다중 사용자 MIMO 전송을 위한 섹터 간 협력적 스케쥴링 방식

이지원, 성원진
서강대학교 전자공학과
e-mail:ninairina@sogang.ac.kr

Collaborative Inter-Sector Scheduling Methods for Multi-User MIMO Transmission

Jiwon Lee and Wonjin Sung
Department of Electronic Engineering, Sogang University

요 약

여러 개의 섹터에 존재하는 안테나들로부터 협력적으로 신호를 전송 받는 다수의 사용자를 시간축에서 선택하는 스케쥴러의 성능을 시스템 전체 성능과 평등성 지표의 관점에서 개선하기 위하여 섹터 간의 협력을 고려할 수 있다. 기존 스케쥴러는 단일 셀에서의 사용자를 선택하는 방식으로 평등성 지표의 향상만을 고려하였으나 제안하는 섹터 간 협력 비례적 평등 스케쥴러는 동시 전송 사용자들 간의 채널의 직교성을 고려함으로써 시스템 전체 성능과 하위 사용자의 성능을 개선할 수 있다. 본 논문에서는 총 3 개의 인접한 섹터로 이루어진 분산 다중 안테나 시스템에 스케쥴러를 적용하고 그 성능을 분석한다. 섹터 간 협력 비례적 평등 스케쥴러는 각 섹터에 존재하는 사용자들의 채널 직교성을 활용하는 동시에 채널 변화 속도가 빨라짐에 따른 다이버시티 효과를 이용하여 시스템 전체 성능을 크게 향상시킨다. 또한 이 방식은 하위 사용자 성능이 우수한 수정된 협력 최대-최소 평등 스케쥴러의 하위 사용자 성능의 최고 99%의 성능을 달성한다.

1. 서론

시스템의 전체 성능을 향상시키는 동시에 사용자들 간의 성능의 평등성을 강조하는 스케쥴러가 기존에 제안되어왔다. 본 논문에서는 섹터 셀의 사용자 그룹에게 ZF-DPC 방식을 기반으로 동시전송을 받는 사용자들을 시간축에서 스케쥴링하기 위하여 기존 최대-최소 평등 스케쥴러, 섹터 간 협력 비례적 평등 스케쥴러와 이 두 방식을 혼합한 수정된 협력 최대-최소 평등 스케쥴러를 적용하고 성능을 분석한다.

2. 시스템 모델

스케쥴링 방식이 적용될 환경은 일반적인 셀룰러 시스템에서 서로 다른 셀에 속하는 3 개의 인접한 섹터 셀로 이루어진 섹터 셀로 지리적으로 분산된 다중 안테나가 사용자에게 신호 전송을 하며 기지국과 사용자는 모두 단일 안테나를 가지고 있다. 스케쥴러는 섹터 당 한 명의 사용자를 선택하여 동시 전송 사용자 그룹을 결정하며 스케쥴러에 의해 선택된 동시 전송 사용자 그룹은 ZF-DPC 방식으로 신호전송을 받게 된다.

3. 스케쥴링 방식

A. 기존 비례적 평등 스케쥴러

기존 비례적 평등 스케쥴러는 사용자가 낼 수 있는 성능과 이제까지 낸 성능의 평균값의 비가 가장 큰 사용자를 고른다. 셀에 존재하는 총 사용자가 K 명일 때 선택되는 사용자 u 는

$$u = \arg \max_{k \in \{1,\cdots,K\}} \frac{1}{\overline{R_k(t)}} \tag{1}$$

이며 k 번째 사용자의 성능의 평균값 $\overline{R_k(t)}$ 는 다음과 같이 업데이트한다.

$$\begin{aligned} \overline{R_k(t+1)} &= \left(1-\frac{1}{\Delta t}\right)\overline{R_k(t)}, \qquad k \neq u \\ \overline{R_u(t+1)} &= \left(1-\frac{1}{\Delta t}\right)\overline{R_u(t)} + \left(\frac{1}{\Delta t}\right)R_u(t) \end{aligned} \tag{2}$$

Δt 는 window size 로 $\overline{R_k(t)}$ 값이 업데이트되는 속도를 결정하며 이 값이 클수록 평등지표가 개선된다.

B. 최대 - 최소 평등 스케쥴러

최대-최소 평등 스케쥴러는 평등성 지표의 향상을 목표로 하며 다음과 같이 각 섹터 별로 가장 낮은 성능을 보인 사용자들을 동시 전송 그룹으로 선택한다. 섹터 당 총 사용자 수를 K 일 때 s 번째 섹터에서 선택되는 사용자는

$$u_s = \arg \max_{k \in \{(s-1)\cdot K+1, \cdots, s\cdot K\}} \frac{1}{\overline{R_k(t)}} \quad (6)$$

이며 성능의 평균값 $\overline{R_k(t)}$ 을 업데이트하는 방식은 기존 비례적 평등 스케쥴러와 동일하다.

C. 섹터 간 협력 비례적 평등 스케쥴러

섹터 간 협력 비례적 평등 스케쥴러는 기존 비례적 평등 스케쥴러의 사용자 선택 방식을 분산 다중 안테나 시스템에 적용한 것이다. 선택되는 사용자는

$$u_s = \arg \max_{k \in \{1, \cdots, 3K-(s-1)\cdot K\}} \frac{R_k(t)}{\overline{R_k(t)}} \quad (9)$$

이며 사용자 선택에 있어서 $R_k(t)$ 값의 계산이 중요한 역할을 하게 된다. $R_k(t)$ 값을 계산하기 위해 사용되는 신호 전력은 이전에 선택된 다른 섹터에 속하는 사용자의 채널과 직교하는 성분의 Frobenius norm 의 제곱이 된다. 또한 섹터 당 한 명의 사용자를 선택하게 되므로 첫 번째 사용자의 선택을 위해 $3K$ 명의 사용자에 대하여 스케쥴링하게 되며 이 후의 사용자의 선택을 위해서는 다른 섹터에 존재하는 사용자들을 제외한 사용자들에게 스케쥴러를 적용한다.

D. 수정된 협력 최대-최소 평등 스케쥴러

수정된 협력 최대-최소 평등 스케쥴러는 앞서 설명된 두 개의 스케쥴러를 혼합한 것으로 다음과 같은 방식으로 동시 전송 그룹을 선택한다.

Step1. 먼저 성능이 낮은 사용자를 섹터당 N 명씩 고른다. 섹터 인덱스를 s 라고 할 때 각 섹터 별로 선택되는 s 섹터의 n 번째 사용자는

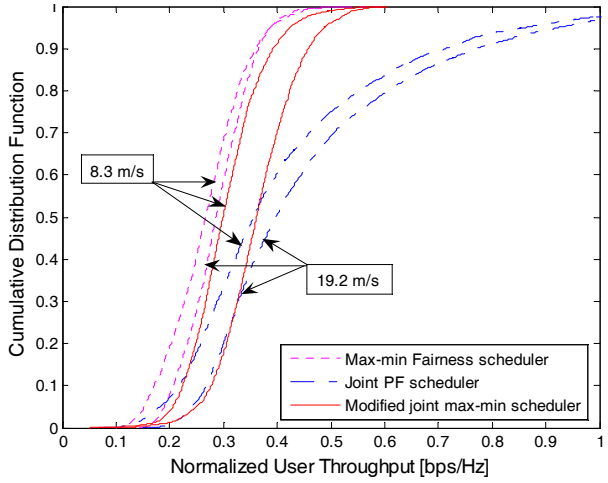
$$u_{s,n} = \arg \max_{k \in \{(s-1)\cdot K+1, \cdots, s\cdot K\}, k \notin \{u_{s,1}, \cdots, u_{s,n-1}\}} \frac{1}{\overline{R_k(t)}} \quad (10)$$

이며 모든 섹터에 대하여 적용하면 총 $3N$ 명의 후보 사용자를 선택할 수 있다.

Step2. 총 $3N$ 명의 후보 사용자들의 조합으로 구성된 N^3 개의 동시 전송 그룹 중 가장 sum-rate 이 큰 그룹을 선택한다.

4. 성능 평가

스케쥴러를 적용한 결과 사용자의 정규화된 성능을 그림 1 과 같이 CDF (Cumulative Distribution Function)로 나타낼 수 있다. 전체 시스템 성능에 있어서 섹터 간 협력 비례적 평등 스케쥴러가 다른 스케쥴러에 비해 우위를 차지하고 있음을 알 수 있는데 이는 동시 전송 그룹간 직교성을 활용한 스케쥴링을 수행하였기 때문이다. 이는 채널 변화 속도가 빨라짐에 따라 다이버시티 효과를 사용하여 성능이 제일 빠르게 향상되는 것에서도 확인할 수 있다. 평등성 지표로는 Jain's fairness index 를 사용하였으며 가장 우위를 차지하고 있는 것은 수정된 협력 최대-최소 스케쥴러로 하위 5% 사용자의 성능도 가장 크다. 한편 섹터 간 협력 비례적 평등 스케쥴러는 채널 변화 속도가 빨라



(그림 1) 채널 변화 속도에 따른 사용자 성능
Window size=50, # of users per sector=10
N for modified joint max-min scheduler=2
Total time frame=100, Simulation=100

<표 2> 하위 5% 사용자의 성능 [bps/Hz]

User velocity	Max-min fairness	Joint PF	Modified joint max-min
8.3m/s	0.1536	0.1831	0.2063
19.2m/s	0.1853	0.2446	0.2455
Gain[%]	20.6380	33.5882	19.0014

<표 3> Jain's fairness index

User velocity	Max-min fairness	Joint PF	Modified joint max-min
8.3m/s	0.9421	0.8099	0.9631
19.2m/s	0.9567	0.8349	0.9728

짐에 따라 하위 사용자의 성능이 수정된 협력 최대-최소 스케쥴러 성능의 88%에서 99%의 성능을 달성하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

다중 안테나 시스템에서 동시 전송 그룹에 ZF-DPC 를 기반으로 신호를 전송할 경우의 스케쥴링을 위해서 시스템 성능과 평등성을 고려하였다. 협력 비례적 평등 스케쥴러는 사용자 채널 간의 직교성을 활용하여 전체 시스템 성능을 향상시킨다. 또한 채널의 변화 속도가 빠를수록 다이버시티 효과까지 활용할 수 있게 되어 이를 통해 Jain's fairness index 가 다른 스케쥴러에 비해 낮더라도 Jain's fairness index 가 우수한 다른 스케쥴러의 하위 사용자의 성능의 대부분을 달성할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] T. Bu, L. Li and R. Ramjee, "Generalized proportional fair scheduling in third generation wireless data networks," in Proc. *IEEE Infocom 2006.*, Apr. 2006.

[2] Xia Chen, and Honglin Hu, "Double Proportional Fair User Pairing Algorithm for Uplink Virtual MIMO Systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 7, pp. 2425-2429, Jul. 2008.