다중사용자 다이버시티가 주파수효율과 에너지효율 간 상호관계에 미치는 영향

남현우, 박정홍, 정방철
충남대학교 전자공학과
hwnam@cnu.ac.kr, jhpark81.win@gmail.com, bcjung@cnu.ac.kr

Effect of Multiuser Diversity on Trade-off between Spectral Efficiency and Energy Efficiency

Hyunwoo Nam, Jeonghong Park, and Bang Chul Jung
Dept. of EE, Chungnam National University

요 약

최근 차세대 이동통신 시스템에서 에너지 효율에 관한 관심이 뜨겁다. 본 논문에서는 이동통신 시스템에서 다중 사용자 다이버시티가 스펙트럼 효율(spectral efficiency, SE)과 에너지 효율(energy efficiency, EE)간의 상호관계에 미치는 영향을 분석한다. 단일 셀 네트워크와 다중 셀 네트워크에서 주파수 효율과 에너지 효율에 관한 Trade-off 관계는 사용자의 수가 증가함에 따라 급격히 개선된다. 다만, 다중 셀 네트워크에서는 인접 셀 간섭을 효과적으로 제어하는 것이 주파수 효율과 에너지 효율의 Trade-off 관계에 큰 영향을 미친다.

Ⅰ. 서 론

지구 온난화에 대한 우려와 셀룰러 네트워크의 데이터 트래픽 폭증으로 무선통신시스템에서도 에너지 효율성이 중요한 이슈가 되고 있다. 특히, 최근 활발히 연구가 진행되고 있고 5G라 불리우는 IMT-2020의 핵심 성능 지표 중의 하나로 에너지 효율성이 제시되고 있다 [1-3]. 데이터 트래픽이 급증하기 이전에도 셀룰러 네트워크의 에너지 효율 개선을 위한 연구는 이루어졌으나 셀룰너 네트워크가 차지하는 에너지 소비는 극히 일부였기에 사실상 많이 연구되지 않았다. 그러나 최근 급증하는 트래픽을 처리하기 위해 셀룰라 네트워크에서 소모되는 전력은 무시할 수 없을 만큼 증가하고 있다. 최근 다중안테나 시스템에서의 에너지 효율성에 관한 연구가 제시되었고 [4], 무선랜 및 3GPP LTE 시스템에서 사용되고 있는 OFDM 기법의 에너지 효율성에 관한 연구가 진행되었다 [5]. 또한, 소형셀 네트워크에서 에너지 효율성을 개선하기 위하여 Cell-breathing 기법이 제안되었고 [6], 소형셀 상향링크에서 다중 셀 간섭을 고려한 사용자 단말의 전력제어를 통해 에너지 효율성을 개선하는 기법이 제시되었다 [7]. 그러나 기존 기법들에서는 셀룰라 네트워크에서도 에너지 효율성과 주파수 효율성이 근본적인 Trade-off 관계가 있다 [2]는 것에 초점을 맞추지 않았고 다중 사용자 스케쥴링이 이러한 Trade-off관계에 미치는 영향을 분석하지 않았다.

따라서 본 논문에서는 단일셀 및 다중셀 상향링크 네트워크에서 다중 사용자 다이버시티가 주파수 효율성 에너지 효율의 근본적인 상관관계에 미치는 영향을 분석한다. 특히, 다중셀 상향링크에서는 인접셀 간섭을 고려한 스케쥴링 기법 [8]을 고려한다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서는 송수신단에 단일 안테나가 존재하는 환경에서 셀룰러 네트워크를 잘 묘사하는 간섭 다중 접속 채널 모델을 고려한다. 특히, 상하향링크의 채널 호환성을 위하여 시분할(TDD) 시스템을 가정한다. 또한, 각 셀에 N 명의 사용자가 있다고 가정하고 전체 셀의 개수는 K 개라고 가정한다. 전송 블록(프레임)동안 채널 상태가 변하지 않고 각 전송 블록마다 독립적인 채널 상태를 가정하는 블록 페이딩 채널 모델을 가정한다. 따라서, 각 무선채널 h는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 정규 가우시안으로 가정한다. 수신단에서 발생하는 열잡음 z는 평균이 0이고 분산이 $N_0/2$인 복소 백색 가우시안 잡음으로 가정한다. 따라서, k번째 기지국에서 수신된 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$y_k = \underbrace{h_k^{[k,i]} x^{[k,i]}}_{desired\ signal} + \underbrace{\sum_{j=1, j\neq k}^{K} h_k^{[j,i]} x^{[j,i]}}_{intercell\ interference} + z. \quad (1)$$

$x^{[k,i]} \in C$ 는 k번째 셀 내의 i번째 사용자가 전송하는 전송 신호를 나타낸다. $y_k \in C$ 는 k번째 셀의 기지국이 수신한 신호를 나타낸다. $h_k^{[k,i]} \in C$ 는 k번째 셀에 있는 i번째 사용자에서 자신이 속한 셀 기지국인 k번째 기지국에 도달하는 무선 채널 값을 나타낸다. 따라서 $h_k^{[j,i]} \in C$ 는 j번째 셀에 있는 i번째 사용자가 k번째 셀 기지국과 갖는 채널 값을 의미하며 j와 k가 다른 값을 가지면 인접 셀 간섭 채널의 값을 나타낸다.

Ⅲ. 사용자 스케쥴링과 에너지 효율성

본 장에서는 단일셀 및 다중셀 네트워크에서 사용되는 대표적인 다중 사용자 스케쥴링 기법을 소개하고 셀룰러 네트워크의 주파수 효율과 에너지 효율를 정의한다. 본 논문에서는 다중 사용자 스케쥴링 기법 중 가장 대표적인 최대 신호-잡음비 (maxSNR) 스케쥴링 기법과 최소 간섭-잡음비 (minINR) 스케쥴링 기법을 고려한다. Max SNR 스케쥴링 기법은 사용자 단말이 인접 셀에 미치는 간섭은 전혀 고려하지 않고 오직 각 사용자의 신호 채널 이득이 가장 큰 사용자를 선택하는 방법으로 단일 셀 네트워크에서 최적의 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 이 스케쥴링 기법을 통하여 선택된 k번째 셀의 사용자는 다음 수식을 통하여

결정된다.

$$\hat{i}_k^{\max SNR} = \arg\max_i \left| h_k^{[k,i]} \right|^2, \quad i = 1,2,\cdots,N \tag{2}$$

최소 간섭비 스케쥴링 기법은 간섭이 극심한 다중셀 상향링크에서 효과적인 스케쥴링 기법으로 알려져 있으며, 이 스케쥴링 기법을 통하여 선택된 k번째 셀의 사용자는 다음 수식을 통하여 결정된다.

$$\hat{i}_k^{\min INR} = \arg\min_i \left[\sum_{j=1, j\neq k}^{K} |h_j^{[k,i]}|^2 \right], \quad i = 1,2,\cdots,N \tag{3}$$

한편, k번째 셀에서의 주파수 효율(spectral efficiency, SE)은 Shannon Capacity을 이용하여 정의되며 아래 식과 같다.

$$SE_k = \log_2\left(1 + \frac{|h_k^{[k,\hat{i}]}|^2 \cdot P}{I_k + N_0}\right) [bps/Hz] \tag{4}$$

또한, k번째 셀의 에너지 효율(energy efficiency, EE)은 다음과 같이 정의한다.

$$EE_k = \frac{SE_k}{P + P_c} \ [bps/J] \tag{5}$$

(4), (5) 식에서 P는 스케쥴링 된 단말기의 송신전력을 나타내고 P_c는 단말기의 대기전력을 나타낸다. 본 논문에서는 네트워크에 존재하는 모든 단말기의 송신 전력 및 대기 전력이 동일하다고 가정한다. 또한 $\hat{i}$는 k번째 셀에서 사용자 스케쥴링을 통하여 선택된 사용자의 인덱스를 나타낸다. 또한 다른 셀에서 스케쥴링 된 단말기들이 k번째 셀 기지국에 미치는 간섭의 총합을 I_k라고 표현하며 다음 식으로 정의된다.

$I_k = \sum_{j=1, j\neq k}^{K} |h_k^{[j,\hat{i}]}|^2 \cdot P$ 을 나타낸다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과 및 결론

그림 1은 단일 셀 환경(K = 1)에서 사용자 수(N)에 따른 SE와 EE의 상호관계를 보여준다. 본 논문에서는 잡음 전력을 0dB로 가정하고 송신 전력을 0dB에서 30dB까지 증가시키면서 성능을 관찰하였다. 대기전력(P_c)은 최대 소비전력의 30% 고정 상수 값 (24.7dB)을 사용하였다. 단일 셀 환경에서는 인접셀 간섭이 없으므로 최대 신호-잡음비 스케쥴링만을 고려한다. 그림에서 알 수 있듯이 사용자의 수가 증가하면서 SE&EE Trade-off 성능이 급격히 증가한다.

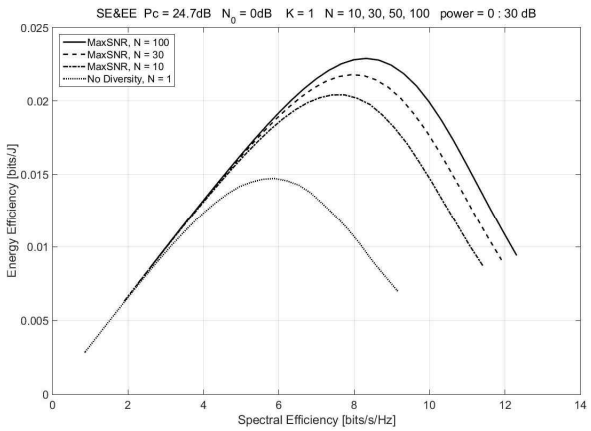

그림 1. 단일 셀 상향링크 네트워크에서 SE와 EE간 상관관계

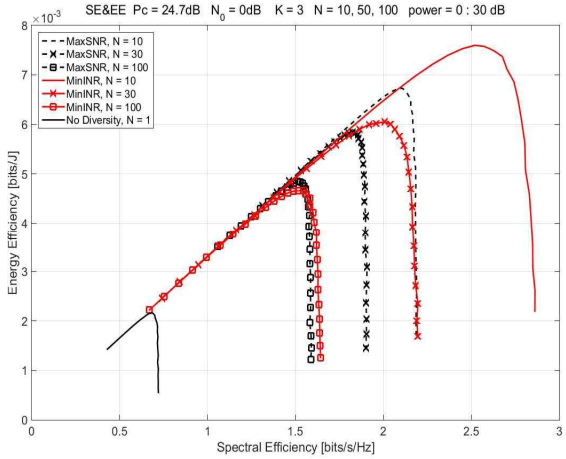

그림 2. 다중 셀 환경에서 SE와 EE간 상관관계

그림 2에서는 다중 셀 상향링크 네트워크에서 최대 신호-잡음비 스케쥴링과 최소 간섭-잡음비 스케쥴링을 적용하였을 때, SE&EE Trade-off 관계를 보여준다. 시뮬레이션 결과를 통해 다중 사용자 다이버시티가 효과가 증가하면서 SE와 EE간 상관관계 성능이 개선됨을 확인하였다. 그림 2는 인접셀 간섭이 존재하는 환경을 고려한 것으로 그림 1과 비교할 때 최대 도달 가능한 SE와 EE가 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 간섭이 극심한 경우 최소 간섭-잡음비 스케쥴링이 최대 신호-잡음비 스케쥴링 기법보다 향상된 SE-EE Trade-off 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 특히 사용자의 수가 증가함에 따라 두 스케쥴링 기법의 성능차이는 더욱 벌어진다.

ACKNOWLEDGMENT

This work has been supported by the National GNSS Research Center program of Defense Acquisition Program Administration and Agency for Defense Development.

참 고 문 헌

[1] G. Y. Li, Z. Xu, C. Xiong, C. Yang, S. Zhang, Y. Chen, and S. Xu, "Energy-efficient wireless communications: Tutorial, survey, and open issues," *IEEE Wireless Commun. Mag.*, vol. 18, no. 6, pp. 28-35, 2011.

[2] Y. Wu, Y. Chen, J. Tang, D. So, etc, "Green transmission technologies for balancing the energy efficiency and spectrum efficiency trade-off," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 112-120, Nov. 2014.

[3] G. Wu, C. Yang, S. Li, G.Y. Li, "Recent advances in energy-efficient networks and their application in 5G systems" *IEEE Wireless. Communications*, 22 no. 2, pp. 145-151, April 2015.

[4] G. Miao, "Energy-efficient uplink multi-user MIMO," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 2302-2313, May 2013.

[5] G. Miao et al., "Energy-Efficient design in wireless OFDMA," *Proc. IEEE ICC*, May 2008.

[6] 정방철, Hu Jin, "소형셀 네트워크에서 적응적 Cell-Breathing 기법의 에너지 효율성 분석," *Proc. of KICS JCCI*, Apr. 2016.

[7] 남현우, 박정홍, 정방철, "소형 셀 상향링크에서 간섭인지기반 전력제어기술의 에너지 효율성 분석, " *Proc. of KICS JCCI*, Apr. 2016.

[8] B. C. Jung and W. -Y. Shin, "Opportunistic interference alignment for interference-limited cellular TDD uplink," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 148-150, Feb. 2011.