

다중 사용자 MIMO 시스템에서 전체 채널 용량을 최대화하기 위한 데이터 스트림 할당 기법

김 봉 석*, 최 권 휴* 정회원

Data Stream Allocation Algorithm for Maximizing Sum Capacity in Multiuser MIMO Systems

Bong-seok Kim*, Kwonhue Choi* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 블록 대각화 프리코딩 기법을 사용하는 다중 사용자 MIMO 하향링크 시스템에서 전체 채널 용량을 최대화하기 위한 데이터 스트림 할당 기법을 제안한다. 기존의 블록 대각화 프리코딩 기법은 모든 사용자에게 동일한 수의 데이터 스트림을 할당하고 water-filling에 의한 전력제어 만으로 전체 채널 용량을 최대화함으로써 데이터 스트림의 수의 차이에 의한 채널 용량의 이득을 스스로 제한했다. 제안하는 블록 대각화 프리코딩의 데이터 스트림 할당 기법은 시스템의 전체 채널 용량을 최대화하기 위하여 평균 채널 이득, 순시 채널 이득의 크기를 비교하여 채널 이득이 좋은 사용자에게 많은 수의 데이터 스트림을 할당하고 water-filling을 통한 전력 제어를 하는 방법으로 채널 이득에 대한 채널 용량을 최대화 시킨다. 본 논문에서 제안된 데이터 스트림 할당 기법을 이용하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 모의실험을 통해 증명했다.

Key Words: Stream Allocation, BD, Multiuser MIMO, Maximum Sum Capacity, Mean Channel Gain

ABSTRACT

In this paper, we propose the data stream allocation algorithms for maximizing sum capacity of downlink multiuser MIMO (Multiple-input Multiple-output) systems with BD (Block Diagonalization). The conventional BD precoding algorithms maximize the capacity by controlling power against channel gain of each user. In multiuser MIMO systems, however, the number of data streams for each user can be used to as another control parameter, which determines the capacity. This paper proposes the data stream allocation algorithm of BD for increasing capacity in multiuser MIMO systems. The proposed algorithm allocates unequal bit stream to each user based on channel matrix of each user for maximizing sum capacity. It is proved that proposed algorithm can achieve the significantly improved sum capacity by computer simulation.

I. 서 론

최근 무선 통신 시스템 분야에서는 고용량 고품질의 멀티미디어 서비스에 대한 수요의 증가와 사용자 수의 증가로 인하여 제한된 주파수 자원으로 고용량의 멀티미디어 데이터를 전송할 수 있는 다양한 송수신 방식에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 이 중에서도 다중 안테나를 사용하는 MIMO(Multiple-input Multiple-output) 시스템에 대한 연

구가 다각도로 진행되고 있다[1-7]. 특히, 그 중에서도 하나의 기지국과 다중 안테나를 사용하는 다수의 사용자가 통신을 하는 다중 사용자 MIMO 환경으로 관심이 집중되고 있다[2-7]. 특히, 4세대 이동통신 기술의 표준으로 고려되고 있는 LTE에서는 이미 다중 사용자 MIMO 채널에서 다중 사용자 동시 접속 모델로 CDMA (Code Division Multiple Access)가 아닌 SDMA (Spatial Division Multiple Access)를 선택하였으며, 이는 기본적으로 동일한 수의 송신 안테나와 수신 안테나를 이용하여 공간 다양성을

*영남대학교 정보통신공학과 광대역무선통신연구실, 교신저자 : 최권휴(gonew@ynu.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터(NIPA-2011-C1090-1131-0009)와 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의(No 2009-0088286) 지원을 받아 수행된 기초연구사업임
접수일자 : 2011년 1월 27일, 수정완료일자 : 2011년 2월 28일, 최종게재확정일자 : 2011년 3월 8일

연고 전송률을 향상시키기 위한 목적으로 사용된다.

전송률의 향상과 대역폭 효율을 위해서 동일한 채널을 사용하는 SDMA 방식으로 인해서 사용자 간의 동일 채널 간섭에 대한 문제가 제기되었다. 단일 사용자 MIMO 시스템에서는 각 안테나 사이의 간섭을 효과적으로 제거하고, 최적의 성능을 갖는 송수신 알고리즘으로 특이값 분해가 잘 알려져 있다. 하지만, 다중 사용자 MIMO 시스템에서는 사용자 간의 동일 채널 간섭이 존재하기 때문에 특이값 분해 기법의 경우 다중 사용자 환경에서는 적용이 어려운 단점을 가지므로, 이러한 문제를 해결하는 기법에 대한 연구는 필수적이라 할 수 있다. 이를 위해 다중 사용자 환경에서 사용자 간의 간섭 및 사용자의 안테나 간의 간섭을 효과적으로 제거하기 위하여 다양한 기법들이 연구되었다. 그 중에서도 특히 사용자간의 간섭 및 안테나 사이의 간섭을 송신단에서 완벽하게 제거하기 위한 방법으로 Dirty Paper Coding 기법이 제안되었다[3]. Dirty Paper Coding은 간섭을 제거하고 채널 용량 및 오류 확률에 대해 매우 뛰어난 성능을 보이지만, 송신단에서 각 사용자의 간섭 신호에 대한 비인과적 정보를 미리 알고 있어야 한다는 단점으로 인해서 현실적으로 완벽한 구현이 불가능하다.

Dirty Paper Coding 이외에도 다양한 프리코딩 기법들이 연구되어왔는데, 최근 기존의 프리코딩 기법들에 비해 간단하면서도 현실적으로 구현가능 한 블록 대각화 프리코딩 기법이 제안되었다[4]. 블록 대각화 프리코딩 기법은 각 사용자의 송신 신호를 다른 사용자들의 송신 신호의 영 공간에 있도록 하는 선형 프리코딩 기법이다. 이를 통해서, 사용자들에게 도달하는 신호의 간섭을 제거한다. 하지만, 블록 대각화 프리코딩 기법을 적용하기 위해서는 송신 안테나의 수가 수신 안테나 수의 총합보다 많거나 같아야 한다는 제한 조건이 있다. 이러한 제한 조건을 완화시키기 위하여, 블록 대각화 프리코딩 기법에 빔포밍을 적용한 기법이 제안되었다. 하지만, 이 기법 역시 최적의 빔포밍 행렬을 찾기 위한 반복적 계산으로 인해서 계산량이 지나치게 큰 문제점이 존재하기 때문에, 이를 해결하기 위하여 빔포밍 행렬을 간단하게 선택할 수 있는 기법이 제안되었다[2]. 하지만, 이 경우에도 모든 사용자에게 동일한 수의 데이터 스트림을 할당함으로써 송신 전력의 제어만으로 사용자가 요구하는 성능을 만족시켜야 하고, 이로 인해서 실제 얻을 수 있는 송신 전력 당 성능의 이득이 줄게 된다[5].

본 논문에서는 블록 대각화 프리코딩 기법을 사용하는 다중 사용자 MIMO 채널 환경에서 전체 채널 용량을 최대화하기 위하여 각 사용자의 데이터 스트림의 수를 최적화하는 기법을 제안한다. 제안된 기법은 데이터 스트림의 수 역시 하나의 채널 적응형 변수로 사용하여, 모든 사용자에게 동일한 채널 용량을 보장하면서도 최소한의 송신 전력만을 사용하거나, 동일한 전체 송신 전력 조건에서 더욱 큰 채널 용량을 얻을 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같이 이루어진다. II장에서는 다중 사용자 MIMO 시스템과 일반적인 다중 사용자 MIMO

블록 대각화 프리코딩 기법에 대해서 살펴본다. III장에서는 제안된 다중 사용자 MIMO 시스템에서 블록 대각화 프리코딩 기법의 데이터 스트림 할당 기법에 대해서 기술하고, IV 장에서는 실험을 통하여 기존의 기법들과 제안된 기법의 성능과 복잡도를 비교한다. 마지막으로 결론에서 본 논문을 끝맺는다.

II. 블록 대각화 프리코딩 기법의 시스템 모델

본 논문에서는 다중 사용자 MIMO (Multiple- Input Multiple-Output) 하향링크 채널 환경에서 K 명의 사용자가 시스템 내에 존재한다고 가정한다[2]. 기지국은 N_T 개의 송신안테나를 가지고 j 번째 사용자는 N_{R_j} 개의 수신 안테나를 가지며, 수신안테나의 총합 $N_R = \sum N_{R_j}$ 를 만족한다. 기지국으로부터 j 번째 사용자로 송신되는 신호를 N_{R_j} 차원 벡터 \mathbf{d}_j 라고 하고, $N_T \times N_{R_j}$ 프리코딩 행렬을 \mathbf{M}_j 라 하면, j 번째 사용자의 수신신호 \mathbf{x}_j 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_j = \mathbf{H}_j \mathbf{M}_j \mathbf{d}_j + \sum_{k=1, k \neq j}^K \mathbf{H}_j \mathbf{M}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{n}_j. \quad (1)$$

수식 (1)에서 \mathbf{n}_j 는 수신단의 $N_{R_j} \times 1$ 백색 가우시안 잡음이며, 분산은 $E[\mathbf{n}_j \mathbf{n}_j^H] = \sigma_n^2 \mathbf{I}$ 이다. 사용자 j 의 채널행렬 $\mathbf{H}_j = g_j \mathbf{F}_j$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 랜덤 분포를 따르는 $N_{R_j} \times N_T$ 크기의 순시 채널 이득 \mathbf{F}_j 와 대규도 페이딩의 크기 g_j 의 곱으로 표현할 수 있다.

블록 대각화 프리코딩 기법은 동일 채널 사용자 간의 간섭을 효과적으로 제거하기 위한 기법이다. 블록 대각화 프리코딩 기법에서 각 사용자의 채널 행렬 \mathbf{H}_j 에 대한 프리코딩 행렬 \mathbf{M}_j 는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\mathbf{H}_i \mathbf{M}_j = 0 \text{ for all } i \neq j \text{ and } 1 < i, j < K. \quad (2)$$

이러한 프리코딩 행렬 \mathbf{M}_j 를 만드는 방법은 다음과 같다. 먼저, 채널 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{\mathbf{H}}_j = [\mathbf{H}_1^T \cdots \mathbf{H}_{j-1}^T \mathbf{H}_{j+1}^T \cdots \mathbf{H}_K^T]^T. \quad (3)$$

프리코딩 행렬 \mathbf{M}_j 가 다른 사용자의 채널 행렬과 간섭이 없기 위해서, \mathbf{M}_j 는 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 의 영 공간에 놓여있어야 한다. $\tilde{L}_j \leq N_R - N_{R_j}$ 를 만족하는 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 의 랭크를 \tilde{L}_j 라고 하고, $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 를 특이값 분해하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{H}}_j = \tilde{\mathbf{U}}_j \tilde{\Sigma}_j (\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)} \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)})^H. \quad (4)$$

수식 (4)에서 $(\cdot)^H$ 는 헤르미트 행렬을 나타내고, $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)}$ 과 $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ 는 각각 행렬의 오른쪽 고유벡터의 첫 \tilde{L}_j 열과 마지막 $(N_T - \tilde{L}_j)$ 열을 의미한다. 따라서 $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ 는 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 의 영 공간의 직교 기저 벡터가 되고, 사용자간 간섭을 제거하는 역할을 한다. 또한, 전송률의 최대화를 위하여 다음과 같

이 $\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ 의 특이값 분해를 계산한다.

$$\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} = \mathbf{U}_j \begin{bmatrix} \Sigma_j & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [\mathbf{V}_j^{(1)} \quad \mathbf{V}_j^{(0)}]^H. \quad (5)$$

수식 (5)에서 $\mathbf{V}_j^{(1)}$ 는 $\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ 에 의해 생성된 N_{R_j} 차원의 기저 벡터이다. 따라서 $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ 과 $\mathbf{V}_j^{(1)}$ 의 곱으로 $N_T \times N_{R_j}$ 차원의 직교 기저 벡터를 생성할 수 있다. 위 과정을 통해 다음과 같이 프리코딩 행렬을 만들 수 있다.

$$\mathbf{M}_s = [\tilde{\mathbf{V}}_1^{(0)} \mathbf{V}_1^{(1)} \quad \tilde{\mathbf{V}}_2^{(0)} \mathbf{V}_2^{(1)} \quad \dots \quad \tilde{\mathbf{V}}_K^{(0)} \mathbf{V}_K^{(1)}] \mathbf{A}^{1/2}. \quad (6)$$

수식 (6)에서 \mathbf{A} 는 프리코딩 행렬 \mathbf{M}_s 의 각 열을 스케일링 해주는 원소들을 갖는 대각행렬이다. \mathbf{A} 는 전체 송신 전력을 P_T 라고 가정했을 때, Σ 와 P_T 에 대한 water-filling 기법을 통해 찾을 수 있으며 Σ 는 다음과 같이 수식 (5)의 Σ_j 로 이루어진다.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Sigma_K \end{bmatrix} \quad (7)$$

수식 (7)을 이용한 water-filling 기법은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{\mathbf{A},t} = \left(\xi - \frac{\sigma_n^2}{\lambda_{\Sigma,t}} \right)^+ \quad (8)$$

수식 (8)에서 $\lambda_{\mathbf{A},t}$ 와 $\lambda_{\Sigma,t}$ 는 각각 \mathbf{A} 와 Σ 의 t 번째 원소이고, ξ 는 전체 송신 전력 조건에서의 최대 성능을 위한 전력 조건으로 water-filling의 반복 과정에서 계속 변화하게 된다. 또한, $(\cdot)^+$ 는 양수일 경우에는 그대로 값이 나오지만, 음수일 경우 0이 된다. 전체 송신 전력이 P_T 인 조건에서 다음의 조건을 만족할 때까지 모든 스트림에 대하여 수식 (8)을 반복적으로 계산하여 송신 전력을 최적화한다.

$$P_T > \frac{N_T \sigma_n^2}{|\lambda_{\min}|} - \sum_{t=1}^{N_T} \frac{\sigma_n^2}{\lambda_{\Sigma,t}} \quad (9)$$

수식 (9)에서 λ_{\min} 은 Σ 의 모든 대각 원소 중 가장 작은 값이다.

블록 대각화 프리코딩 기법은 $N_R \leq N_T$ 인 경우에만 적용이 가능하다. 일반적으로 수신 안테나의 수가 송신 안테나의 수보다 많기 때문에 수신단에서는 빔포밍 행렬을 사용하여 블록 대각화 프리코딩 기법을 적용할 수 있도록 한다. 송신 데이터 스트림의 총합이 $\sum b_j = N_T$ 를 만족하는 범위에서 j 번째 사용자에게 b_j 개의 데이터 스트림을 할당한 경우, 실효 채널 행렬 \mathbf{H}'_j 는 다음의 방법을 통해 구할 수 있다.

$$\mathbf{H}_j = \mathbf{U}_j \Sigma_j \mathbf{V}_j^H \quad (10)$$

수식 (10)에서 \mathbf{H}_j 의 좌측 특이 벡터 \mathbf{U}_j 의 처음 b_j 개의 열을 선택하여 빔포밍 행렬 \mathbf{W}_j 를 구한다. \mathbf{W}_j 를 이용하여 다음과 같이 j 번째 사용자의 실효 채널 행렬 \mathbf{H}'_j

를 구한다.

표 1. 사용자의 데이터 스트림 할당에 따른 빔포밍 행렬, 실효 채널 행렬, 프리코딩 행렬 및 데이터 벡터의 크기

j	b_j	\mathbf{W}_j	\mathbf{H}'_j	\mathbf{M}'_j	\mathbf{d}_j
1	b_1	$N_{R_1} \times b_1$	$b_1 \times N_T$	$N_T \times b_1$	$b_1 \times 1$
2	b_2	$N_{R_2} \times b_2$	$b_2 \times N_T$	$N_T \times b_2$	$b_2 \times 1$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
K	b_K	$N_{R_K} \times b_K$	$b_K \times N_T$	$N_T \times b_K$	$b_K \times 1$

$$\mathbf{H}'_j = \mathbf{W}_j^H \mathbf{H}_j \quad (11)$$

수식 (11)에서 구한 \mathbf{H}'_j 를 기존의 \mathbf{H}_j 대신 이용하여 블록 대각화 기법을 적용할 수 있다. 새로운 $b_j \times N_T$ 차원의 실효 채널 행렬 \mathbf{H}'_j 를 위한 $N_T \times b_j$ 차원의 영 공간 벡터 $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ 는 다음의 특이값 분해를 통해 구할 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{H}}_j = \tilde{\mathbf{U}}_j \tilde{\Sigma}_j [\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)} \quad \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}]^H \quad (12)$$

수식 (12)에서 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 는 j 번째 사용자를 제외한 나머지 사용자의 채널 행렬들로 이루어진 $(N_T - b_j) \times N_T$ 차원의 행렬이다. 사용자 j 의 새로운 유효 채널 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 와 수식 (12)에서 계산된 영 공간 벡터 $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ 의 곱을 다른 사용자와의 간섭이 제거된 새로운 채널 행렬로 가정하면, 다음의 특이값 분해를 통해 각 사용자의 채널 이득을 최대화할 수 있다.

$$\mathbf{H}'_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} = \mathbf{U}'_j \Sigma'_j [\mathbf{V}_j^{(1)} \quad \mathbf{V}_j^{(0)}]^H \quad (13)$$

이 과정을 통해 $N_T \times b_j$ 차원의 프리코딩 행렬 \mathbf{M}'_j 는 수식 (12)에서 계산된 영 공간 벡터 $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ 과 수식 (13)에서 계산된 $b_j \times b_j$ 차원의 기저 행렬 $\mathbf{V}_j^{(1)}$ 의 곱으로 결정된다. 할당된 데이터 스트림의 수 b_j 에 의한 채널 행렬 및 프리코딩 행렬들의 크기 변화는 다음의 표 1과 같으며, 이를 통해서 수신 안테나의 수가 송신 안테나의 수보다 많은 경우에도 블록 대각화 프리코딩 기법을 수행할 수 있다.

III. 균등 할당 블록 대각화 프리코딩

기존의 블록 대각화 프리코딩 기법은 각 사용자 채널의 크기와 상관없이 모든 사용자에게 대해 동일한 수의 데이터 스트림을 할당하므로 송신 전력의 제어만으로 전체 채널 용량을 최대화해야 했다. 균등 할당 방식에서 각 사용자의 데이터 스트림의 수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$b_j = \frac{N_T}{K} \quad (14)$$

수식 (14)와 같이 모든 사용자는 송신가능한 데이터 스트림의 수를 동일하게 나눠가지게 되며, 수식 (11~13)의 계산 과정에서도 $b_j = N_T/K$ 가 되어 모든 사용자의 실효 채널 행렬의 크기가 동일하게 된다. 따라서 데이터 스트림의 수의 차이에 의한 채널 용량의 이득을 전혀 얻을

수가 없으며, water-filling에 의한 송신 전력의 분배만으로 전체 채널 용량을 최대화한다.

IV. 제안하는 데이터 스트림 할당 기법

본 논문에서는 전체 채널 용량의 최대화를 위해 채널의 크기에 따라 데이터 스트림의 수를 할당하는 기법을 제안한다. 채널 용량은 채널의 크기, 데이터 스트림의 수, 송신 전력에 크게 영향을 받는다. 특히, 다중 사용자 환경에서는 채널의 크기에 따라 데이터 스트림 당 채널 용량의 이득이 매우 다르며, 실제 채널 환경에서 모든 사용자의 채널 이득이 비슷할 확률은 매우 낮으므로 사용자의 수가 증가 할수록 그 차이는 더욱 커지게 된다. 이러한 상황에서 각 사용자의 데이터 스트림을 동일하게 사용하는 기법의 문제점을 보완하고, 전체 채널 용량을 최대화하기 위하여, 제안된 기법은 각 사용자의 채널 이득에 따라 각 사용자의 데이터 스트림의 수 b_j 를 분배한다.

선택된 데이터 스트림의 수에 의해서 채널의 차원이 바뀌는 것의 빠른 이해를 위해서 임의의 채널 행렬을 예로 들었다. 3명의 사용자가 각각 4개씩의 수신 안테나를 가지고, 기지국은 6개의 송신 안테나를 가지고 있는 환경에서 각 사용자에 대한 송신 데이터 스트림의 수를 각각 1, 2, 3개라고 가정하면, 각 사용자의 채널 행렬은 다음과 같이 나타난다.

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} h_{11}^{(1)} & h_{12}^{(1)} & \dots & h_{14}^{(1)} \\ h_{21}^{(1)} & h_{22}^{(1)} & \dots & h_{24}^{(1)} \\ h_{31}^{(1)} & h_{32}^{(1)} & \dots & h_{34}^{(1)} \\ h_{41}^{(1)} & h_{42}^{(1)} & \dots & h_{44}^{(1)} \end{bmatrix}, \dots, \mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} h_{11}^{(3)} & h_{12}^{(3)} & \dots & h_{14}^{(3)} \\ h_{21}^{(3)} & h_{22}^{(3)} & \dots & h_{24}^{(3)} \\ h_{31}^{(3)} & h_{32}^{(3)} & \dots & h_{34}^{(3)} \\ h_{41}^{(3)} & h_{42}^{(3)} & \dots & h_{44}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 $h_{rt}^{(j)}$ 는 j 번째 사용자의 r 번째 수신 안테나에 수신되는 t 번째 송신 안테나의 채널 이득을 나타낸다. 수식 (15)과 같은 채널 행렬을 갖는 각 사용자의 특이값 분해를 계산하여 다음과 같이 각 사용자의 채널 행렬의 좌측 특이 벡터를 구한다.

$$\mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} u_{11}^{(1)} & u_{12}^{(1)} & u_{13}^{(1)} & u_{14}^{(1)} \\ u_{21}^{(1)} & u_{22}^{(1)} & u_{23}^{(1)} & u_{24}^{(1)} \\ u_{31}^{(1)} & u_{32}^{(1)} & u_{33}^{(1)} & u_{34}^{(1)} \\ u_{41}^{(1)} & u_{42}^{(1)} & u_{43}^{(1)} & u_{44}^{(1)} \end{bmatrix}, \dots, \mathbf{U}_3 = \begin{bmatrix} u_{11}^{(3)} & u_{12}^{(3)} & u_{13}^{(3)} & u_{14}^{(3)} \\ u_{21}^{(3)} & u_{22}^{(3)} & u_{23}^{(3)} & u_{24}^{(3)} \\ u_{31}^{(3)} & u_{32}^{(3)} & u_{33}^{(3)} & u_{34}^{(3)} \\ u_{41}^{(3)} & u_{42}^{(3)} & u_{43}^{(3)} & u_{44}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

수식 (16)에서 구한 좌측 특이 벡터에서 각 사용자에게 할당한 데이터 스트림의 수만큼의 열을 선택하여 다음과 같이 빔포밍 행렬을 구한다.

$$\mathbf{W}_1 = \begin{bmatrix} u_{11}^{(1)} \\ u_{21}^{(1)} \\ u_{31}^{(1)} \\ u_{41}^{(1)} \end{bmatrix}, \mathbf{W}_2 = \begin{bmatrix} u_{11}^{(2)} & u_{12}^{(2)} \\ u_{21}^{(2)} & u_{22}^{(2)} \\ u_{31}^{(2)} & u_{32}^{(2)} \\ u_{41}^{(2)} & u_{42}^{(2)} \end{bmatrix}, \mathbf{W}_3 = \begin{bmatrix} u_{11}^{(3)} & u_{12}^{(3)} & u_{13}^{(3)} \\ u_{21}^{(3)} & u_{22}^{(3)} & u_{23}^{(3)} \\ u_{31}^{(3)} & u_{32}^{(3)} & u_{33}^{(3)} \\ u_{41}^{(3)} & u_{42}^{(3)} & u_{43}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

수식 (17)에서 계산된 빔포밍 행렬의 복소 전치 행렬을 각 사용자의 채널 행렬에 곱해서 다음과 같은 각 사용자의 실효 채널 행렬을 생성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}'_1 &= \mathbf{W}_1^H \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} h'_{11}^{(1)} & h'_{12}^{(1)} & \dots & h'_{16}^{(1)} \\ h'_{21}^{(1)} & h'_{22}^{(1)} & \dots & h'_{26}^{(1)} \\ h'_{31}^{(1)} & h'_{32}^{(1)} & \dots & h'_{36}^{(1)} \\ h'_{41}^{(1)} & h'_{42}^{(1)} & \dots & h'_{46}^{(1)} \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}'_2 &= \mathbf{W}_2^H \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} h'_{11}^{(2)} & h'_{12}^{(2)} & \dots & h'_{16}^{(2)} \\ h'_{21}^{(2)} & h'_{22}^{(2)} & \dots & h'_{26}^{(2)} \\ h'_{31}^{(2)} & h'_{32}^{(2)} & \dots & h'_{36}^{(2)} \\ h'_{41}^{(2)} & h'_{42}^{(2)} & \dots & h'_{46}^{(2)} \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}'_3 &= \mathbf{W}_3^H \mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} h'_{11}^{(3)} & h'_{12}^{(3)} & \dots & h'_{16}^{(3)} \\ h'_{21}^{(3)} & h'_{22}^{(3)} & \dots & h'_{26}^{(3)} \\ h'_{31}^{(3)} & h'_{32}^{(3)} & \dots & h'_{36}^{(3)} \\ h'_{41}^{(3)} & h'_{42}^{(3)} & \dots & h'_{46}^{(3)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

수식 (18)에서는 새로운 실효 채널 행렬의 수신 데이터 스트림의 수의 합이 송신 데이터 스트림의 수와 같은 것을 확인할 수 있다. 따라서 여기에 기존의 블록 대각화 프리코딩 기법을 적용하여 사용자 간의 간섭을 효과적으로 제거할 수 있다.

1. 평균 채널 이득을 이용한 스트림 할당 기법

1.1. 대규모 페이딩 이득을 이용한 스트림 할당

본 절에서는 모든 사용자의 채널 용량을 균등하게 보장하는 다중 사용자 MIMO 환경에서 각 사용자의 평균 채널 이득에 따라 데이터 스트림의 수를 불균등하게 할당하여 성능을 최적화하는 방법을 제안한다. 모든 사용자의 데이터 스트림을 동일하게 두고 송신 전력만을 제어하는 기존의 기법과는 달리 제안된 기법은 각 사용자의 데이터 스트림의 수를 또 하나의 채널 적응 변수로 이용한다. 제안된 기법은 각 사용자의 상대적인 평균 채널 이득의 크기에 따라 데이터 스트림을 할당하여, 다중 사용자 MIMO 시스템에서 그 성능을 크게 개선할 수 있다.

각 사용자의 대규모 페이딩 이득 g_j 에 따른 j 번째 사용자의 채널 용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C_j &= E \left[\log_2 \left| \mathbf{I} + \frac{g_j}{\sigma_n^2} \mathbf{F}_j \mathbf{M}_j \mathbf{M}_j^H \mathbf{F}_j^H \right| \right] \\ &\approx b_j \log_2 \left(\frac{g_j}{\sigma_n^2} \right) + E \left[\log_2 \left| \mathbf{I} + \mathbf{F}_j \mathbf{M}_j \mathbf{M}_j^H \mathbf{F}_j^H \right| \right] \end{aligned} \quad (19)$$

수식 (19)의 우변 두 번째 항을 평균적으로 모든 사용자에 대해 비슷한 크기가 된다고 가정하면 채널 용량은 g_j 와 b_j 에 가장 크게 영향을 받게 된다. 특히, 채널 용량은 g_j 의 증가에 대해 로그 단위로 증가하지만, b_j 에 비례하여 선형적으로 증가하므로 채널 용량은 b_j 에 가장 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 전체 채널 용량을 최대화하는 b_j 의 조합은 다음의 최적화 수식을 통해서 찾을 수 있다.

$$\begin{aligned} \{b_1, \dots, b_K\}_{opt} \\ = \operatorname{argmax} \left(\sum_{j=1}^K E \left[\log_2 \left| \mathbf{I} + \frac{g_j}{\sigma_n^2} \mathbf{F}_j \mathbf{M}_j \mathbf{M}_j^H \mathbf{F}_j^H \right| \right] \right) \end{aligned} \quad (20)$$

수식 (19)에서처럼 각 사용자의 채널 용량은 사용자의 데이터 스트림의 수에 비례하여 증가한다. 따라서 수식 (20)에서 g_j/σ_n^2 이 큰 사용자에게 많은 수의 데이터 스트림을 할당하면 채널 이득이 큰 사용자의 채널 용량이 데이터 스트림의 수에 비례하여 증가하고, 채널 이득이 작은 사용자의 경우 채널 용량의 감소량이 작으므로 전체 채널 용량을 더욱 증가시

킬 수 있다. 따라서 제안하는 데이터 스트림 할당 기법은 대규모 페이딩 이득 g_j 의 크기가 가장 큰 사용자에게 최대의 데이터 스트림을 분배하고, 나머지 사용자 중에서 g_j 가 가장 큰 사용자에게 역시 가능한 최대의 데이터 스트림을 분배하는 방식으로 전체 채널 용량을 최대화한다. 이와 같은 방법으로 모든 사용자의 데이터 스트림을 전체 송신 데이터 스트림 수 내에서 분배할 수 있으며, 분배된 데이터 스트림의 수를 바탕으로 블록 대각화 프리코딩 기법을 적용하여 전체 채널 용량을 최대화 한다. 그 과정을 그림 1에서 의사 코드로 보인다.

```

Generate large scale fading  $g_j$ 
For  $m=1, \dots, (\# \text{ of } b_j \text{ combinations})$ 
{
  loop_cnt=0.
  While loop_cnt < # of trials for average capacity
  {
    loop_cnt=loop_cnt+1.
    For  $j=1, \dots, K$ 
    {
      Generate  $N_{R_s} \times N_{R_t}$  matrix  $\mathbf{F}_j$ 
      Compute the channel matrix  $\mathbf{H}_j = g_j^{1/2} \mathbf{F}_j$ 
      Compute SVD of  $\mathbf{H}_j = \mathbf{U}_j \mathbf{\Sigma}_j \mathbf{V}_j^H$ 
      Let  $\mathbf{W}_j$  be the first  $b_j$  column of  $\mathbf{U}_j$ .
      Calculate  $\mathbf{H}'_j = \mathbf{W}_j^H \mathbf{H}_j$ .
    }
    For  $j=1, \dots, K$ 
    {
      Compute  $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ , null space of  $\tilde{\mathbf{H}}_j$ .
      Compute SVD of
      
$$\mathbf{H}'_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} = \mathbf{U}'_j \begin{bmatrix} \Sigma'_j & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)} \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}]^H.$$

    }
    Compute
    
$$\Sigma'_S = \begin{bmatrix} \Sigma'_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma'_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \Sigma'_K \end{bmatrix}$$

    Calculate power loading matrix  $\Lambda$  by water-filling of  $\Sigma'_S$ .
    Compute  $\mathbf{M}'_j = [\tilde{\mathbf{V}}_1^{(0)} \mathbf{V}_1^{(1)} \tilde{\mathbf{V}}_2^{(0)} \mathbf{V}_2^{(1)} \dots \tilde{\mathbf{V}}_K^{(0)} \mathbf{V}_K^{(1)}] \Lambda^{1/2}$ .
  }
  Compute  $C_m = E \left[ \sum_{k=1}^K \log_2 \left| \mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_n^2} \mathbf{H}'_k \mathbf{M}'_k \mathbf{M}'_k^H \mathbf{H}'_k \right| \right]$ .
  if ( $C_m > C_{\max}$ )
  {
     $C_{\max} = C_m$ .
    For  $j=1, \dots, K$ 
    {
       $b_{j, \text{opt}} = b_{j, m}$ ,  $\mathbf{M}'_{j, \text{opt}} = \mathbf{M}'_{j, m}$ 
    }
  }
}

```

그림 1. 대규모 페이딩 이득에 따른 스트림 할당 의사코드

데이터 스트림의 수를 분배하기 위하여 이용 가능한 평균 채널 이득은 대규모 페이딩 이득뿐만이 아니다. 각 사용자 채널의 상관도를 나타내는 공분산 값 역시 느리게 변하는 채널 이득을 반영하는 요소이다. 따라서 각 사용자의 공분산 행렬을 측정하여 이를 데이터 스트림의 수를 분배하는데 사용할 수 있다. 사용자 j 의 채널의 공분산 행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{R}_j = E[\mathbf{H}_j \mathbf{H}_j^H] \quad (21)$$

또한, 수식 (21)의 공분산 행렬을 갖는 채널은 다음과 같이 만들 수 있다.

$$\mathbf{H}_j = \mathbf{R}_j^{1/2} \mathbf{F}_j \quad (22)$$

수식 (22)에서 \mathbf{F}_j 는 $N_{R_s} \times N_{R_t}$ 의 크기이며 각각의 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 i.i.d. 복소 가우시안 랜덤 분포를 따른다. 본 논문에서는 실험을 위하여 공분산 값이 r_j 인 공분산 행렬 \mathbf{R}_j 를 다음과 같이 생성하였다.

$$\mathbf{R}_j = \begin{bmatrix} 1 & r_j & r_j^2 & \dots & r_j^{N_{R_s}} \\ r_j & 1 & r_j & \ddots & \vdots \\ r_j^2 & r_j & 1 & \ddots & r_j^2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & r_j \\ r_j^{N_{R_s}} & \dots & r_j^2 & r_j & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

수식 (23)에서 보이듯이, 공분산 값 r_j 에 의하여 채널 행렬의 평균 상관 특성이 정해지게 된다. 즉, r_j 가 작을수록 채널 행렬의 간섭 성분이 작아지게 되므로 채널 이득이 더욱 증가하게 된다. 따라서 공분산 값에 따른 데이터 스트림의 분배는 대규모 페이딩 이득에 따른 분배와 마찬가지로 채널이 좋은 사용자, 즉, 공분산 값이 작은 사용자에게 최대한의 데이터 스트림을 할당하는 것이 최적의 성능을 얻을 수 있다. 하지만, 공분산 행렬의 경우 채널 이득에 큰 영향을 미치는 것이 아니라 각 안테나 사이의 간섭의 크기에 영향을 미치는 것이므로 공분산 값만을 이용하여 데이터 스트림을 할당할 경우, 성능의 향상은 극히 미미하다. 따라서 본 절에서는 느리게 변하는 대규모 페이딩 이득과 공분산 값을 모두 이용하여 여기에서의 이득에 따라 데이터 스트림을 할당하는 방법을 제안하고, 그림 2의 맹목적 탐색 기법을 통해 대규모 페이딩과 공분산 값을 이용한 최적의 분배 조합을 찾았다.

```

Generate  $N_{R_s} \times N_{R_t}$  covariance matrix  $\mathbf{R}_j$ .
Generate large scale fading  $g_j$ 
For  $m=1, \dots, (\# \text{ of possible } b_j \text{ combinations})$ 
{
  loop_cnt=0.
  While loop_cnt < # of trials for average capacity
  {
    loop_cnt=loop_cnt+1.

```

1.2. 공분산 행렬을 이용한 스트림 할당

```

For  $j=1,\dots,K$ 
{
  Generate  $N_{R_i} \times N_T$  matrix  $\mathbf{F}_j$ 
  Compute the channel matrix  $\mathbf{H}_j = g_j^{1/2} \mathbf{R}_j^{1/2} \mathbf{F}_j$ 
  Compute SVD of  $\mathbf{H}_j = \mathbf{U}_j \boldsymbol{\Sigma}_j \mathbf{V}_j^H$ 
  Let  $\mathbf{W}_j$  be the first  $b_j$  column of  $\mathbf{U}_j$ .
  Calculate  $\mathbf{H}'_j = \mathbf{W}_j^H \mathbf{H}_j$ .
}
For  $j=1,\dots,K$ 
{
  Compute  $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ , null space of  $\tilde{\mathbf{H}}_j$ .
  Compute SVD of
  
$$\mathbf{H}'_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} = \mathbf{U}'_j \begin{bmatrix} \Sigma'_j & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)} \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}]^H.$$

}
Compute

$$\Sigma'_S = \begin{bmatrix} \Sigma'_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma'_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \Sigma'_K \end{bmatrix}$$

Calculate power loading matrix  $A$  by water-filling of  $\Sigma'_S$ .
Compute  $\mathbf{M}'_j = [\tilde{\mathbf{V}}_1^{(0)} \mathbf{V}'_1(1) \tilde{\mathbf{V}}_2^{(0)} \mathbf{V}'_2(1) \dots \tilde{\mathbf{V}}_K^{(0)} \mathbf{V}'_K(1)] A^{1/2}$ .
}
Compute  $C_m = E \left[ \sum_{k=1}^K \log_2 \left| \mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_n^2} \mathbf{H}'_j \mathbf{M}'_j \mathbf{M}'_j{}^H \mathbf{H}'_j{}^H \right| \right]$ .
if ( $C_m > C_{\max}$ )
{
   $C_{\max} = C_m$ .
  For  $j=1,\dots,K$ 
  {
     $b_{j,opt} = b_{j,m}$ ,  $\mathbf{M}'_{j,opt} = \mathbf{M}'_{j,m}$ 
  }
}
}

```

그림 2. 공분산 행렬에 따른 스트림 할당 의사코드

2. 순시 채널 이득을 이용한 스트림 할당 기법

느리게 변하는 평균 채널 이득뿐 만 아니라, 순시적으로 변화하는 소규모 페이딩 이득 역시 채널 용량에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 논문에서는 각 사용자의 소규모 페이딩 이득을 함께 고려하여 데이터 스트림을 할당하는 방법을 제안한다. 평균 채널 이득을 기준으로 한 데이터 스트림 수의 최적화에 더불어 소규모 페이딩 이득까지 함께 고려하면 얻을 수 있는 채널 용량 이득은 더욱 커지게 된다. 하지만, 느리게 변하는 평균 채널 이득과는 달리 매 순간 변화하는 채널 상태에 따라서 데이터 스트림의 수를 분배하고, 이를 각 사용자가 미리 알고 있어야 한다는 단점이 존재하므로 실제로 구현하기는 불가능에 가깝다. 또한, 전체 채널의 이득에 가장 큰 영향을 미치는 것은 대규모 페이딩이기 때문에 소규모 페이딩까지 포함한 순시적 채널 이득을 이용한 데이터 스트림 할당 역시 전체적인 경향은 대규모 페이딩에 따른 데이터 스트림 할당과 비슷하게 채널 이득이 큰 사용

자에게 많은 수의 데이터 스트림을 할당한다. 하지만, 대규모 페이딩 이득이 가장 큰 사용자에게 최대한의 데이터 스트림을 모두 할당하는 것과는 달리, 소규모 페이딩 이득에 따른 데이터 스트림 분배는 대규모 페이딩과 소규모 페이딩의 이득의 정도에 따라서 분배가 되므로 한쪽으로 모든 데이터 스트림이 할당되는 경우는 드물다. 이를 확인하기 위해 본 논문에서는 모든 가능한 b_j 조합에 대한 맹목적 탐색 기법을 통해서 소규모 페이딩 이득에 대한 최적의 데이터 스트림 할당을 했을 경우의 채널 용량을 비교하였으며, 그림 3에서 의사 코드를 통해 그 과정을 보였다. 하지만, 맹목적 탐색 기법을 사용할 경우 계산량이 매우 커지게 되므로, 본 논문에서는 순시적 채널 이득을 따르는 데이터 스트림 할당 기법 역시 대규모 페이딩의 크기에 대한 데이터 스트림 분배의 경우와 비슷하다는 점을 이용하여, 대규모 페이딩의 크기를 비교해서 가능성이 있는 b_j 조합에 대해서만 맹목적 탐색 기법을 수행하여 계산량을 크게 감소시키도록 하였다.

```

For  $m=1,\dots,(\# \text{ of possible } b_j \text{ combinations})$ 
{
  For  $j=1,\dots,K$ 
  {
    Generate  $N_{R_i} \times N_T$  matrix  $\mathbf{F}_j$ .
    Generate large scale fading  $g_j$ 
    Compute the channel matrix  $\mathbf{H}_j = g_j^{1/2} \mathbf{F}_j$ 
    Compute SVD of  $\mathbf{H}_j = \mathbf{U}_j \boldsymbol{\Sigma}_j \mathbf{V}_j^H$ .
    Let  $\mathbf{W}_j$  be the first  $b_j$  column of  $\mathbf{U}_j$ .
    Calculate  $\mathbf{H}'_j = \mathbf{W}_j^H \mathbf{H}_j$ .
  }
  For  $j=1,\dots,K$ 
  {
    Compute  $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ , null space of  $\tilde{\mathbf{H}}_j$ .
    Compute SVD of
    
$$\mathbf{H}'_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} = \mathbf{U}'_j \begin{bmatrix} \Sigma'_j & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)} \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}]^H.$$

  }
  Compute
  
$$\Sigma'_S = \begin{bmatrix} \Sigma'_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma'_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \Sigma'_K \end{bmatrix}$$

  Calculate power loading matrix  $A$  by water-filling of  $\Sigma'_S$ .
  Compute  $\mathbf{M}'_j = [\tilde{\mathbf{V}}_1^{(0)} \mathbf{V}'_1(1) \tilde{\mathbf{V}}_2^{(0)} \mathbf{V}'_2(1) \dots \tilde{\mathbf{V}}_K^{(0)} \mathbf{V}'_K(1)] A^{1/2}$ .
  Compute  $C_m = \sum_{k=1}^K \log_2 \left| \mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_n^2} \mathbf{H}'_j \mathbf{M}'_j \mathbf{M}'_j{}^H \mathbf{H}'_j{}^H \right|$ .
  if ( $C_m > C_{\max}$ )
  {
     $C_{\max} = C_m$ .
    For  $j=1,\dots,K$ 
    {
       $b_{j,opt} = b_{j,m}$ ,  $\mathbf{M}'_{j,opt} = \mathbf{M}'_{j,m}$ 
    }
  }
}
}

```

그림 3. 순시 채널 이득에 따른 스트림 할당 의사코드

V. 결 과

이번 절에서는 전체 채널 용량의 최대화를 위한 데이터 스트림 할당 기법과 기존의 기법의 성능을 비교 분석한다. 실험은 4명의 사용자가 각각 5개의 안테나를 가지고, 기지국은 12개의 송신 안테나를 갖는 레일리 페이딩 환경에서 수행되었다.

그림 4는 데이터 스트림을 분배하지 않는 기존의 기법과 대규모 페이딩의 크기에 따라서 데이터 스트림을 분배하는 제안된 기법의 채널 용량을 비교한 그래프이다. 각 사용자의 대규모 페이딩의 크기에 따라서 데이터 스트림을 분배하는 제안된 기법의 채널 용량이 모든 사용자에게 동일한 데이터 스트림을 분배하는 기존의 기법에 비해서 약 2bps/Hz 정도 더 큰 것을 확인할 수 있으며, 데이터 스트림의 불균등 분배를 통하여 더욱 큰 채널 용량의 이득을 얻을 수 있다.

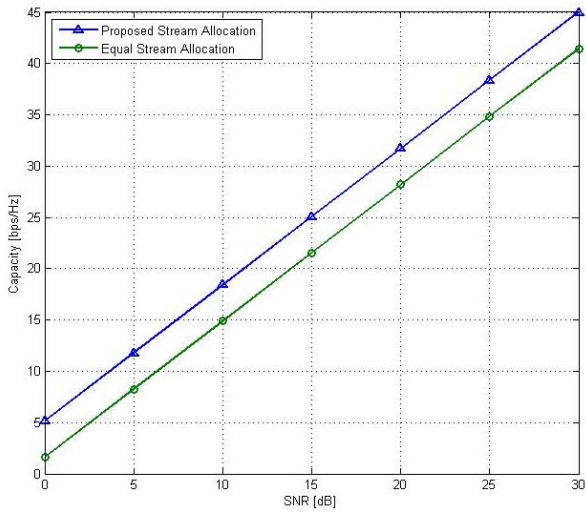


그림 4. 대규모 페이딩 이득에 대한 평균 채널 용량 비교 ($K=4, N_{R_i}=5, N_T=12$)

그림 5는 대규모 페이딩 이득과 공분산 값의 크기에 따라서 데이터 스트림을 할당하는 기법의 채널 용량을 보여 준다. 대규모 페이딩 이득을 무시하고 공분산 값의 크기만 가지고 데이터 스트림을 할당할 경우에는 모든 사용자에게 동일한 수의 데이터 스트림을 할당하는 기존의 기법에 비해 채널 용량의 증가가 0.5bps/Hz 정도로 크지 않다. 또한, 대규모 페이딩 이득만 가지고 데이터 스트림을 할당하는 기법에 비교하면 거의 2bps/Hz 정도 더 작은 채널 용량을 갖는 것을 확인할 수 있다. 그에 비해 대규모 페이딩 이득과 공분산 값의 크기를 모두 고려해서 데이터 스트림을 할당하는 경우에는 대규모 페이딩 이득만을 고려해서 할당하는 경우에 비해 0.5bps/Hz 정도의 채널 용량의 이득을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다. 대규모 페이딩 이득 이외에 채널의 평균 상관도를 알 수 있는 공분산 행렬을 함께 고려하여 데이터 스트림을 할당하는 것이 채널 용량 이득을 더 얻을 수 있지만, 시스템의 복잡도 증

가에 비해 성능 이득은 크지 않으므로 대규모 페이딩 이득만 고려한 데이터 스트림 할당이 여전히 효율적이다.

표 2는 주어진 공분산 값의 크기와 대규모 페이딩 이득에 대한 데이터 스트림 할당 기법의 성능을 비교한 것이다. 공분산 값만 고려한 데이터 스트림 할당 기법은 사용자 내의 안테나 사이의 간섭의 크기에만 영향을 주기 때문에 대규모 페이딩에 대한 데이터 스트림 할당에 비해 성능 증가 폭이 크지 않다. 반면, 공분산 값의 크기와 대규모 페이딩 이득을 모두 고려한 데이터 스트림 할당의 경우, 대규모 페이딩 이득만을 고려한 데이터 스트림 할당 기법에 비해 0.5bps/Hz 정도의 채널 용량 이득을 얻을 수 있지만, 대규모 페이딩만을 고려한 경우에 비해 복잡도가 증가하게 되므로 효율이 떨어진다.

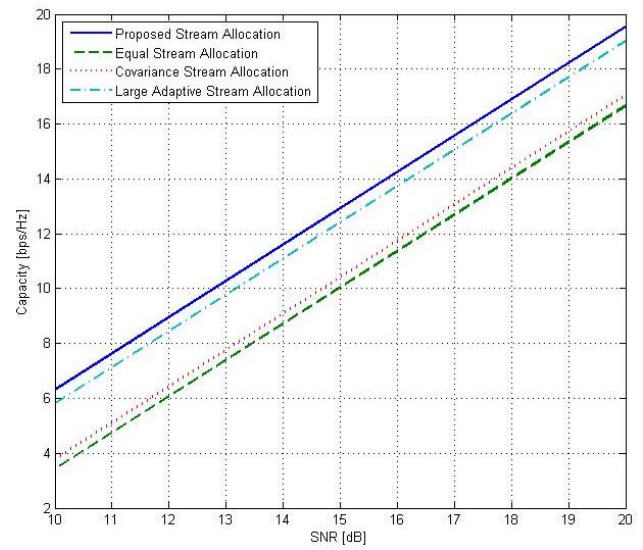


그림 5. 평균 채널 이득에 대한 평균 채널 용량 비교 ($K=4, N_{R_i}=5, N_T=12$)

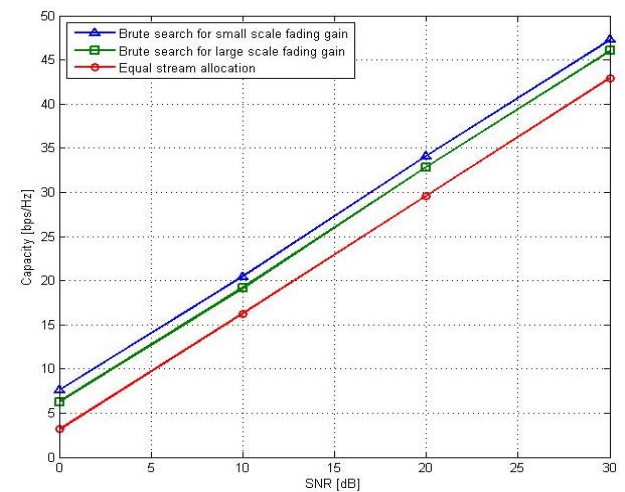


그림 6. 순시적 채널 이득에 대한 평균 채널 용량 비교 ($K=4, N_{R_i}=5, N_T=12$)

그림 6은 대규모 페이딩뿐만 아니라, 소규모 페이딩 이득까지 고려했을 때의 최적의 채널 용량을 맹목적 탐색

표 2. 최적 데이터 스트림 할당과 대규모 페이딩 이득에 따른 데이터 스트림 할당의 채널 용량 비교
($K=4, N_{R_j}=5, N_T=12, SNR=30\text{dB}$)

	j	g_j	r_j	Optimal b_j	Sum capacity			
					Optimal b_j	Large scale-only	Covariance	Equal
1	1	0.0070	0.8931	1	50.5429	50.4992	49.2329	48.2688
	2	0.0000033	0.0607	2				
	3	0.2480	0.1758	5				
	4	0.0851	0.4163	4				
2	1	0.000069	0.0170	3	40.7266	40.3740	40.0505	40.2685
	2	0.000072	0.0398	3				
	3	0.0087	0.8043	5				
	4	0.00017	0.8598	1				
3	1	0.000046	0.3404	1	44.6701	44.5732	40.1555	42.6446
	2	0.000043	0.0639	2				
	3	0.1094	0.7613	5				
	4	0.00017	0.4027	4				
4	1	0.2973	0.2096	5	49.2711	49.0374	42.4604	46.2603
	2	0.00023	0.4804	1				
	3	0.00008	0.1130	2				
	4	0.0000043	0.1324	4				

기법으로 찾은 결과이며, 균등하게 분배한 경우에 비해서 4bps/Hz 정도 더 큰 이득을 얻는 것을 확인할 수 있으며, 대규모 페이딩만을 고려하는 경우에 비해서도 1bps/Hz의 채널 용량 이득을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다. 순시 채널 이득에 대한 데이터 스트림 할당의 경우, 대규모 페이딩 이득만을 고려하는 경우에 비해 더 큰 채널 용량 이득을 얻을 수 있지만, 매 순간마다 데이터 스트림의 수가 변하게 될 경우 송수신단 사이의 동기화 문제가 발생할 수도 있다. 따라서 순시 채널 이득에 대한 데이터 스트림 할당에 비해서 약간의 채널 용량 이득의 손해가 생기더라도 느리게 변하는 대규모 페이딩 이득에 대하여 데이터 스트림을 할당하는 것이 더욱 효율적임을 예상할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 블록 대각화 프리코딩 기법을 사용하는 다중 사용자 MIMO 시스템에서 전체 채널 용량을 최대화하기 위한 데이터 스트림 할당 기법을 제안했다. 제안된 블록 대각화 프리코딩의 데이터 스트림 할당 기법은 시스템의 전체 채널 용량을 최대화하기 위하여 평균 채널 이득, 순시 채널 이득의 크기를 비교하여 채널 이득이 좋은 사용자에게 많은 수의 데이터 스트림을 할당하는 방법으로 채널 이득에 대한 채널 용량을 최대화 시킨다. 본 논문에서 제안된 데이터 스트림 할당 기법을 이용하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 모의실험을 통해 증명했다.

참고 문헌

[1] M. Jankiraman, Space-Time codes and MIMO systems, Artech House, 2004.
 [2] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst and M.

Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 52, No. 2, pp. 461-471, Feb. 2004.
 [3] M. Costa, "Writing on dirty paper," IEEE Trans. Commun., Vol. 29, No. 3, pp. 439-441, May 1983.
 [4] L. U. Choi and R. D. Murch, "A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach," IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 3, No. 1, pp. 20-24, Jan. 2004.
 [5] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit and Power Allocation," IEEE J. Select Areas Commun., Vol. 17, pp. 1747-1758, Oct. 1999.
 [6] G. G. Raleigh and J. M. Cioffi, "Spatio-temporal coding for wireless communication," IEEE Trans. Commun., Vol. 46, pp. 357-366, Mar. 1998.
 [7] 임동호, 최권휴, "다중 사용자 MIMO 환경에서 균등한 성능을 보장하는 데이터 스트림 할당 기법," 한국통신학회논문지, 34(12), pp. 1006-1013, Nov. 2009.

저 자

김 봉 석 (Bong-seok Kim)

학생회원



2005년 2월 : 영남대학교 전자공학과

2009년 2월 : 영남대학교 정보통신공
학과 석사

2009년 3월~현재 : 영남대학교 정보
통신공학과 박사과정

<관심분야> 위성통신, MIMO, OFDM

최 권 휴 (Kwonhue Choi)

정회원



1994년 2월 : 포항공과대학교

전자전기공학과

1996년 2월 : 포항공과대학교

전자전기공학과 석사

2000년 2월 : 포항공과대학교

전자전기공학과 박사

2000년 4월~2003년 2월 : 한국전자통신연구원 광대역 무
선전송 연구부 광대역 무선전송 연구팀 선임연구원

2003년 2월~현재 : 영남대학교 전자정보공학부 정보통신
공학전공 부교수

<관심분야> 위성통신, OFDM 기반 다중반송파 전송방식,
MIMO detection 알고리즘, CDMA 시스템