

MMSE-SIC 기반 상향링크 다중 사용자 MIMO-OFDM 시스템에서 공정한 스케줄링 기법

*이판형 **이재홍

*서울대학교 전기컴퓨터공학부, 뉴미디어통신공동연구소

*rubyeye7@snu.ac.kr **jhlee@snu.ac.kr

Scheduling Algorithm for Multiuser MIMO-OFDM System

*Lee, Panhyung **Lee, Jae Hong

*Seoul National University, School of Electrical Engineering, INMC

요약

본 논문에서는 준 정적(quasi-static) 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널에서 상향링크 다중 사용자 MIMO-OFDM 시스템을 위한 최소평균제곱오차-순차간섭제거(MMSE-SIC: Minimum mean square error-successive interference cancellation) 수신기에 대해 연구한다. 송신 안테나가 하나인 사용자와 수신 안테나가 다수인 기지국에서 MMSE-SIC 수신기를 기반으로 신호를 검출하는 시스템에서는 하나의 부대역 내에서 동시에 전송 가능한 사용자의 수가 기지국에서의 수신안테나 수보다 작아야 하는 제한 조건을 가지고 있다. 따라서 사용자간 공정성을 보장하고 시스템의 효율성을 높이기 위해 낮은 복잡도를 가지는 비례 공정(Proportional fair) 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

제안된 비례 공정 스케줄링 알고리즘에서는 부대역 내에서 다중 사용자 채널 행렬을 기반으로 동시에 전송하는 사용자들의 집합을 찾는다. 평균 채널 이득이 사용자마다 다른 환경에서의 모의실험을 통해 제안된 비례 공정 스케줄링 기법의 성능을 알아본다. 제안된 비례 공정 스케줄링 기법은 기존의 공정성을 기반으로 하는 스케줄링 알고리즘보다 더 큰 일 반 비례 공정(General proportional fair) 기준과 더 높은 셀 수율(Cell throughput)을 가지는 것을 보이고 있다.

1. 서론

다중송수신 안테나 (MIMO: Multiple input multiple output) 시스템은 무선 통신에서 단일 송수신안테나(SISO: Single input single output) 시스템에 비해 높은 데이터 전송률과 더 나은 신뢰성을 제공한다 [1], [2]. 데이터 전송률을 높이기 위해 MIMO 시스템은 공간 다중화(Spatial multiplexing) 기법을 사용하는데, 이 기법에서는 송신기가 독립적인 데이터 스트림을 전송하고 수신기가 복조과정을 통해 수신되는 신호를 다수의 스트림으로 분리해낼 수 있다.

직교주파수다중화 (OFDM: Orthogonal frequency division multiplexing)는 신호간 간섭 (ISI: Inter symbol interference)을 유발하는 주파수 선택적 페이딩에 강인한 장점을 가지고 있다. OFDM 시스템은 부반송파를 통해 고속의 직렬데이터를 저속의 병렬데이터로 나누어서 전송함으로써 ISI를 줄일 수 있다 [3].

다중 사용자 시스템은 단일 사용자 시스템에 비해 높은 전송용량을 달성 할 수 있고 이를 다중 사용자 다이버시티(Multiuser diversity)라고 한다 [4]. 스케줄러는 채널 이득이 좋은 사용자가 데이터를 전송하도록 함으로써 다중사용자 다이버시티 이득을 얻는다. 다중사용자 시스템에서의 비례 공정 스케줄링 알고리즘은 사용자의

평균 데이터 전송률의 로그 합을 최대화하는 기법이다[5]. 단일안테나나 단일반송파 시스템에서의 최적의 비례 공정 스케줄링 알고리즘에서는 현재순간의 데이터 전송률 대 평균 데이터 전송률의 비가 최대가 되는 사용자를 선택한다. 다중반송파 시스템에서의 최적의 비례 공정 스케줄링 알고리즘은 계산상의 복잡도로 인해 구현이 어렵다. 단일안테나 다중반송파 시스템에서의 낮은 복잡도를 가지는 부최적 비례 공정 스케줄링 알고리즘은 [6]에서 제안되었다. [6]에서의 비례 공정 알고리즘에서는 가상의 부분적 갱신(Virtual partial update)을 통해 부대역을 할당한다.

다중안테나 시스템에서는 하나의 부대역 내에서 동시에 전송 가능한 사용자의 수가 기지국의 수신안테나의 수보다 작아야하는 조건을 가지고 있다. 본 논문에서는 다중안테나 다중반송파 시스템에서 조건을 만족시키는 부최적 비례 공정 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 상향링크 다중 사용자 MIMO-OFDM 시스템 모델을 제시한다. 둘째, 다중 사용자 신호를 검출하기 위한 MMSE-SIC 수신기에 대해 알아본다. 셋째, 제시된 시스템 모델을 위한 새로운 비례 공정 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 넷째, 모의 실험을 통해 제안된 스케줄링 알고리즘의 성능을 분석한다. 마지막으로, 결론을 도출한다.

2. 시스템 모델

기지국은 다수의 수신안테나를 가지고 있고 모든 사용자들은 하나의 송신 안테나를 가지고 있는 다중 사용자 MIMO-OFDM 시스템

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

템을 고려한다. 여러 개의 부반송파를 하나의 부대역으로 묶어서 부대역의 단위로 사용자들에게 할당하고, 하나의 부대역 내에서 동시에 전송가능한 사용자의 수는 기지국의 안테나 수와 같다. 기지국은 다중 사용자 신호를 검출하기 위해 제로포싱(ZF: Zero forcing) 수신기나 최소평균제곱오차(MMSE: Minimum mean square error) 수신기를 사용한다 [7]. 다중 사용자 MIMO 채널의 각 성분은 독립적이고 동등한 분포를 가지는 확률변수이고 각 성분의 절댓값은 레일레이 분포를 따른다. 기지국에서는 다중 사용자 MIMO 채널을 완전히 알고 있다고 가정한다.

n 번째 부대역에서의 수신되는 신호는 다음 식으로 주어진다.

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{z}_n \text{ for } n = 1, \dots, N_{sb} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{x}_n 은 다중 사용자 전송 신호를 나타내고 \mathbf{H}_n 은 다중 사용자 MIMO 채널을 나타내고 \mathbf{z}_n 은 평균이 영이고 분산이 σ^2 인 백색가우시안 잡음을 나타낸다. 부대역 내에서는 신호가 주파수 비선택적 페이딩을 겪고 각 사용자들은 느린 이동속도를 가짐으로써 준정적 페이딩을 겪는다고 가정한다.

3. MMSE-SIC 수신기

MMSE-SIC 기법은 상향링크 다중 사용자 MIMO 시스템에서 전송용량을 달성 할 수 있다 [8], [9]. 동시에 전송하는 사용자의 수가 기지국의 수신안테나 수 보다 작거나 같고, 기지국에서 다중 사용자 채널을 알고 있다고 가정하면 MMSE-SIC 수신기를 통해 다중 사용자 신호를 검출할 수 있다. 그림 1에 다중 사용자 MIMO 채널에서의 MMSE-SIC 수신기를 나타내었다. MMSE-SIC 수신 행렬은 다음 식으로 주어진다.

$$\mathbf{W}_n = (\mathbf{H}_n^H \mathbf{H}_n + \sigma^2 \mathbf{K} / P_n)^{-1} \mathbf{H}_n^H \quad (2)$$

여기서 P_n 은 수신 신호의 세기를 나타내고 σ^2 은 백색가우시안 잡음의 분산을 나타낸다.

n 번째 부대역에서 검출되는 신호는 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_n &= \mathbf{W}_n \mathbf{y}_n \\ &= \mathbf{W}_n \mathbf{H}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{W}_n \mathbf{z}_n \\ &= \mathbf{D}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{W}_n \mathbf{z}_n \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{D}_n 은 분리된 다중 사용자 채널을 뜻하고 \mathbf{D}_n 의 비대각원소(off-diagonal element)는 사용자간 간섭을 유발한다.

n 번째 부대역에서 사용자 k 의 신호 대 간섭 및 잡음 비(SINR: Signal to interference and noise ratio)는 다음 식으로 주어진다.

$$\gamma_{k,n} = \frac{|\mathbf{W}_n \mathbf{H}_n]_{k,k}|^2}{\sum_{l=1, l \neq k}^K |\mathbf{W}_n \mathbf{H}_n]_{k,l}|^2 + (\sigma^2 \mathbf{K} / P_{r,n}) \sum_{l=1}^K |\mathbf{W}_n]_{k,l}|^2} \quad (4)$$

MMSE-SIC 수신기는 사용자의 신호를 반복적 기법을 통해 검출하게 되는데 각 반복 단계에서 가장 큰 SINR을 가지는 사용자들 선택하여 신호를 검출한다. 각 반복 단계에서 검출에 성공한 사용자의 신호 성분을 수신되는 신호에서 제거하고 난 후 검출하지 않은 사용자의 신호를 검출한다. 그리고 식 (2)로 주어지는 수신 행렬은

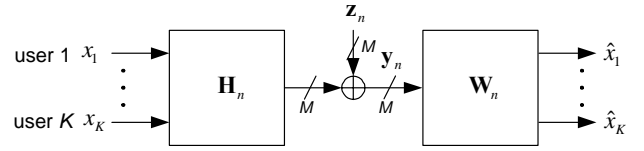


그림 1. 다중 사용자 MIMO 채널에서의 MMSE-SIC 수신기.

검출된 사용자의 채널을 영 벡터로 두고 다시 계산하여 검출하지 않은 사용자의 신호를 검출할 때 사용한다.

3. 비례 공정 스케줄링 알고리즘

사용자의 수가 기지국의 수신안테나 수보다 많은 경우 수신안테나의 수보다 작거나 같은 사용자가 전송하도록 하는 스케줄러가 필요하다. 스케줄러의 공정성을 나타내는 지표로 일반 비례 공정(GPF: General proportional fair) 지표가 있다. GPF는 다음 식으로 주어진다.

$$G \triangleq \sum_{k=1}^K \log R_k \quad (7)$$

여기서 R_k 는 사용자의 장기(long-term) 평균 수율을 나타낸다.

최적의 비례 공정 스케줄링 알고리즘은 GPF 지표를 최대화하는 것으로 알려져 있다. 하지만 다중 부반송파 시스템에서는 계산상의 복잡도가 높아 구현하기가 어렵다 [10]. 본 논문은 MIMO-OFDM 시스템에서 낮은 복잡도를 가지는 새로운 비례 공정 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

n 번째 부대역에서 사용자 k 의 수율은 다음 식으로 주어진다.

$$r_{k,n}(t) = \log_2 \left(1 + \frac{P \|\mathbf{h}_{k,n}\|^2}{\sigma^2} \right) \quad (8)$$

여기서 P 는 전송 전력을 나타낸다.

제안된 비례 공정 스케줄러는 각 공간 채널에서 다수의 부대역을 반복 단계를 통해 할당하게 되는데 부대역의 할당은 가장 큰 비례 공정 스케줄링 매트릭을 가지는 사용자에게 그 부대역을 할당하며 이는 다음 식으로 주어진다.

$$(k^*, n^*) = \arg \max_{k \in K, n \in N_E} \eta_{k,n}^l \quad (9)$$

여기서 $\eta_{k,n}^l$ 는 l -번째 반복 단계에서 주어지는 비례 공정 스케줄링(PFS) 지표 나타내고 이는 다음 식으로 주어진다.

$$\eta_{k,n}^l = \frac{r_{k,n}(t)}{R_k^{l-1}(t)} \quad (10)$$

각 사용자의 평균 수율을 나타내는 $R_k^{l-1}(t)$ 는 [6]에서 제안된 기법과 같이 가상의 부분적 갱신을 통해 매 반복 단계에서 새롭게 얻어지고 다음 식과 같이 나타난다.

$$R_k^l(t) = \begin{cases} R_k^{l-1}(t) + \frac{1}{T} r_{k,n}(t), & \text{if } k = k^* \text{ and } n = n^*, \\ R_k^{l-1}(t), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (11)$$

여기서 T 는 평균을 구하는 윈도우의 크기를 나타낸다.

식 (9)로 얻어지는 n^* 번째 부대역을 사용자 k^* 에게 할당하게 되고 이는 다음 식으로 주어진다.

$$\mathcal{S}_{n^*} = \mathcal{S}_n \cup \{k^*\} \quad (12)$$

하나의 공간 채널에서 모든 부대역의 할당이 이루어지고 나면 다른 공간 채널에서의 부대역을 할당하기 위해 스케줄러는 MIMO 공간 다중화 기법을 사용한다. 제안된 비례 공정 스케줄러는 공간 채널 간 간섭(co-channel interference)을 최소화하기 위해 각 부대역에서 선택되지 않은 사용자의 채널 벡터를 선택된 사용자의 채널 벡터가 스패닝 부분 공간의 직교 성분으로 갱신한다.

n 번째 부대역에서 선택된 사용자들의 채널 행렬을 $\mathbf{H}_n(\mathcal{S}_n)$ 로 나타내면 $\mathbf{H}_n(\mathcal{S}_n)$ 의 영 공간은 특이값분해(Singular value decomposition)을 통해 얻어지고 [11] 이는 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_n(\mathcal{S}_n) &= \mathbf{U} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{V}^H \\ &= [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^H \\ \mathbf{V}_2^H \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 \mathbf{U}, \mathbf{V} 는 유니타리행렬이고 $\boldsymbol{\Sigma}$ 는 다음을 만족하는 대각행렬이다.

$$\boldsymbol{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{\text{rank}(\mathbf{H}_n(\mathcal{S}_n))}) \quad (14)$$

식 (13)을 통해 $\mathbf{H}_n(\mathcal{S}_n)$ 의 영 공간을 얻는다.

$$\mathbf{U}_2^H \mathbf{H}_n(\mathcal{S}_n) = \mathbf{0} \quad (15)$$

$$\text{Null}(\mathbf{H}_n(\mathcal{S}_n)) = \mathbf{U}_2 \quad (16)$$

선택되지 않은 사용자의 채널 벡터는 식 (16)를 사용하여 다음 식과 같이 갱신된다.

$$\mathbf{h}_{k,n} = \mathbf{U}_2^H \mathbf{h}_{k,n} \quad \text{for } k \in \mathcal{S}_n^C \quad (17)$$

최대 공간 다중화 이득을 얻기 위해 제안된 비례 공정 스케줄러는 각 부대역에서 동시에 전송하는 사용자의 수가 기지국의 수신 안테나 수와 같아지게 사용자들을 선택한다.

4. 모의실험결과

본 절에서는 제안된 비례 공정 스케줄링 알고리즘의 성능을 기존의 공정성을 기반으로 하는 스케줄링 알고리즘과의 성능 차이를 알아본다. 하나의 셀이 있는 상향링크 다중 사용자 MIMO-OFDM 시스템에서 기지국은 2개 또는 4개의 수신 안테나를 가지고 있고 모든 사용자들은 하나의 송신 안테나를 가지고 있다. 보호 부반송파를 포함하여 1024개의 부반송파는 48개의 부대역으로 나누어지고 하나의 부대역은 18개의 부반송파들로 이루어져 있다. 사용자들은 셀 내에서 균일분포를 통해 위치해 있으며 각 사용자들의 평균 채널 이득은 사용자마다 기지국과의 거리에 따라 주어진다. 지속 사용

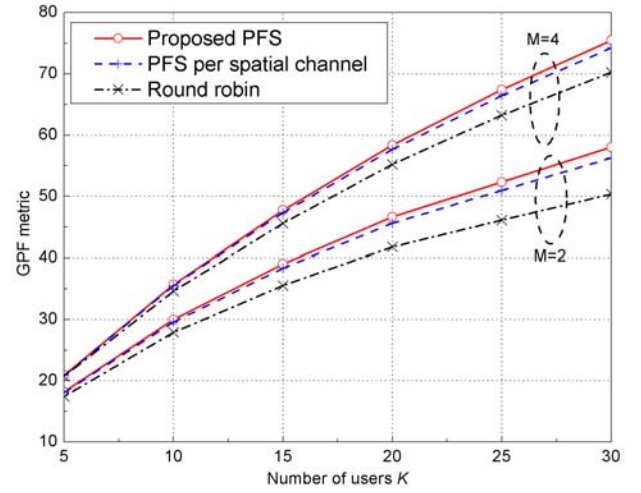


그림 2. 사용자 수에 따른 GPF 지표 성능

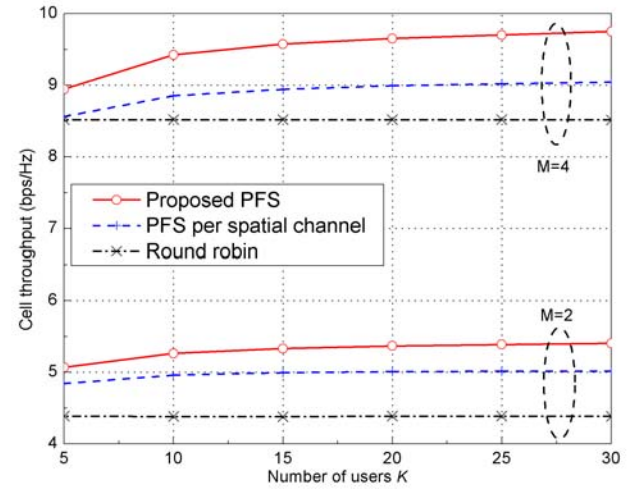


그림 3. 사용자 수에 따른 셀 수율 성능

자들을 가정하였으므로 하나의 데이터 전송시간동안은 채널이 변하지 않은 느린 페이딩 채널을 가정하였다.

그림 3은 사용자 수에 따른 제안된 비례 공정 스케줄링 알고리즘과 라운드 로빈 스케줄링 알고리즘 그리고 공간 채널 별 독립적인 부대역 할당이 이루어지는 비례 공정 스케줄링 알고리즘의 성능을 GPF 지표를 통해 비교하고 있다. 제안된 비례 공정 스케줄링의 알고리즘이 더 좋은 GPF 지표 성능을 나타내줌으로써 최적의 비례 공정 알고리즘에 더 가까운 성능을 보여준다.

그림 4는 제안된 비례 공정 스케줄링 알고리즘과 기존의 스케줄링 알고리즘의 성능을 셀 수율을 통해 비교하고 있다. 제안된 비례 공정 스케줄링 알고리즘이 더 좋은 셀 수율 성능을 가짐으로써 기존의 스케줄링 알고리즘보다 더 큰 시스템 전송용량을 달성하고 있음을 보이고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 상향링크 다중 사용자 MIMO-OFDM 시스템에서 낮은 복잡도를 가지는 새로운 비례 공정 스케줄링 알고리즘을 제안

하였다. 제안된 비례 공정 스케줄링 알고리즘에서는 하나의 공간 채널 내에서 부대역을 반복 단계를 통해 할당한다. 가장 큰 PFS 지표를 가지는 사용자에게 부대역을 할당하고 나면 가상의 부분적 갱신을 통해 남아있는 부대역의 할당이 이루어진다. 하나의 공간 채널 내에서의 모든 부대역 할당이 완료되면 사용자들의 채널 행렬을 기반으로 각 부대역에서의 동시에 전송하는 사용자들의 조합을 선택하게 된다. 모의실험결과는 제안된 비례 공정 스케줄링 알고리즘이 더 좋은 공정성과 더 높은 셀 수율을 가져다주는 것을 보이고 있다.

6. 참고 문헌

[1] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Commun.*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, Mar. 1998.

[2] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *Eur. Trans. Telecommun.*, vol. 10, pp. 585-598, Nov. 1999.

[3] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 1747-1758, Oct. 1999.

[4] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Larois, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 48, no. 6, pp. 1277-1294, June 2002.

[5] A. Jalali, R. Padovani, and R. Pankaj, "Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, Tokyo, Japan, May 2000, pp. 1854-1858.

[6] M. Kaneko, P. Popovski, and J. Dahl, "Proportional fairness in multicarrier system: upper bound and approximation algorithms," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 462-464, June 2006.

[7] R. W. Heath, S. Sandhu, and A. J. Paulraj, "Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 5, no. 4, pp. 142-144, Apr. 2001.

[8] P. Viswanath and D. N. C. Tse, "Sum capacity of the vector gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 8, pp. 1912-1921, Aug. 2003.

[9] D. N. C. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2005.

[10] H. Kim and Y. Han, "A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 3, pp. 210-212, Mar. 2005.

[11] G. H. Golub and C. F. Van Loan, *Matrix Computations*, 3rd ed. Baltimore, MD: Johns Hopkins Univ. Press, 1996.

[12] J. Choi and J. H. Lee, "Sounding subband allocation algorithm for proportional fair scheduling in OFDMA/FDD uplink," *Electron. Lett.*, vol. 43, no. 9, pp.539-540, Apr. 2007.