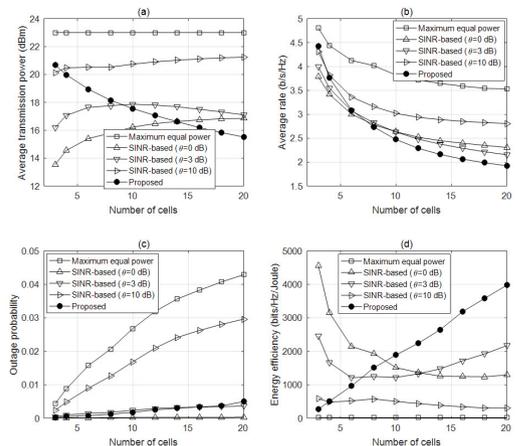


그림 3. 셀 수에 따른 (a) 평균 송신 파워, (b) 평균 전송률, (c) 아웃티지 확률, (d) 에너지 효율
Fig. 3. (a) Average transmission power, (b) average rate, (c) outage probability, and (d) energy efficiency vs. number of cells.

V. 결론

플로킹 모델을 기반으로 셀룰러 네트워크에서 에너지 효율적인 분산형 상향링크 송신전력 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안 방식은 셀간 간섭 환경에서 모든 단말의 상향링크 전송률이 같아지도록 송신전력을 제어한다. 이로 인하여 송신전력을 줄이면서도 최소 전송률을 최대화하여 아웃티지 발생을 낮추고 단말의 에너지 효율을 향상시킬 수 있었다.

References

- [1] H.-H. Choi and J.-R. Lee, "A biologically inspired power control algorithm for energy-efficient cellular Networks," *MDPI Energies*, vol. 9, no. 3, pp. 1-16, Mar. 2016.
- [2] J. Yang, "Uplink power control scheme for virtual MIMO multi-cell systems," *J. KICS*, vol. 38, no. 6, pp. 535-544, Jun. 2013.
- [3] F. Cucker and S. Smale, "Emergent behavior in flocks," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 52, no. 5, pp. 852-862, May 2007.
- [4] 3GPP TR 36.814 v9.0.0, *Further advancements for E-UTRA physical layer aspects* (release 9), Mar. 2010.