다중 사용자 상향링크 채널을 위한 클러스터 기반 협동 다이버시티 기법

*김진수 **이재홍
서울대학교 전기·컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연구소
*jskim97@snu.ac.kr

A Cluster Based Cooperative Diversity Scheme for a Multi-user Uplink Channel

*Kim, Jinsu **Lee, Jae Hong
School of Electrical Engineering and Computer Sciences, Seoul National University

요약

차세대 양방향데이터방송 (BIFS: BInary Format for Scenes) 서비스에서는 하향링크(downlink) 데이터 전송률에 상응하는 높은 상향링크(uplink) 데이터 전송률이 요구되고 있다. 이에 무선 전송 채널의 한정된 자원 환경 속에서 상향링크 전송용량 증대를 위한 주파수 효율성 제고 기술의 필요성이 대두되고 있다.

본 논문에서는 차세대 양방향데이터방송을 위한 다중 모바일(mobile) 사용자의 클러스터(cluster) 기반 상향링크 협동 다이버시티(cooperative diversity) 기법을 제안한다. 제안된 기법은 하나의 단일 안테나(single antenna) 방송 기지국과 다수의 단일 안테나 모바일 사용자가 있는 상향링크 시분할다중접속 (TDMA: Time Division Multiple Access) 시스템에서 데이터 지연허용(delay-tolerant)에 따라 클러스터를 구성하고 제곱 다이버시티 차수(square diversity order)의 협동 프로토콜(cooperative protocol)을 통해 높은 공간다이버시티 이득(spatial diversity gain)을 얻는다. 또한, 비대칭(asymmetric) 무선 채널 환경에서 공정성(fairness)을 보장한다.

I. 서론

최근 활발하게 연구되고 있는 협동 다이버시티 기법은 단일 안테나 사용자들 간 가상 안테나 선열(virtual antenna array)을 통해 공간 다이버시티 이득을 얻는다 [1]-[3]. 이는 다중 안테나를 이용하는 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 기법과 달리 크기 제한을 갖은 모바일에 구현이 용이하여 차세대 무선 통신 기술로써 많은 주목을 받고 있다. 이러한 협동 다이버시티 기법을 통해 저속 페이딩(slow fading) 모바일 방송 채널 환경에서 깊은 페이딩(deep fading)에 의한 시스템 성능 열화를 저감시켜 양방향데이터방송의 효율성을 제고한다.

II. 시스템 모델

그림 1은 N 명의 단일 안테나 모바일 사용자와 하나의 방송 기지국이 있는 다중 사용자 반이중(half-duplex) 시분할다중접속 상향링크 시스템을 보인다. 모든 채널은

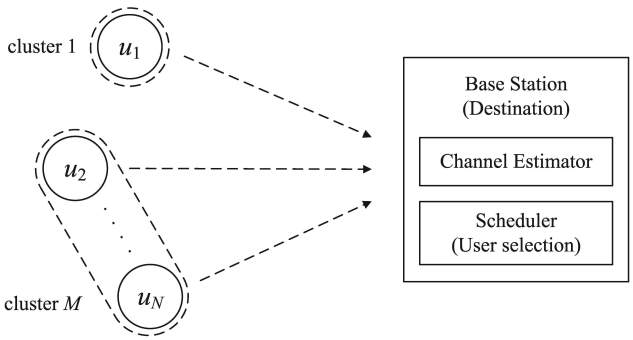

그림 1. 다중 모바일 사용자 상향링크 시스템

각 시간 슬롯 동안 일정한 채널 이득(channel gain)을 갖는 준정적 레일레이 페이딩(quasi-static Rayleigh fading)을 가정한다. 사용자 집합을 $U=\{u_1, u_2, ..., u_N\}$ 라 할 때 채널 이득 계수(channel gain coefficient) h_i^k 는 k번째 시간 슬롯에서 i번째 사용자$(u_i \in U)$의 방송 기지국까지의 상향링크 채널을 나타내고, $h_{i,j}^k$ 는 i번째 사용자와 j번째 사용자$(u_i, u_j \in U, i \neq j)$의 사용자간 채널 이득 계수(inter-user channel gain coefficient)를 나타낸다. h_i^k, $h_{i,j}^k$ 는

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R01-2007-000-11844-0).

평균이 0이고 분산이 각각 σ_i, $\eta_{i,j}$인 원형 대칭 복소 가우시안 확률 변수(circularly symmetric complex Gaussian random variable)로 가정한다.

III. 클러스터 기반 협동 다이버시티 기법

1. 이전 자원 할당 기법

라운드로빈 스케줄링(round-robin scheduling)에서 스케줄러는 각 사용자의 채널 상태를 고려하지 않고 순환 순서(cyclic order)에 따라 각 시간 슬롯을 사용자에게 할당한다. 이러한 방식을 통해 라운드로빈 스케줄링은 비대칭 채널 환경에서 자원할당의 공정성을 보장한다.

기회주의적 스케줄링(opportunistic scheduling)은 다중 사용자 다이버시티 이득(multi-user diversity gain)을 얻기 위해 기지국까지의 상향링크 채널 상태가 가장 좋은 사용자에게 각 시간 슬롯을 할당한다. 이를 통해 다중 사용자 환경에서 최대 시스템 수율(system throughput)을 얻는다[4]. 하지만, 비대칭 채널 환경에서 평균적 채널 상태가 좋은 사용자들에 의한 자원의 과점으로 자원 할당의 불공정성이 발생한다[5][6].

반복(repetition) 기반 협동 다이버시티 기법에서 각 시간 슬롯은 라운드로빈 스케줄링과 동일한 방식으로 사용자에게 할당된다. 각 시간 슬롯의 사용자는 할당 받은 시간 슬롯을 다시 다수의 부시간 슬롯(sub-time slot)을 나누고, 이 부시간 슬롯을 사용하여 다른 사용자들이 첫 번째 부시간 슬롯에서 전송된 데이터를 기지국에 재전송한다. 이를 통해 단일 안테나 모바일 사용자들은 공간 다이버시티 이득을 얻는다[2].

2. 제안된 자원 할당 기법

기지국의 스케줄러(scheduler)는 매 시간 슬롯에서 각 사용자의 상향링크 채널을 고려하여 전송할 사용자를 선택한다. 무선 채널의 방송(broadcast) 특성에 따라 채널을 할당 받은 사용자가 기지국으로 데이터를 전송하면 다른 사용자들도 같은 데이터를 수신하게 된다. 이때, 다른 사용자들은 순환잉여검사(CRC: Cyclic Redundancy Check)를 통해 수신된 데이터에 오류가 없는 경우 자신들의 큐(queue)에 저장한다. 이후 기지국으로부터 해당 데이터에 대한 확인응답(ACK: ACKnowledge)이 없는 경우 큐에 계속 보관을 하고, 확인응답이 있는 경우 자신의 큐에서 제거한다.

제안된 기법에서 스케줄러에 의해 k번째 시간 슬롯을 할당 받는 사용자(u_s^k)는 다음과 같다.

$$u_s^k = \arg\max_{u_i \in U} \left| h_i^k \right|^2 \quad (1)$$

u_s^k는 할당 받은 k번째 시간 슬롯에서 자신의 데이터와 큐에 저장된 다른 사용자들의 데이터를 순차적으로 전송한다.

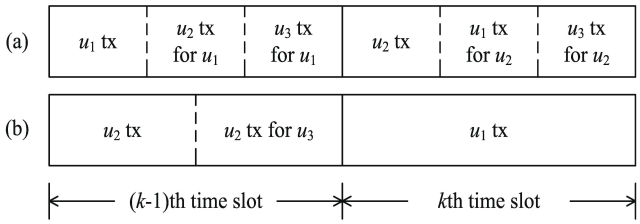

그림 2. 반복 기반 협동 다이버시티 기법과 제안된 클러스터 기반 협동 다이버시티 기법의 자원 할당 방법 비교: (a) 반복 기반 협동 다이버시티 기법, (b) 클러스터 기반 협동 다이버시티 기법. u_2 와 u_3 의 클러스터 구성 가정$\left(N=3,\ M=2,\ u_s^{k-1}=u_2,\ u_s^k=u_2\right)$.

본 논문에서는 반복 코딩(repetition coding)과 독립적이며 동일 분포를 갖는 원형 대칭 복소 가우시안 랜덤 코드북(independent and identically distributed circularly symmetric complex Gaussian codebook)을 사용한다[3]. 퍼펙트 사용자간 채널($\left|h_{i,j}^k\right|^2 \to \infty,\ i,j \in U,\ i \neq j$)을 가정할 때, u_s^k의 상호정보(mutual information) I는 다음의 불능확률(outage probability) 상계(upper bound)를 갖는다.

$$P\left[I < R\right] \le \Pr\left\{ \frac{1}{N}\log\left(1+\frac{P}{N_0}\sum_{k=1}^{N}\sigma_i \max_{u_i \in U}\left|h_i^k\right|^2\right) < R \right\} \quad (2)$$

R은 주파수 효율(spectral efficiency), P는 송신 전력, N_0는 잡음 분산(noise variance)을 나타낸다. 수식 (2)에서 u_s^k의 상호정보는 N차 다중 사용자 다이버시티(multi-user diversity) 이득을 얻는 N개 항으로 구성되어 있다. 이를 통해 u_s^k의 불능확률 상계가 제곱 다이버시티 차수를 가짐을 확인할 수 있다. 이러한 방식은 제곱 차수 다이버시티 이득을 통해 높은 성능 향상을 보이지만, 모든 사용자의 무한대 지연허용을 가정한다. 이에 사용자들의 각기 다른 지연허용에 따라 M개의 클러스터를 구성하고, 클러스터별 협력 통신을 통해 데이터 전송 지연 비를 낮추는 클러스터 기반 협력 다이버시티(cluster based cooperative diversity) 기법을 제안한다.

그림 2-(b)는 $N=3$, $M=2$ 일 때, 제안된 기법의 자원 할당 방식을 보여준다. 제안된 기법은 그림 2-(a)의 일반적 협동 다이버시티 기법과는 달리 사용자들을 다수의 클러스터로 나눈 후 클러스터별로 협동 전송을 한다. 단일 사용자 클러스터는 다중 사용자 다이버시티 이득만을 얻고, 다중 사용자 클러스터는 다중 사용자 다이버시티와 협동 다이버시티를 얻는다.

IV. 컴퓨터 모의실험 결과

제안된 기법의 성능(performance) 비교를 위해 불능확률을 사용한다[1]. 퍼펙트 사용자간 채널 및 1bits/sec/Hz의 주파수 효율을 가정하여, 최대 수율을 갖는 기회주의적(opportunistic) 스케줄링과 공정성을 보장하는 라운드로빈(round-robin) 스케줄링과 비교한다.

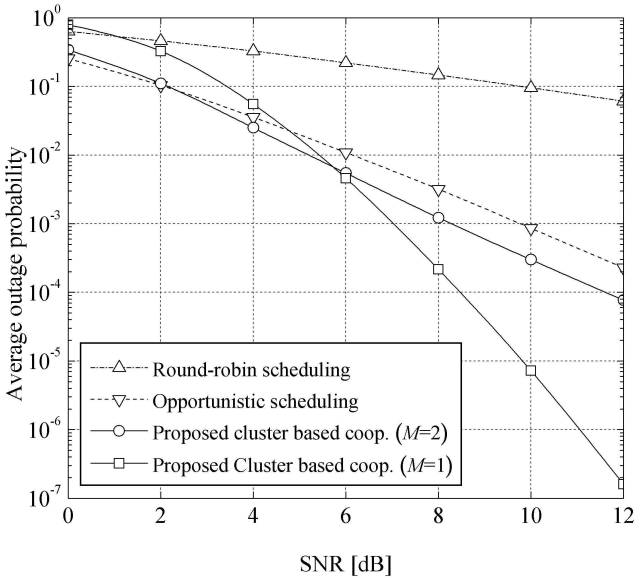

그림 3. 신호대잡음비(signal to noise ratio)에 따른 평균 불능 확률 비교 ($N=3$, $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=1$).

그림 3은 3명의 모바일 사용자가 있을 때, 신호대잡음비에 따른 평균 불능확률을 보인다. 라운드로빈 스케줄링이 가장 높은 불능확률을 보이며, 기회주의적 스케줄링은 차수 3의 다중 사용자 다이버시티 이득을 통해 라운드로빈 스케줄링보다 낮은 불능확률을 갖는다. 제안된 기법은 $M=1,2$ 인 경우 모두 기회주의적 스케줄링 보다 높은 성능을 보이며, $M=1$인 경우 가장 낮은 불능확률을 갖는다. 이는 데이터 지연허용에 제한이 없고, $M=1$ 인 경우 제한된 기법이 높은 신호대잡음비 영역에서 차수 9의 다이버시티 이득을 갖는 것으로 설명된다. 하지만, 6dB이하의 영역에서는 반복 손실(repetition loss)로 인해 낮은 성능 향상을 보인다. $M=1$보다 낮은 지연 시간 비를 갖는 $M=2$인 경우 기회주의적 스케줄링 보다 2dB 정도 향상된 성능 보이고, 낮은 신호대잡음비 영역에서는 $M=1$인 경우보다 높은 성능을 보인다.

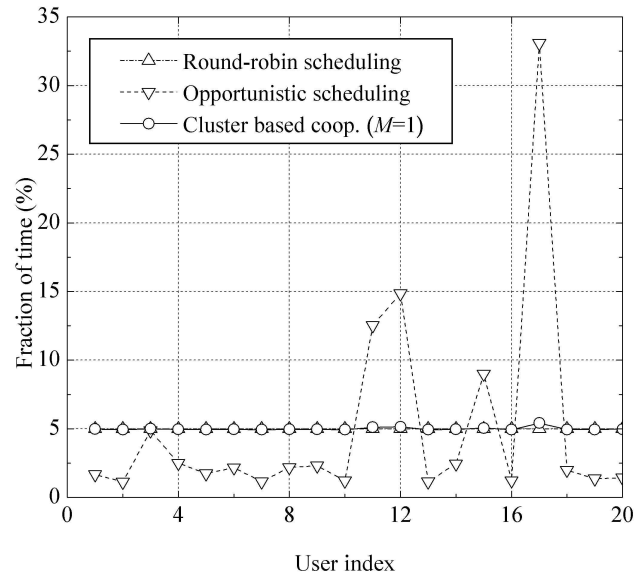

그림 4. 비대칭 채널 환경에서 자원 배분의 공정성 비교.

그림 4는 비대칭 채널 환경에서 각 사용자가 사용하는 시간의 비로써 자원 할당에 대한 공정성 비교한다. 20명의 사용자를 가정하였고, [1, 100] 구간에서 등분포(uniform distribution)를 갖는 난수 발생 통해 각 사용자의 상향링크 채널 분산을 결정하였다. 또한, 제안된 클러스터 기반 협동 다이버시티 기법과의 비교를 위해 모든 사용자간 채널에서의 전송 실패 확률은 0.01로 가정하였다.

라운드로빈 스케줄링 방식에서 모든 사용자는 동일한 5%의 시간을 사용한다. 즉, 라운드로빈 스케줄링은 채널 상태를 고려하지 않는 순환 순서 자원 할당 방식을 통해 비대칭 채널 환경에서 다중 사용자간의 공정성 보장한다. 기회주의적 스케줄링은 평균적 채널 상태가 좋은 사용자들이 대부분의 시간 슬롯을 할당 받아 사용자간의 자원 할당 불공정성을 만든다. 하지만, 제한된 기법은 $M=1$에서 라운드로빈 스케줄링가 거의 같은 공정성을 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 다중 모바일 사용자 상향링크 채널을 위한 클러스터 기반 협동 다이버시티 기법을 제안하였다. 또한, 컴퓨터 모의실험을 통해 제한된 기법이 이전 제안 기법 중에서 최대 수율을 얻는 기회주의적 스케줄링 보다 높은 성능을 갖고, 비대칭 채널 환경에서 라운드로빈 스케줄링과 비슷한 자원 배분 공정성을 보임을 확인하였다.

참고문헌

[1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity-Part I: System description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1927-1938, Nov. 2003.

[2] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocol and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.

[3] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diveristy in wireless networks," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415-2425, Oct. 2003.

[4] R. Knopp and P. Humblet, "Information capacity and power control in single cell multiuser communications," *in Proc. IEEE Int. Computer Conf. (ICC'95)*, Seattle, Wa, June 1995, pp. 331-335.

[5] A. Gyasi-Agyei, "Multiuser diversity based on opportunistic scheduling for wireless data networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 7, pp. 670-672, July 2005.

[6] S. Borst, "User-level performance of channel-aware scheduling algorithms in wireless data networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 13, no. 3, pp. 636-647, June 2005.