

논문 2010-47TC-7-6

MIMO 시스템의 가중합 전송률 최대화를 위한 최적 전송 전력의 닫힌 형태 표현

(Closed-form Expressions for Optimal Transmission Power Achieving Weighted Sum-Rate Maximization in MIMO Systems)

신석호*, 김재원*, 박종현*, 성원진**

(Sukho Shin, Jaewon Kim, Jonghyun Park, and Wonjin Sung)

요약

다중 사용자 MIMO (multiple-input multiple-output) 시스템에서 사용자의 합 전송률을 최대화시키는 SRM (sum-rate maximization) 스케줄러를 적용하는 경우, 셀 경계에 위치하거나 채널 환경이 좋지 않은 사용자는 선택받지 못하게 되는 공정성 문제를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 사용자 간의 공정성을 향상시키기 위해 각 사용자 별 평균 전송률의 가중치를 고려한 합 전송률을 최대화하는 WSRM (weighted sum-rate maximization) 스케줄러를 사용한다. 이를 활용하여 6-섹터 협력 전송 시스템에서 WSRM을 위한 최적 전송 전력과 시스템의 WSR (weighted sum-rate)의 닫힌 형태 표현 수식을 유도하며, 유도한 수식을 기반으로 3-섹터 협력 전송 시스템에서 WSRM을 위한 최적 전송 전력을 찾는 알고리즘을 제안한다. 닫힌 형태 표현으로 유도한 수식과 제안한 알고리즘을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분산 MIMO 시스템에서 SRM 스케줄러와 WSRM 스케줄러의 합 전송률 및 평균 전송률의 로그 합 성능을 비교한다. 또한 WSRM 스케줄러 방식이 하위 사용자 성능을 향상시킴을 보임으로써 사용자 간의 공정성 문제를 개선할 수 있는 방식임을 검증한다.

Abstract

When multi-user MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) systems utilize a sum-rate maximization (SRM) scheduler, the throughput of the systems can be enhanced. However, fairness problems may arise because users located near cell edge or experiencing poor channel conditions are less likely to be selected by the SRM scheduler. In this paper, a weighted sum-rate maximization (WSRM) scheduler is used to enhance the fairness performance of the MIMO systems. Closed-form expressions for the optimal transmit power allocation of WSRM and corresponding weighted sum-rate (WSR) are derived in the 6-sector collaborative transmission system. Using the derived results, we propose an algorithm which searches the optimal power allocation for WSRM in the 3-sector collaborative transmission system. Based on the derived closed-form expressions and the proposed algorithm, we perform computer simulations to compare performance of the WSRM scheduler and the SRM scheduler with respect to the sum-rate and the log-sum-of-average rates. We further verify that the WSRM scheduler efficiently improves fairness performance by showing the enhanced performance of average transmission rates in low percentile region.

Keywords: WSRM 스케줄러, 다중 사용자 MIMO, 공정성, 분산 안테나 시스템.

* 학생회원, ** 평생회원, 서강대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2010-C1090-1031-0009).

접수일자: 2010년6월9일, 수정완료일: 2010년7월17일

I. 서론

다수의 안테나를 이용한 다중 입력 다중 출력 (MIMO, multi-input multi-output) 전송 방식을 통해 무선 통신 시스템의 전송 효율을 향상하기 위한 방법이

활발히 연구되고 있다^[1~2]. MIMO 시스템은 공간 다중화 기법을 통해 주파수 효율 및 시스템의 전송 효율을 증대할 수 있을 뿐 아니라, 공간 다이버시티 기법을 통해 전송 품질을 개선시킬 수 있는 장점이 있다^[3]. 특히 최근 들어 지리적으로 분산된 다수의 기지국들 간의 협력적 전송을 통해 셀 경계에 존재하거나 채널 상태가 좋지 않은 사용자들의 성능을 효과적으로 개선시킬 수 있는 분산 MIMO 시스템이 제안되었다. 기존의 비협력 전송시스템에서와 마찬가지로, 분산 MIMO 시스템의 경우에도 협력적 전송에 참여하는 기지국들이 동시에 전송하는 사용자들의 집합 구성 방식에 따라 전반적인 시스템 전송 효율이나 사용자 별 공평성이 달라질 수 있기 때문에, 다양한 성능지표를 기반으로 한 스케줄링 방식들의 제안이 필요하다^[4~5].

기존에 제안된 다양한 스케줄러 방식 중, 대표적인 방식 중 하나로 사용자의 합 전송률을 최대화 하는 SRM (sum-rate maximization) 스케줄러는 동시 사용자 후보 중 시스템의 효율성을 극대화시키는 사용자들의 집합을 선택함으로써 MIMO 시스템의 주파수 효율을 향상시키는 스케줄러이다^[6~7]. 그러나 일반적인 셀룰러 환경에서 SRM 스케줄러를 사용할 경우, 사용자 별로 상대적으로 채널 상태가 좋지 않거나 또는 셀 가장자리에 위치하는 경우에는 스케줄러에 의해 지속적으로 선택 받지 못하는 사용자가 발생할 수 있으며, 이는 다수 사용자 간의 공평성 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 각 사용자 별로 가중치를 고려한 합 전송률을 최대화 (WSRM, weighted sum-rate maximization) 하는 스케줄러가 제안되었으며, 대표적인 WSRM 스케줄러 방식으로는 PF 스케줄러를 들 수 있다^[8~11]. 이는 사용자별로 현재 순간의 전송률 뿐만 아니라 과거 시간동안의 평균 전송률을 함께 고려함으로써 지속적으로 스케줄러에 의해 선택되지 못한 사용자의 가중치를 높여줌으로써 시스템의 전송률 향상 이득 및 다수 사용자 간 공평성 향상 이득을 얻을 수 있는 방식이다.

본 논문에서는 현실적 이동통신 셀룰러 시스템의 지리적 특성을 반영하여 6-섹터 협력 전송 시스템과 3-섹터 협력 전송 시스템을 고려하며, 각각의 경우에 대하여 WSRM을 위한 최적의 전송 전력 할당 문제를 다룬다. 보다 구체적으로, 협력적 전송에 참여하는 기지국과 동시 사용자 수가 2인 6-섹터 협력 전송 시스템에서 WSRM을 만족하는 사용자의 최적 전송 전력 할당을

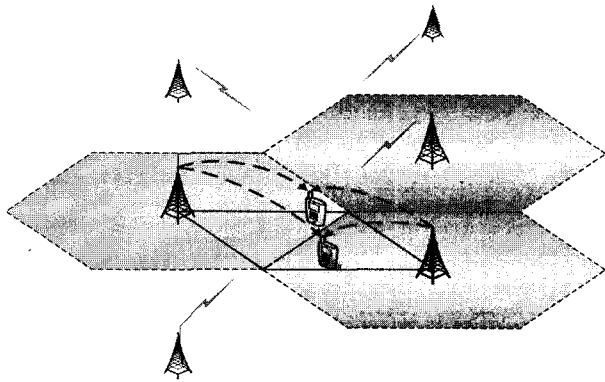
단한 형태 표현으로 나타낸다. 특히 이는 두 명 사용의 경우에 대해서 broadcast channel의 capacity로 알려진 Caire^[12]의 결과에 가중치를 포함한 일반화된 형태이다. 유도한 결과를 기반으로 하여 협력적 전송에 참여하는 기지국과 동시 사용자 수가 3인 3-섹터 협력 전송 시스템에서는 WSRM을 달성하는 최적 전송 전력을 찾는 알고리즘을 제안한다. 또한 WSRM 및 SRM 스케줄러를 분산 MIMO 시스템에 적용하여 다수 사용자의 합 전송률, 평균 전송률의 로그 합, 그리고 평균 전송률의 CDF(cumulative distribution function)로 스케줄링 방식에 따른 성능을 비교하고 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 본 논문의 시스템 모델과 신호 모델을 정의하며 WSRM 스케줄러에 대해 설명한다. III 장에서는 6-섹터 협력 전송 시스템에서 WSRM을 만족하는 최적 전송 전력을 단한 형태 표현으로 나타내고, 이를 이용하여 3-섹터 협력 전송 시스템에서 WSRM을 만족하는 최적 전송 전력을 찾는 알고리즘을 제안한다. IV 장에서는 SRM 스케줄러와 WSRM 스케줄러의 성능을 비교 및 분석하며 마지막으로 V 장에서 결론을 맺는다.

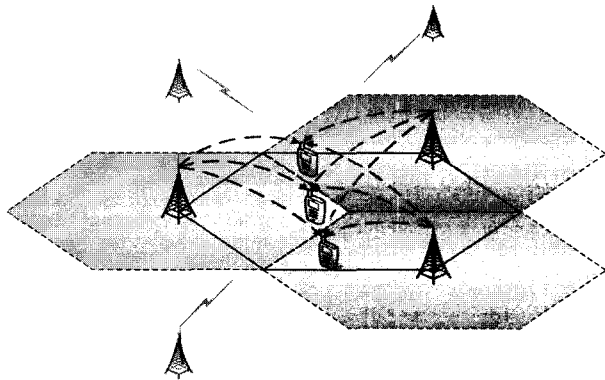
II. 신호 모델 및 WSRM

1. 시스템 모델 및 신호 모델

다수 개의 셀로 이루어진 일반적인 이동통신 셀룰러 시스템을 셀 내 섹터 구분 방식 및 기지국 간 협력 방식에 따라 인접한 2 개의 기지국이 협력적으로 신호를 전송하는 그림 1-(a)의 6-섹터 협력 전송 시스템과 인접한 3 개의 기지국이 협력적으로 신호를 전송하는 그림 1-(b)의 3-섹터 협력 전송 시스템으로 모델링한다. 협력 전송에 참여하는 기지국들은 다수 개의 단말들을 위한 신호를 동시에 전송하며, 이로 인해 협력 전송 클러스터 내부에서 다수 사용자 간 간섭 성분이 발생한다. 한편, 협력 전송에 참여하지 않는 시스템 내 기지국들로부터의 외부 셀 간섭 신호가 발생하여 각 단말기의 수신 신호에 영향을 미친다. 협력에 참여하는 M 개의 기지국과 협력 신호를 수신 받는 K 명의 사용자가 모두 단일 안테나를 갖는 환경을 가정하면, k 번째 사용자의 채널 벡터를 $\mathbf{h}_k = [h_{k1}, \dots, h_{kM}]$ 으로 나타낼 수 있다. 이때 h_{km} 은 k 번째 사용자와 m 번째 기지국간의 무선 채널로써 기지국과 사용자 사이의 거리를 $d_{k,m}$ 로 정의하고 기지국과 사용자 사이의 경로감쇄상수가 ρ 일 때



(a) 6-섹터 협력 전송 시스템
(a) 6-sector cooperative transmission system



(b) 3-섹터 협력 전송 시스템
(b) 3-sector cooperative transmission system

그림 1. 분산 다중 사용자 MIMO 시스템
Fig. 1. Distributed multi-user MIMO system.

$d_{k,m}^{-\rho}$ 의 경로 손실이 발생한다. 각 단말 별 채널 행렬의 연결을 통해 $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1^T, \dots, \mathbf{h}_K^T]^T$ 와 같이 $K \times M$ 의 크기를 갖는 복소 가우시안 하향링크 채널 행렬을 구성할 수 있다. 이를 활용하여 K 명 사용자의 수신 신호를 연결한 수신 신호 벡터는

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{z} \tag{1}$$

로 나타 수 있으며, 이때 $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_K]^T$ 는 협력 기지국들로부터의 전송신호 벡터이며 $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_K]^T$ 는 외부 셀에 의한 간섭 신호와 잡음 신호의 합 벡터로 각각의 원소 z_k 는 평균이 0, 분산이 σ_k^2 의 값을 가진다. 일반적으로 σ_k^2 는 각 단말들의 시스템 내 발생 위치 및 채널 환경 등에 대한 영향에 의해 서로 상이한 값을 갖게 되지만, 이하에서는 대각행렬 $[1/\sigma_1, \dots, 1/\sigma_K]$ 를 수신 신호에 곱해줌으로써 간섭 신호와 잡음 신호의 분산을 1로 정규화 시키는 과정이 미리 수행된 수신 신호 벡터 \mathbf{y} 및 채널

널 \mathbf{H} 를 가정한다.

시스템 내 각 사용자들에게 신호를 동시에 전송하기 위하여 각 사용자 별로 빔포밍 및 전력제어를 수행하여 전송신호 벡터 \mathbf{x} 를 생성하며, 이때 k 번째 사용자에게 할당되는 송신 전력 p_k 는

$$\sum_{i=1}^K p_i \leq P, p_k \geq 0 \tag{2}$$

과 같이 각 사용자들을 위한 전송 전력의 합이 전체 송신 전력 P 보다 작거나 같아야 한다는 구속조건을 갖는다. 섹터 별로 다수 명의 사용자가 존재하는 환경에서 기지국 간 협력을 통해 동시에 신호를 전송 받는 사용자 수는 협력에 참여하는 기지국의 개수와 같거나 작아야 하며 ($K \leq M$), 각 섹터 당 한명씩의 사용자가 반드시 동시 전송 사용자로 선택되어야 함을 가정한다. 동시 전송 사용자를 선택하는 스케줄러로 우리는 사용자의 가중치를 고려한 합 전송률을 최대화하는 WSRM 스케줄러 방식을 활용한다. 섹터 당 발생하는 사용자 수가 N 명일 경우, 6-섹터 협력 전송 시스템과 3-섹터 협력 전송 시스템은 각각 $(N C_1)^2$, $(N C_1)^3$ 의 조합을 모두 고려하여 성능지표를 최대의 값을 만족하는 최적의 조합을 선택한다.

2. WSRM 스케줄러

분산 MIMO 시스템에서 협력적으로 신호를 전송하는 기지국들은 broadcast 채널에서 capacity를 달성할 수 있는 방식으로 알려진 DPC를 적용한 최적 전송방식을 사용하는 환경을 고려한다^[12~13]. 스케줄러에 의해 선택된 동시전송을 받는 K 개의 단말 인덱스를 $\pi = \{\pi_1, \dots, \pi_K\}$ 와 같은 집합으로 정의할 때, π_k 는 k -번째로 DPC 디코딩을 수행할 단말 인덱스가 되고 해당하는 순간 전송률은 R_{π_k} 는

$$R_{\pi_k} = \log \frac{\det \left(\mathbf{I} + \sum_{j=1}^k \mathbf{h}_{\pi_j}^H \mathbf{h}_{\pi_j} p_{\pi_j} \right)}{\det \left(\mathbf{I} + \sum_{j=1}^{k-1} \mathbf{h}_{\pi_j}^H \mathbf{h}_{\pi_j} p_{\pi_j} \right)} \tag{3}$$

로 나타낼 수 있다^[10]. 따라서 스케줄러에 의하여 동시 사용자로 전송된 사용자 인덱스를 k^* 라 정의하면 평균 전송률 T_k 의 업데이트를

$$T_k(i+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k(i) & k \neq k^* \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k(i) + \frac{1}{t_c} R_k(i) & k = k^* \end{cases} \quad (4)$$

와 같이 수행한다. 이때 i 는 진행되고 있는 프레임의 의미하고, t_c 는 T_k 의 계산을 위한 moving average의 window size이다^[14~15]. 공평성과 전송률을 동시에 고려할 수 있는 PF 스케줄링 방식을 활용하는 경우, 수식 (4)를 통해 구한 T_k 의 역수를 WSRM 스케줄러의 가중치의 값으로 활용하여

$$\max \sum_{k=1}^K T_{\pi_k}^{-1} R_{\pi_k} = \max \sum_{k=1}^K w_{\pi_k} R_{\pi_k} \quad (5)$$

와 같은 WSRM 목적함수를 정의한다. 이때 $w_{\pi_1} \geq w_{\pi_2} \geq \dots \geq w_{\pi_K}$ 를 만족해야 하도록 각 단말들의 DPC 디코딩 순서를 결정하도록 하여야 하며, 이하에서는 우리는 표기법의 간략화를 위해 $\pi_k = k$ 로 가정한다. 따라서 수식 (3)의 순간 전송률을 활용하여, 동시 전송 사용자가 K 명일 때의 가중치 합 전송률을 나타내면

$$f(\mathbf{p}) = \sum_{k=1}^K (w_k - w_{k+1}) \log \left\{ \det \left(\mathbf{I} + \sum_{j=1}^k \mathbf{h}_j^H \mathbf{h}_j p_j \right) \right\} \quad (6)$$

와 같은 concave 함수로 유도되며, 이때 $w_{K+1} = 0$ 이 된다. 참고문헌 [10]에서는 수식 (6)을 Lagrangian dual 문제로 변환하여 임의의 K 에 대한 최적 전력 할당 벡터 \mathbf{p} 를 유도하려 하였으나, 문제의 수학적 복잡도로 인하여 닫힌 형태의 해를 제시하는 대신 iterative water-filling 형태의 알고리즘을 제시하였다.

III. WSRM을 위한 최적 전송 전력

6-섹터 협력 전송 시스템일 경우 WSRM을 만족하는 최적 전송 전력을 유도하기 위하여, 수식 (6)에 $K=2$ 를 대입한 후 이를 p_k 에 대한 닫힌 해 형태의 수식으로 정리한다. WSRM을 만족하는 최적의 p_1 를 찾기 위해서 concave 함수의 특성을 이용한다. 따라서 p_1 에 대한 도함수 $f'(p_1)$ 가 필요하며 이는

$$f'(p_1) = \frac{\|\mathbf{h}_1\|^2(w_1 + w_2)}{1 + P\|\mathbf{h}_1\|^2} + \frac{w_2\{\eta - 2\det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)p_1\}}{1 + P\|\mathbf{h}_2\|^2 + \eta p_1 - \det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)p_1^2} \quad (7)$$

와 같이 나타낼 수 있으며 이 때 η 는 아래와 같다.

$$\eta = \|\mathbf{h}_1\|^2 - \|\mathbf{h}_2\|^2 + P\det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H) \quad (8)$$

$f'(p_1) = 0$ 과 $p_1 \geq 0$ 을 만족하는 p_1 의 값을 p_1^* 라 하며 이를 수식적으로 유도하여 정리하면

$$p_1^* = \frac{\lambda + \alpha}{2\|\mathbf{h}_1\|^2 \det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)(w_1 + w_2)} \quad (9)$$

와 같은 닫힌 형태 표현으로 나타낼 수 있다. 이 때 λ , α 는 아래와 같다.

$$\lambda = \eta w_1 \|\mathbf{h}_1\|^2 - 2w_2 \det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H) \\ \alpha = \sqrt{\lambda^2 + 4\|\mathbf{h}_1\|^2 \det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)(w_1 + w_2)} \\ \sqrt{\{\|\mathbf{h}_1\|^2(1 + P\|\mathbf{h}_2\|^2)(w_1 - w_2) + \eta w_2\}} \quad (10)$$

단, p_1^* 는 수식 (2)의 조건을 만족해야 하므로 수식으로 유도한 p_1^* 가 P 보다 클 경우는 P , 0보다 작을 경우는 0을 가진다.

이상에서 유도한 값을 이용하여 최적 전력 할당 벡터 $\mathbf{p}^* = [p_1^*, P - p_1^*]$ 를 정의하며 이를 활용하여 최적의 WSR 값을 구하면

$$f(\mathbf{p}^*) = w_1 \log \left\{ \frac{\alpha + w_1 \beta}{2(w_1 + w_2) \det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)} \right\} \\ + w_2 \log \left\{ \left(\frac{w_2(\alpha \beta + \gamma)}{\|\mathbf{h}_1\|^4 (w_1 + w_2)(\alpha + w_1 \beta)} \right) \right\} \quad (11)$$

와 같이 나타낼 수 있으며 이 때, β 와 γ 는

$$\beta = \eta \|\mathbf{h}_1\|^2 + 2\det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H) \\ \gamma = w_1 \|\mathbf{h}_1\|^4 \left[\frac{\text{tr}(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)\{\text{tr}(\mathbf{H}\mathbf{H}^H) + 2P\det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)\}}{-4|\text{tr}(\mathbf{h}_1^H \mathbf{h}_2)|^2 + P^2 \det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^2} \right] \\ + 4w_2 \det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H) |\text{tr}(\mathbf{h}_1^H \mathbf{h}_2)|^2 (1 + P\|\mathbf{h}_1\|^2) \quad (12)$$

이 된다. 특히 수식 (11)는 두 명 사용자의 경우에 대해서 broadcast channel의 capacity로 알려진 Caire^[12] 결과의 가중치를 포함한 일반화된 형태이다.

다음으로 3-섹터 협력 전송 시스템에서 WSRM을 만족하는 최적 전송 전력을 찾는 알고리즘을 다음과 같이 제안한다. 세 명의 사용자가 있을 경우, 사용자들의 전송 전력이 의존적이므로 6-섹터 협력 전송 시스템에서와 같이 닫힌 형태 표현으로 나타내는데 어려움이 있

다. 따라서 한 명의 사용자의 전송 전력을 고정함으로써 상수화하여 두 명의 사용자에 대해 WSRM을 만족하는 최적 전송 전력을 수식 (9)을 통해 구한다. 이 때 본래의 채널에서 고정된 사용자의 채널을 제외한 새로운 채널을 이용한다. 이 과정을 반복하여 WSRM을 만족하는 최적 전송 전력을 찾는 알고리즘을 제시한다. step 1)에서 최적 전송 전력 p_i^* 와 P_{\max} 를 초기화 시켜준다. step 2)에서는 l 번째 사용자의 전송 전력을 고정시킨 후, 수식 (9)를 기반으로 하여 WSRM을 만족하

step 1) 초기화

$$i = 1, \mathbf{p}_i^* = [p_{1,i}^*, p_{2,i}^*, p_{3,i}^*] = \frac{P}{3}$$

$$S = \{1, 2, 3\}, P_{\max} = P - p_{1,i}^*$$

step 2) WSRM을 만족하는 최적 전송 전력 찾기

$$i = i + 1$$

for $l = 1 : 3$

$$j, k \in S/\{l\}, j < k \quad m = \begin{cases} l+1, & l < 3 \\ 1, & l = 3 \end{cases}$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_j \\ \mathbf{h}_k \end{bmatrix}$$

$$p_{m,i}^* = \frac{\lambda_i + \alpha_i}{2 \|\tilde{\mathbf{h}}_1\|^2 \det(\tilde{\mathbf{H}}_m \tilde{\mathbf{H}}_m^H) + (w_j + w_k)}$$

$$\eta_m = \|\tilde{\mathbf{h}}_1\|^2 - \|\tilde{\mathbf{h}}_2\|^2 + P_{\max} \det(\tilde{\mathbf{H}}_m \tilde{\mathbf{H}}_m^H)$$

$$\lambda_m = \eta_m w_j \|\tilde{\mathbf{h}}_1\|^2 - 2w_k \det(\tilde{\mathbf{H}}_m \tilde{\mathbf{H}}_m^H)$$

$$\alpha_m = \sqrt{\frac{\lambda_m^2 + 4 \|\tilde{\mathbf{h}}_1\|^2 \det(\tilde{\mathbf{H}}_m \tilde{\mathbf{H}}_m^H) (w_j + w_k)}{\left\{ \|\tilde{\mathbf{h}}_1\|^2 (1 + P_{\max} \|\tilde{\mathbf{h}}_2\|^2) (w_j - w_k) \right\} + \eta_m w_k}}$$

$$P_{\max} = P - p_{m,i}^*$$

end

step 3) WSR 계산 및 알고리즘 반복 여부 확인

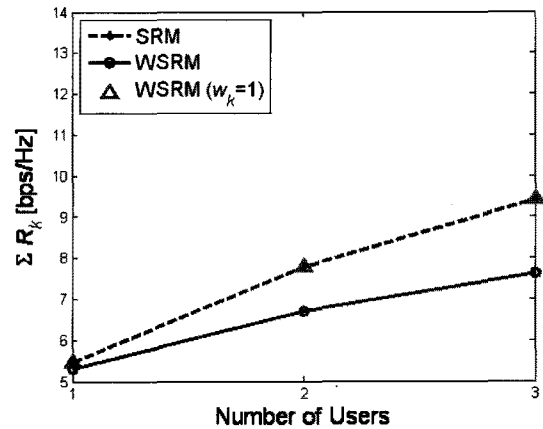
if $|f_i(\mathbf{p}_i^*) - f_{i-1}(\mathbf{p}_{i-1}^*)| \leq \epsilon$ stop the algorithm, else go to the step 2)

는 m 번째 사용자의 최적 전송 전력 $p_{m,i}^*$ 을 구하며 P_{\max} 를 업데이트한다. step 2)에서 구한 최적 전송 전력 p_i^* 과 수식 (6)을 통해 WSRM $f(\mathbf{p}_i^*)$ 을 구한다.

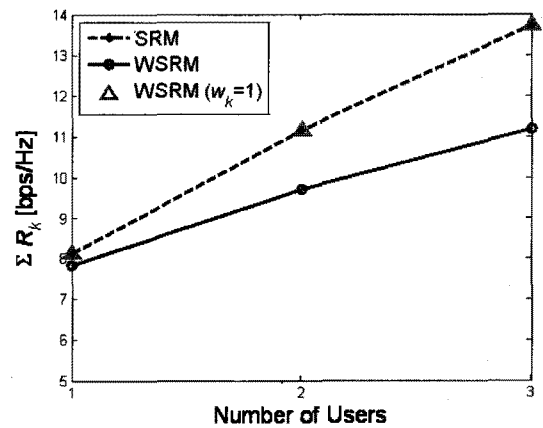
$f(\mathbf{p}_i^*)$ 과 $i-1$ 번째의 $f(\mathbf{p}_{i-1}^*)$ 의 차이가 임계값 ϵ 보다 작을 경우 알고리즘을 멈추며 그렇지 않을 경우 다시 step 2)로 돌아가 알고리즘을 반복한다.

IV. 성능평가

분산 MIMO 시스템에서의 WSRM 스케줄러와 SRM 스케줄러의 성능 비교 및 분석을 위하여 Monte-Carlo 모의실험을 수행한다. 인접한 기지국사이의 거리는 500m이며 채널 환경은 레일레이 페이딩 환경을 고려한다. 섹터 당 발생하는 동시 사용자 후보 N 이 각각 1, 2, 3이고, 프레임 간 채널의 상관도는 0이며 각 프레임 구간동안 사용자는 고정되어 있다고 가정한다. 최대 전송



(a) 6-섹터 협력 전송 시스템
(a) 6-sector cooperative transmission system



(b) 3-섹터 협력 전송 시스템
(b) 3-sector cooperative transmission system

그림 2. 분산 다중 사용자 MIMO 시스템
Fig. 2. Distributed multi-user MIMO system.

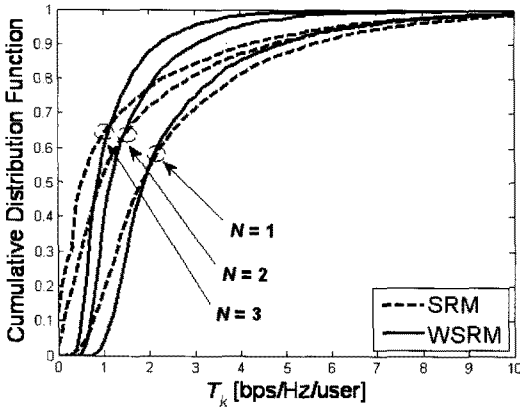
전력 $P=1$ 로 제한했으며 전력 손실을 일으키는 경로 감쇄 상수 $\rho=3.76$ 이다. 스케줄러의 창 크기 $t_c=100$ 으로 하였다.

성능 평가를 위해 합 전송률, T_k 분포의 CDF 및 T_k 의 로그 합을 이용한다. 합 전송률로 시스템의 효율성을 평가할 수 있다. T_k 분포의 CDF는 시스템에서 존재하는 사용자간의 전송률 분포 차이를 확인할 수 있으며 T_k 의 로그 합은 사용자들 간의 공평성을 확인할 수 있는 성능 지표이다.

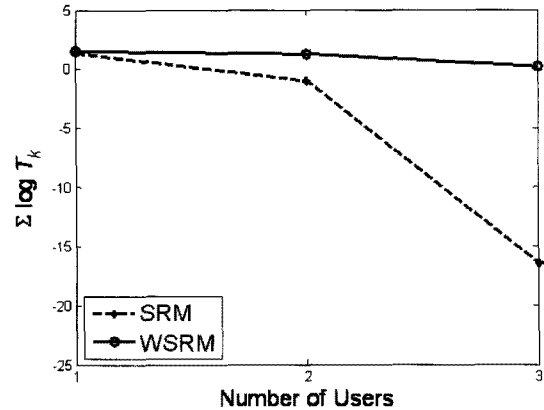
그림 2는 N 이 증가함에 따라 WSRM 및 SRM 스케줄러를 각각 적용했을 때, 합 전송률을 나타낸 그림이다. 앞서 언급한 바와 같이 $w_k=1$ 인 WSRM 스케줄러

의 합 전송률은 SRM 스케줄러의 합 전송률과 동일한 값을 갖는다. $w_k \neq 1$ 인 WSRM 스케줄러의 합 전송률은 SRM 스케줄러의 합 전송률 측면에서 성능 차이가 존재하는데 이는 각 스케줄러의 목적 함수가 다르기 때문이다. SRM 스케줄러는 동시 사용자 후보 중 합 전송률이 가장 큰 사용자를 선택하기 때문에 사용자 간의 공평성을 고려한 WSRM 스케줄러에 비해 성능 이득이 존재한다. N 이 증가하면 선택할 수 있는 사용자 조합의 경우의 수가 증가하기 때문에 두 스케줄러 모두 합 전송률이 증가한다.

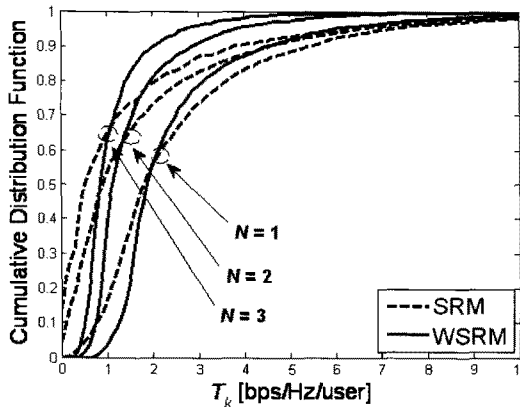
그림 3은 WSRM 스케줄러와 SRM 스케줄러의 T_k 분포를 CDF로 나타낸 그림이다. 각 스케줄러를 이용했



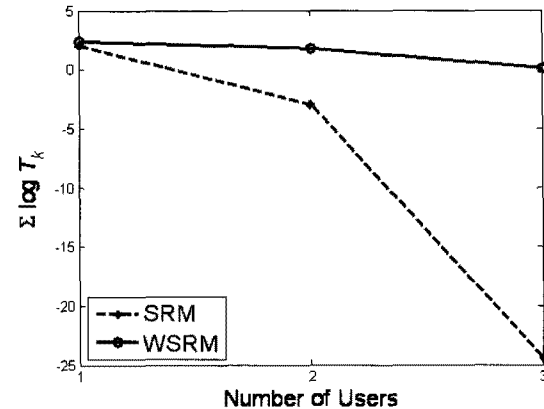
(a) 6-섹터 협력 전송 시스템
(a) 6-sector cooperative transmission system



(a) 6-섹터 협력 전송 시스템
(a) 6-sector cooperative transmission system



(b) 3-섹터 협력 전송 시스템
(b) 3-sector cooperative transmission system



(b) 3-섹터 협력 전송 시스템
(b) 3-sector cooperative transmission system

그림 3. 동시 사용자 후보 수 증가에 따른 평균 전송률의 CDF
Fig. 3. CDF of average rate with an increasing number of users.

그림 4. 동시 사용자 후보 수 증가에 따른 평균 전송률의 로그 합
Fig. 4. Sum of log average rate with an increasing number of users.

표 1. 스케줄러에 따른 하위 사용자들의 성능 [bps/Hz/user]
Table 1. Performance of low percentile users for different scheduler types. [bps/Hz/user]

협력 전송 시스템		N = 1		N = 2		N = 3	
		WSRM	SRM	WSRM	SRM	WSRM	SRM
6-섹터	5%	1.02	0.61	0.63	0.04	0.44	0
	10%	1.16	0.77	0.71	0.13	0.51	0
	50%	1.88	1.83	1.15	0.92	0.86	0.52
3-섹터	5%	1.05	0.54	0.64	0.01	0.43	0
	10%	1.24	0.77	0.74	0.11	0.51	0
	50%	1.88	1.18	1.13	0.91	0.86	0.53

을 때, T_k 분포를 살펴보면 하위 사용자들 측면에서 WSRM이 SRM에 비해 성능 이득이 항상 존재한다. 이는 WSRM 스케줄러는 사용자 간의 가중치를 이용함으로써, 공평성을 고려하므로 셀 경계에 존재해서 선택되지 못하는 하위 사용자들에게도 동시 전송 사용자로 선택되는 기회가 주어지기 때문이다. N 이 커질수록 두 스케줄러의 공평성 측면에서 차이가 심해지는데 WSRM 스케줄러에 비해 SRM 스케줄러의 상위 사용자와 하위 사용자 간의 분포 차이가 더욱 커진다.

그림 4은 각 스케줄러를 적용했을 경우, 평균 전송률 T_k 의 로그 합을 도시한 그림이다. T_k 의 로그 합이 사용되며 이 값이 최대가 될 때, WSRM을 만족한다. 이는 사용자들 간의 공평성을 알 수 있는 지표이며 그 이유는 \log 함수가 convex 형태의 함수이므로 T_k 의 값이 크더라도 T_k 의 로그 값은 계속 커지지 않기 때문이다. 따라서 T_k 의 값이 작은 사용자에게도 자원을 할당할 수 있어서 사용자 간의 공평성을 확인할 수 있다. $N=1$ 일 때, T_k 의 로그 합은 차이가 미미하다. 하지만 N 이 커질수록 WSRM 스케줄러의 T_k 의 로그 합 성능 이득이 커지는데 그 이유는 WSRM 스케줄러를 적용했을 경우의 하위 사용자와 상위 사용자 간의 분포 차이에 비해 SRM 스케줄러를 적용했을 경우, 하위 사용자와 상위 사용자 간의 분포 차이가 N 이 커질수록 크기 때문이다.

표 1은 그림 3에서 나타낸 T_k 의 CDF를 이용하여 하위 사용자 T_k 성능을 보인다. $N=1$ 일 때, 하위 5% 사용자의 T_k 성능을 보면 6섹터와 3섹터 협력 전송 시스템에서 각각 0.41 [bps/Hz/user]와 0.51 [bps/Hz/user]의 성능차이가 있으며 이는 67.2%와 94.4%의 이득이 존재하였다. 또한 N 이 증가할수록 SRM 스케줄러 대비 WSRM 스케줄러 성능 이득이 증가함을 확인할 수 있

다. $N=1$ 일 때, 3섹터 협력 전송 시스템에서 하위 10% 및 50% 사용자의 성능을 살펴보면 성능 이득은 각각 61%, 59.3%로써 하위 5% 사용자에게 비하여 줄어들었지만 여전히 존재함을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 분산 다중 사용자 MIMO 시스템 환경에서 사용자 간의 공평성을 고려한 WSRM 스케줄러를 적용하였다. 6-섹터 협력 전송 시스템에서는 WSRM을 위한 최적의 전송 전력을 닫힌 형태 표현으로 나타냈으며 이를 활용하여 3-섹터 협력 전송 시스템에서 WSRM을 만족하는 최적 전송 전력을 찾는 알고리즘을 제안했다. 이어지는 성능 평가에서는 SRM 스케줄러와의 합 전송률과 공평성의 지표가 되는 평균 전송률의 로그 합 성능을 평가하였다. 또한 섹터 당 발생하는 동시 사용자 후보가 증가할수록 하위 사용자와 상위 사용자 간의 분포 차이가 커짐을 CDF를 통해 확인하였으며 이를 바탕으로 SRM 스케줄러 대비 WSRM 스케줄러의 평균 전송률의 로그 합 성능 이득이 있음을 검증하였다. SRM 스케줄러 대비 WSRM 스케줄러의 평균 전송률 성능 이득을 5%, 10% 및 50% 하위 사용자에게 대해 정량적인 수치를 제시하였다. 특히 섹터 당 사용자가 1명일 경우, 하위 5% 사용자의 성능 이득이 6섹터와 3섹터 협력 전송 시스템에서 각각 67.2%와 94.4%임을 보였다. 이를 통해 WSRM 스케줄러는 사용자 간의 공평성 문제를 해결할 수 있는 방안임을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading

- environment when using multiple antennas," *Bell Labs. Tech. Journal*, vol. 1, pp. 41-59, 1996.
- [2] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bolcskei, "An overview of MIMO communications—A key to gigabit wireless," in *Proc. IEEE*, vol. 92, pp. 198-218, Feb. 2004.
- [3] G. J. Foschini and G. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 6, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [4] 양장훈, 장승훈, 김동구, "제로 포싱 빔 형성과 반직교 기반 사용자 선정을 이용한 클러스터 기반 셀 협력 전송 방식의 성능에 대한 연구," 전자공학회 논문지, 제 45권 TC편, 제 10호, 1-9쪽, 2008년 10월.
- [5] H. Zhou, P. Fan, and J. Li, "Cooperative proportional fairness scheduling for wireless transmissions," in *Proc. 2009 Int. Conf. Commun. and Mobile Com.*, Leipzig, Germany, June 21-24, 2009.
- [6] P. Viswanath and D. N. C. Tse, "Sum capacity of the vector Gaussian broadcast channel and downlink-uplink duality," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 8, pp. 1912-1921, Aug. 2003.
- [7] S. Vishwanath, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Duality, achievable rates and sum rate capacity of Gaussian MIMO broadcast channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2658-2668, Oct. 2003.
- [8] Y. J. Choi, J. Kim, and S. Bahk, "Downlink scheduling with fairness and optimal antenna assignment for MIMO cellular systems," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, vol. 5, pp. 3165-3169, Nov. 2004.
- [9] M. Kobayashi and G. Caire, "Joint beamforming and scheduling for a multi-antenna downlink with imperfect transmitter channel knowledge," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 7, pp. 1468-1477, Sep. 2007.
- [10] M. Kobayashi and G. Caire, "An iterative algorithm for maximum weighted sum-rate of Gaussian MIMO-BC," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 8, pp. 1640-1646, Aug. 2006.
- [11] 이지원, 성원진, "영점 강제 다중 사용자 MIMO 전송 시 셀 간 정보 교환을 활용한 협력적 PF 스케줄러의 성능 평가," 전자공학회 논문지, 제 47권 TC편, 제 2호, 40-46쪽, 2010년 2월.
- [12] G. Caire and S. Shamai, "On the achievable throughput of a multiantenna Gaussian broadcast channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 7, pp. 1692-1706, July 2003.
- [13] H. Weingarten, Y. Steinberg, and S. Shamai (Shitz), "The capacity region of the Gaussian multiple-input multiple-output broadcast channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 9, pp. 3936-3964, Sep. 2006.
- [14] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushayana, and A. Viterbi, "CDMA/HDR: A bandwidth-efficient high-speed wireless data service for nomadic users," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 38, no. 7, pp. 70-77, July 2000.
- [15] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming Using Dumb Antennas," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 48, no. 6, pp. 1277-1294, June 2002.

저 자 소 개



신 석 호(학생회원)
2009년 서강대학교
전자공학과 학사
2009년~현재 서강대학교
전자공학과 석사과정

<주관심분야 : 기지국 간 협력통신, 디지털통신, 분산 MIMO 시스템, 통계적통신이론>



박 종 현(학생회원)
2004년 서강대학교
전자공학과 학사
2006년 서강대학교
전자공학과 석사
2006년~현재 서강대학교
전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 기지국 간 협력통신, MU-MIMO, OFDM, Cross-layer design>



김 재 원(학생회원)
2007년 서강대학교
전자공학과 학사
2009년 서강대학교
전자공학과 석사
2009년~현재 서강대학교
전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 기지국 간 협력통신, MU-MIMO, Codebook design, 통계적 신호처리>



성 원 진(평생회원)
1990년 서울대학교
전자공학과 학사
1992년 University of Michigan
EECS 석사
1995년 University of Michigan
EECS 박사

1996년 1월~2000년 8월 Hughes Network Systems 책임 연구원

2000년 9월~현재 서강대학교 전자공학과 교수
<주관심분야 : 이동무선통신, 통계통신이론>