다중 사용자 MIMO 환경에서 균등한 성능을 보장하는 데이터 스트림 할당 기법

준회원 임 동 호*, 종신회원 최 권 휴*

Data Stream Allocation for Fair Performance in Multiuser MIMO Systems

Dong-ho Lim* *Associate Member*, Kwonhue Choi* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 블록 대각화 기법을 사용하는 다중 사용자 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 하향링크 채널 환경에서 모든 사용자의 성능을 동일하게 보장하기 위하여 데이터 스트림의 수를 할당하는 기법을 제안한다. 기존의 연구들은 전체 채널 용량의 최대화에 중점을 두고 있고, 각 사용자의 채널 환경에 따라서 채널 용량이 불균등하게 분배되어 사용자 간의 차이가 크다. 뿐만 아니라, water-filling 기법을 사용하여 전력을 제어함으로써, 채널 이득이 작은 사용자는 매우 작은 채널 용량만을 가질 수 있었다. 또한, 대부분의 연구에서는 모든 사용자에 대해 동일한 수의 데이터 스트림을 사용함으로써, 스스로 데이터 스트림의 분배에 의한 추가적인 이득을 제한했다. 본 논문에서는 사용자 채널의 크기에 따라 데이터 스트림을 분배하여 모든 사용자에게 균등한 채널 용량을 보장하는 조건에서 이를 최대화하는 기법을 제안하고 모의실험을 통하여 제안된 기법이 기존의 기법에 비해 송신 전력과 채널 용량의 이득이 더 큰 것을 확인한다.

Key Words : Data Stream Allocation, Block Diagonalization, Multiuser MIMO, Fair Performance

ABSTRACT

This paper proposes a data stream allocation technique for fair capacity performance in multiuser multiple-input multiple-output (MIMO) systems using block diagonalization (BD) algorithm. Conventional studies have been focused on maximum sum capacity. Thus, there is a very large difference of capacity among users, since user capacity unfairly distributed according to each user channel environment. In additional, poor channel user has very small capacity, since base station allocates the power by using water-filling technique. Also, almost studies limited itself to obtain the additional gain by using the same number of data streams for all users. In this paper, we propose the technique for maximizing sum capacity under the fair performance constraint by allocating data stream according to user channel environment. Also, proposed algorithm has more gain of sum capacity and transmit power than conventional equal allocation via computer simulation.

Ⅰ. 서 론

최근 무선 통신 시스템 분야에서 채널 용량을 크게 향상 시킬 수 있는 MIMO (multiple-input multiple-output) 기술에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다[1]. 특히, 그 중에서도 하나의 기지국과 다중

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었습니다. (NIPA-2009-C1090-0902-0045)
* 영남대학교 정보통신공학과 광대역 무선통신 연구실 (toxin@ynu.ac.kr, gonew@yu.ac.kr)
논문번호 : #KICS2009-10-471, 접수일자 : 2009년 10월 19일, 최종논문접수일자 : 2009년 12월 10일

안테나를 사용하는 다수의 사용자가 통신을 하는 다중 사용자 MIMO 환경으로 관심이 집중되고 있다[2]. 다중 사용자 MIMO 시스템에서는 다른 사용자 간의 동일 채널 간섭이 존재한다. 이러한 간섭을 송신단에서 제거하기 위한 기법으로 DPC (Dirty Paper Coding) 기법이 제안되었다[3]. 하지만, 송신단에서 각 사용자의 간섭 신호에 대한 비인과적 정보를 미리 알고 있어야 한다는 단점으로 인해, 완벽한 구현이 현실적으로 불가능하다. DPC 이외에도 다양한 프리코딩 기법들이 연구되어 왔는데, 최근 기존의 프리코딩 기법들 보다 간단하면서, 현실적으로 구현 가능한 블록 대각화 기법이 제안되었다[4].

블록 대각화 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[2]. 하지만, 모든 사용자에게 동일한 수의 데이터 스트림을 할당하기 때문에, 송신 전력 제어만으로 사용자가 요구하는 채널 용량을 만족시켜야 하고, 이로 인해서 실제 얻을 수 있는 송신 전력당 채널 용량의 이득이 줄게 된다[5]. 또한, 기존의 기법들은 채널 용량의 최대화를 위하여 water-filling 기법을 사용한다[6]. 하지만, water-filling 기법을 사용할 경우, 채널이 좋은 하나 또는 두 명의 사용자에게 대부분의 송신 전력을 사용하기 때문에, 채널이 나쁜 사용자는 매우 작은 채널 용량만을 갖게 된다. 뿐만 아니라, 모든 사용자의 채널 용량을 동일하게 유지하기 위해서는 채널이 나쁜 사용자에게 매우 큰 송신 전력을 사용해야 하기 때문에 송신전력의 낭비가 크다.

본 논문에서는 블록 대각화 프리코딩 기법을 사용하는 다중 사용자 MIMO 채널 환경에서 모든 사용자의 채널 용량을 균등하게 보장하기 위한 각 사용자의 데이터 스트림을 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 전력조건에서 더욱 큰 채널 용량을 얻을 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 다중 사용자 MIMO 시스템 모델을 설명하고, 3장에서는 기존 블록 대각화 프리코딩 기법에 대해 설명한다. 4장에서는 제안된 데이터 스트림 할당 기법을 소개한다. 5장에서는 제안된 기법의 성능을 검증한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서는 다중 사용자 MIMO 하향링크 채널환경에서 K명의 사용자가 시스템에 존재한다고 가정한다. 그림 1과 같이 기지국은 N_T개의 안테나를 갖고, j번째 사용자는 N_{R_j}개의 안테나를 가지며, 수신 안테나의 총합 N_R은 $N_R = \sum N_{R_j}$를 만족한다. 기지국으로부터 j번째 사용자로 송신되는 신호를 b_j차원 벡터 $\mathbf{d}_j$라고 하고, $N_T \times b_j$ 프리코딩 행렬을 $\mathbf{M}_j$라 하면, j번째 사용자의 수신신호 $\mathbf{x}_j$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기에서 $\mathbf{n}_j$는 수신단의 $N_{R_j} \times 1$ 백색 가우시안 잡음이며, 분산은 $E[\mathbf{n}_j\mathbf{n}_j^H] = \sigma^2\mathbf{I}$이다. $\mathbf{H}_j$는 $N_{R_j} \times N_T$ 채널 행렬로 각각의 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 i.i.d. (Independent, Identically Distributed) 복소 가우시안 랜덤 분포를 갖고 있다.

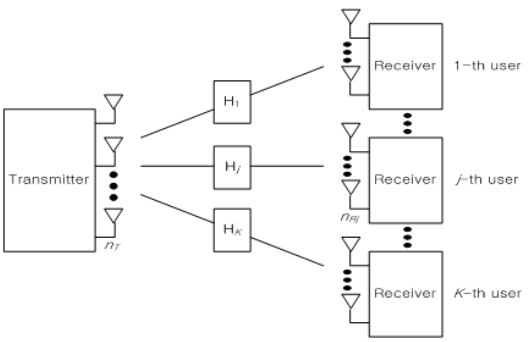

그림 1. 다중 사용자 MIMO 시스템의 구조

Ⅲ. 기존의 블록 대각화 프리코딩 기법

3.1 블록 대각화 프리코딩 기법

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 매트릭스 $\mathbf{M}_j$를 만드는 방법은 다음과 같다. 채널 행렬 $\widetilde{\mathbf{H}}_j$를 다음과 같이 정의한다.

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

프리코딩 행렬 $\mathbf{M}_j$가 다른 사용자의 채널 행렬과 간섭이 없으려면 $\widetilde{\mathbf{H}}_j$의 영 공간에 놓여있어야 한다. $\widetilde{L}_j \leq N_R - N_{R_j}$인 $\widetilde{\mathbf{H}}_j$의 랭크를 $\widetilde{L}_j$라고 하고, $\widetilde{\mathbf{H}}_j$를 SVD하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\widetilde{\mathbf{H}}_j = \widetilde{\mathbf{U}}_j \widetilde{\Sigma}_j [\widetilde{\mathbf{V}}_j^{(1)} \; \widetilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}]^H \quad (4)$$

여기에서 $(\bullet)^H$는 Hermitian 연산을 나타내고, $\widetilde{\mathbf{V}}_j^{(1)}$과 $\widetilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$는 각각 $\widetilde{\mathbf{H}}_j$ 행렬의 오른쪽 고유벡터의 첫 $\widetilde{L}_j$열과 마지막 $(N_T - \widetilde{L}_j)$열을 의미한다. 따라서 $\widetilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$는 $\widetilde{\mathbf{H}}_j$의 영공간의 직교 기저 벡터가 되고, 사용자간 간섭을 제거한다. 또한, 전송률의 최대화를 위하여 다음과 같이 $\mathbf{H}_j\widetilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$의 SVD를 계산한다.

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

For each user j=1,...,K

{ Compute $\widetilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$, the right null space of $\widetilde{\mathbf{H}}_j$.

Compute the SVD

$$\mathbf{H}_j\widetilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} = \mathbf{U}_j \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_j & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [\mathbf{V}_j^{(1)} \; \mathbf{V}_j^{(0)}]^H.$$

}

While ($C_1 \neq C_2 \neq \cdots \neq C_K$)

{ Calculate the $\boldsymbol{\Lambda}_j$ by using water-filling.

Form $\boldsymbol{\Lambda}$ using $\{\boldsymbol{\Lambda}_1, \cdots, \boldsymbol{\Lambda}_K\}$.

Set

$$\mathbf{M}_S = [\widetilde{\mathbf{V}}_1^{(0)}\mathbf{V}_1^{(1)} \; \widetilde{\mathbf{V}}_2^{(0)}\mathbf{V}_2^{(1)} \; \cdots \; \widetilde{\mathbf{V}}_K^{(0)}\mathbf{V}_K^{(1)}]\boldsymbol{\Lambda}^{1/2}.$$

}

그림 2. 블록 대각화 기법의 pseudo code

여기서 $\mathbf{V}_j^{(1)}$는 $\mathbf{H}_j\widetilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$에 의해 생성된 $N_{R_j} \times N_{R_j}$ 크기의 기저 행렬이다. 또한, 식 (5)는 $N_{R_j} = N_T - \widetilde{L}_j$일 경우, $\mathbf{H}_j\widetilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} = \mathbf{U}_j\Sigma_j\mathbf{V}_j^{(1)H}$이 됨을 알 수 있다. 앞에서 얻은 $\widetilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$과 $\mathbf{V}_j^{(1)}$의 곱으로 N_{R_j} 차원의 직교 기저 벡터를 생성할 수 있다. 이 과정을 통해 프리코딩 행렬 $\mathbf{M}_j$는 다음과 같이 결정된다.

$$\mathbf{M}_j = \widetilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}\mathbf{V}_j^{(1)}\boldsymbol{\Lambda}_j^{1/2} \quad (6)$$

여기서 $\boldsymbol{\Lambda}_j$는 프리코딩 행렬 $\mathbf{M}_j$의 각 열을 송신 전력만큼 스케일링 해주는 원소들을 갖는 대각 행렬이다. 사용자 j에게 주어진 송신 전력을 P_j라고 가정하면, $\boldsymbol{\Lambda}_j$의 최적 전력 할당 계수는 $\boldsymbol{\Sigma}_j$에 대해 water-filling 기법을 사용하여 찾을 수 있다.

하지만, 블록 대각화 프리코딩 기법은 송신안테나의 수보다 수신 안테나의 수의 총합이 더 작거나 같아야지만 적용가능한 단점이 있다. 또한, water-filling 기법을 사용하는 블록 대각화 프리코딩 기법은 전체 채널 용량의 최대화는 달성할 수 있지만, 모든 사용자에 대해서 채널 용량을 최대화하지는 않는다. 오히려 채널이 좋은 한 두 명의 사용자의 채널 용량만 매우 커지게 되어서, 채널이 나쁜 사용자는 오히려 채널 용량의 손실을 겪게 된다. 뿐만 아니라, 각각의 사용자에 대해서 water-filling 기법을 사용하면, 주어진 사용자의 송신 전력에 대해서 각 사용자의 채널 용량을 최대화할 수는 있지만, 실제 적용되는 프리코딩 행렬을 살펴보면, 사용하지 않는 데이터 스트림이 발생하게 되고, 이 경우 전송률의 손실까지 불러올 수 있다.

3.2 Coordinated Transmit-Receive Processing

블록 대각화 프리코딩 기법은 $N_T \geq N_R$인 조건에서만 구현이 가능하다. 송신단은 최대 N_T개의 데이터 스트림만을 간섭 없이 보낼 수 있기 때문에 사용자의 수가 증가하거나 수신 안테나의 수가 증가할 경우에는 블록 대각화 프리코딩 기법의 적용이 불가능하다. [2]에서는 빔포밍 기법을 적용하여 사용자의 안테나 수에 상관없이 블록 대각화 프리코딩 기법을 적용할 수 있는 방법과 빔포밍 벡터의 선택을 간단하게 할 수 있는 방법을 제안했다.

기지국으로부터 j번째 사용자에게 수신되는 신호를 b_j개의 신호로 빔포밍하는 행렬 $\mathbf{W}_j$는 다음의 SVD를 통해 결정할 수 있다.

$$\mathbf{H}_j = \mathbf{U}_j \boldsymbol{\Sigma}_j \mathbf{V}_j^H \quad (7)$$

위의 수식 (7)에서 j번째 사용자 채널 행렬의 왼쪽 고유 벡터 $\mathbf{U}_j$의 처음 b_j개열을 선택함으로써 $\mathbf{W}_j$를 결정할 수 있다. 여기서 정의된 $\mathbf{W}_j$를 이용하여 b_j개의 행을 갖는 각 사용자의 새로운 채널 행렬 $\mathbf{H}'_j$를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{H}'_j = \mathbf{W}_j^H \mathbf{H}_j \quad (8)$$

수식 (8)의 채널 행렬로 구성된 새로운 전체 채널 행렬 $\mathbf{H}'_S = [\mathbf{H}'^T_1 \mathbf{H}'^T_2 \cdots \mathbf{H}'^T_K]^T$는 $\sum b_j \le N_T$의 조건을 만족하므로 각 사용자의 채널 행렬 $\mathbf{H}_j$ 대신 $\mathbf{H}'_j$를 대입하면, 일반적인 블록 대각화 프리코딩 기법을 사용자의 안테나 수에 상관없이 적용할 수가 있다. 하지만, 지금까지의 연구들은 각 사용자의 데이터 스트림의 수 b_j를 명확히 정의하지 못했고, 대부분 같은 수의 데이터 스트림을 사용하도록 하기 때문에, 송신 전력의 제어만으로 모든 사용자의 성능을 균등하게 유지해야 한다.

일반적으로 최적화 문제에서 고려 가능한 변수 중 하나를 고정시키고, 나머지 변수들만으로 문제에 대한 접근을 하는 경우에 비해 모든 변수들에 대해서 접근을 할 경우 해당 문제에 대해 더욱 최적화가 가능하다[5]. 하지만, 기존의 기법들은 채널 적응 변수로서 충분히 고려 가능한 데이터 스트림의 수를 모든 사용자에게 동일하게 둠으로써, 스스로 제한된 최적화를 할 수 밖에 없었다. 이 경우, 만약 각 사용자의 채널 이득의 차이가 크다면, 채널이 나쁜 사용자에게 과도한 송신 전력을 사용해야 하기 때문에, 채널이 좋은 사용자의 성능에 막대한 손실을 불러 오거나, 동일한 성능을 보장하기 위한 송신 전력의 소모가 매우 크다.

Ⅳ. 제안된 데이터 스트림 할당 기법

기존의 블록 대각화 프리코딩 기법은 각 사용자 채널의 크기와 상관없이 모든 사용자에 대해 동일한 수의 데이터 스트림을 할당하므로 송신 전력 제어만으로 모든 사용자의 채널 용량을 유지해야 했다. 뿐만 아니라, 각 사용자의 채널 이득에 대해서 water-filling 기법을 사용하여 전력을 제어하게 되므로 각 사용자에게 분배되는 송신 전력의 차이는 더욱 격심해진다. 이 경우, 모든 사용자의 성능을 균등하게 유지하기 위해서는 채널이 나쁜 사용자에게 거의 대부분의 송신 전력을 사용해야 하므로 채널이 좋은 사용자의 채널 용량의 손실을 가져올 뿐만 아니라, 채널이 나쁜 사용자의 채널 용량은 크게 증가하지 않기 때문에 채널 용량 역시 줄어든다.

본 논문에서는 모든 사용자의 채널 용량을 균등하게 보장하는 다중 사용자 MIMO 환경에서, 각 사용자 채널의 크기에 따라 데이터 스트림의 수를 불균등하게 할당하여, 성능을 최적화 하는 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 채널의 크기에 따라 데이터 스트림을 할당하여, 모든 사용자의 송신 전력당 성능을 가능한 비슷하게 유지하고, 이로 인해서 모든 사용자에 대해 송신 전력을 고르게 사용하기 때문에 균등한 성능을 보장하는 다중 사용자 MIMO 시스템에서 그 성능을 크게 개선할 수 있다.

송신 데이터 스트림의 총합이 $\sum b_j = N_T$를 만족하는 범위에서 j번째 사용자에게 b_j의 데이터 스트림을 할당한 경우, 새로운 $b_j \times N_T$ 실효 채널 행렬 $\mathbf{H}'_j$를 위한 $N_T \times b_j$ 영 공간 벡터 $\widetilde{\mathbf{V}}'^{(0)}_j$는 다음의 SVD를 통해 구할 수 있다.

$$\widetilde{\mathbf{H}}'_j = \widetilde{\mathbf{U}}'_j \widetilde{\boldsymbol{\Sigma}}'_j [\widetilde{\mathbf{V}}'^{(1)}_j \ \widetilde{\mathbf{V}}'^{(0)}_j]^H \quad (9)$$

여기서 $\widetilde{\mathbf{H}}'_j$는 j번째 사용자를 제외한 나머지 사용자의 채널 행렬들로 이루어진 $(N_T - b_j) \times N_T$ 행렬이다. 사용자 j의 새로운 채널 행렬 $\mathbf{H}'_j$와 (9)에서 계산된 영 공간 벡터 $\widetilde{\mathbf{V}}'^{(0)}_j$의 곱이 다른 사용자와의 간섭이 제거된 새로운 채널 행렬이 되고 다음의 SVD를 통해 채널 이득을 최대화할 수 있다.

$$\mathbf{H}'_j \widetilde{\mathbf{V}}'^{(0)}_j = \mathbf{U}'_j \boldsymbol{\Sigma}'_j [\mathbf{V}'^{(1)}_j \ \mathbf{V}'^{(0)}_j]^H \quad (10)$$

이 과정을 통해 $N_T \times b_j$ 프리코딩 행렬 $\mathbf{M}'_j$를 (9)에서 계산된 $\widetilde{\mathbf{V}}'^{(0)}_j$과 (10)에서 계산된 $b_j \times b_j$ 기저 행렬 $\mathbf{V}'^{(1)}_j$의 곱으로 결정할 수 있다. 여기서 b_j 선택의 기준이 되는 것이 각 사용자의 채널 이득의

차이와 채널의 평균 SNR이다. 각 사용자의 채널 이득의 차이가 작거나 채널의 평균 SNR이 매우 클 경우 큰 전력 분배 없이도 모든 사용자에 대해 균등한 채널 용량을 보장할 수 있다. 하지만, 실제 무선 통신 채널 환경에서 모든 사용자들의 채널 이득이 비슷할 확률도 낮을 뿐만 아니라, 채널의 평균 SNR 역시 항상 높을 것이라는 보장이 없다. 이러한 상황에서 각 사용자의 데이터 스트림을 동일하게 사용하는 기법의 문제점을 보완하고, 모든 사용자의 채널 용량을 균등하게 보장하면서 동시에 최대화하기 위하여, 제안된 기법은 각 사용자의 채널 이득의 차이에 따라 각 사용자의 데이터 스트림의 수 b_j를 분배한다. 채널 이득이 큰 사용자는 동일한 송신 전력을 사용할 경우, 적은 수의 데이터 스트림 만으로도 큰 채널 용량을 얻을 수 있다. 하지만, 채널 이득이 작은 사용자는 각 데이터 스트림 당 채널 용량의 변화량이 작으므로 채널 이득이 작은 사용자에게 많은 수의 데이터 스트림을 할당함으로써, 각 사용자의 송신 전력 당 채널 용량 이득을 비슷하게 유지한다. 이를 위한 각 사용자의 데이터 스트림의 수는 다음과 같다.

$$\{b_1,\cdots,b_K\}_{opt} = \underset{\sum b_j = N_T}{\arg\max} \log_2\left|\mathbf{I}+\frac{1}{\sigma_n^2}\mathbf{H}'_j\mathbf{M}'_j\mathbf{M}'^H_j\mathbf{H}'^H_j\right| \quad (11)$$

본 논문에서는 그림 3의 pseudo code를 따르는 실험을 통해 채널 용량을 최대화하는 b_j의 조합을 찾았다. 이 과정에 따라 선택된 b_j만큼의 데이터 스트림을 정확히 수신할 수 있도록 [2]의 빔포밍 기법을 적용한 블록 대각화 프리코딩 기법을 이용하고 각 사용자의 채널 용량이 균등하게 유지되도록 전력을 할당한다. 모든 사용자에게 같은 수의 데이터 스트림을 할당하는 방법은 모든 사용자의 채널 용량을 용량을 유지하기 위해 채널이 나쁜 사용자에게 거의 대부분의 송신 전력을 사용해야 함으로 채널이 좋은 사용자의 채널 용량 손실을 가져온다. 하지만, 제안된 기법은 채널이 나쁜 사용자에게 많은 수의 데이터 스트림을 할당하게 되어 송신 전력을 고르게 분배할 수 있게 되어 채널용량이 증가한다. 또한, 동일한 채널 용량을 만족하기 위한 전체 송신 전력 역시 기존의 기법에 비해 많이 줄어들게 된다. 요구 채널 용량에 대한 최소 전체 송신 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$C_{\max}=0$.
For m=1,...,(number of all possible b_j combinations)
{ For j=1,...,K
{ Compute the SVD $\mathbf{H}_j=\mathbf{U}_j\mathbf{\Lambda}_j\mathbf{V}_j^H$.
Let $\mathbf{W}_j$ be the first $b_{j,m}$ columns of $\mathbf{U}_j$.
Calculate $\mathbf{H}'_j=\mathbf{W}_j^H\mathbf{H}_j$.
}
For j=1,...,K
{ Compute $\tilde{\mathbf{V}}'^{(0)}_j$, the null space of $\tilde{\mathbf{H}}'_j$.
Compute the SVD
$\mathbf{H}'_j\tilde{\mathbf{V}}'^{(0)}_j=\mathbf{U}'_j\begin{bmatrix}\mathbf{\Sigma}'_j & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}[\mathbf{V}'^{(1)}_j\ \mathbf{V}'^{(0)}_j]^H$.
Compute $\mathbf{M}'_{j,m}=\left[\tilde{\mathbf{V}}'^{(0)}_j\ \mathbf{V}'^{(1)}_j\right]$.
}
Compute $C_m=\sum_{j=1}^{K}\log_2\left|\mathbf{I}+\frac{1}{\sigma_n^2}\mathbf{H}'_j\mathbf{M}'_j\mathbf{M}'^H_j\mathbf{H}'^H_j\right|$
if ($C_m > C_{\max}$)
{ $C_{\max}=C_m$.
For j=1,...,K
{ $b_{j,opt}=b_{j,m}$, $\mathbf{M}'_{j,opt}=\mathbf{M}'_{j,m}$.
}
}
}

그림 3. 제안된 데이터 스트림 할당 기법의 pseudo code

$$P_T=\min_{C_0}\sum_{j=1}^{K}\mathrm{tr}(\mathbf{M}'_j\mathbf{M}'^H_j) \quad (12)$$

여기서 $\mathrm{tr}(\bullet)$은 행렬의 트레이스이다. 기존의 기법은 채널이 나쁜 사용자의 채널 용량을 증가시키기 위해서 많은 송신 전력을 사용해야 하므로, 동일한 채널 용량을 만족하기 위한 전체 송신 전력의 소모가 크다. 하지만, 제안된 기법은 데이터 스트림의 분배를 통해 각 사용자의 송신 전력이 고르게 분배되므로, 전체 송신 전력의 소모가 적다.

Ⅴ. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제안된 데이터 스트림 최적화 기법을 검증하고 성능을 확인하기 위하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 모의실험을 통해 다양한 채널

환경에서의 채널 용량과 전체 송신 전력의 차이를 비교하였으며, 모든 사용자에게 동일한 수의 데이터 스트림을 할당하고 전력 제어만으로 채널 용량의 균등화를 만족시키는 기존의 기법과 비교를 하였다. 실험은 각각 5개의 수신 안테나를 갖는 4명의 사용자와 12개의 송신 안테나를 갖는 기지국이 있는 하향링크채널을 가정하고, large scale fading의 크기가 각기 다른 여러 환경에서 실험을 수행하였다.

그림 4에서는 전체 송신 전력이 동일한 조건에서의 평균 채널 용량을 보이고 있다. 그림 4에서 보이듯이 모든 사용자에 대해 같은 수의 데이터 스트림을 전송하는 기존의 기법보다 각 사용자의 채널의 크기에 따라 데이터 스트림을 할당하는 제안된 기법의 채널 용량이 약 2 bps/Hz정도 더 높은 것을 확인할 수 있다.

그림 5~그림 7은 각 사용자의 채널 용량이 주어진 요구 채널 용량을 만족할 때의 전체 송신 전력을 나타낸 것이다. 먼저, 그림 5는 각 사용자의 large scale fading의 차이가 2배씩 나는 환경에서 제안된 기법과 기존 기법의 요구 채널 용량에 대한 전체 송신 전력을 비교한 그래프이다. 그림에서 보이듯이, 각 사용자에 대한 요구 채널 용량이 매우 작을 때에도 모든 사용자에게 동일한 수의 데이터 스트림을 분배하는 기존의 방식은 제안된 기법에 비해 2dB많은 송신 전력이 필요함을 알 수 있다. 특히, 각 사용자에 대한 요구 채널 용량이 커질수록 두 기법간의 송신 전력의 차이가 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 각 사용자의 large scale fading의 차이가 4배씩 나는 환경에서 제안된 기법과 기존 기법의 전체 송신 전력을 비교한 그래프이다. 사용자의 large scale fading의 크기가 2배씩 나는 환경에 비해 필요한 전체 송신 전력이 더욱 커

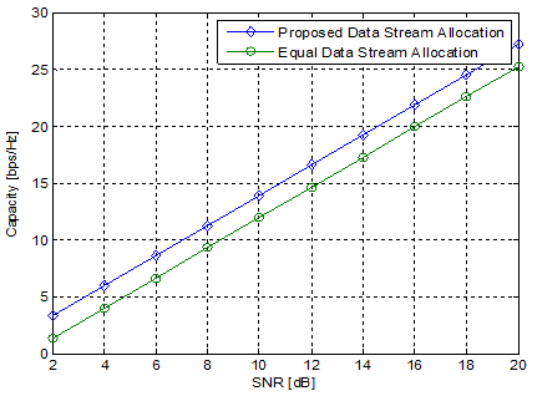

그림 4. 동일한 송신전력조건에서의 평균 채널 용량

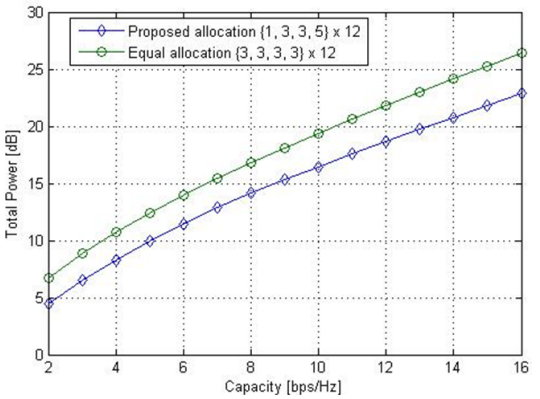

그림 5. 각 사용자의 large scale fading 차이가 2배일 때, 요구 채널 용량 대 전체 송신 전력

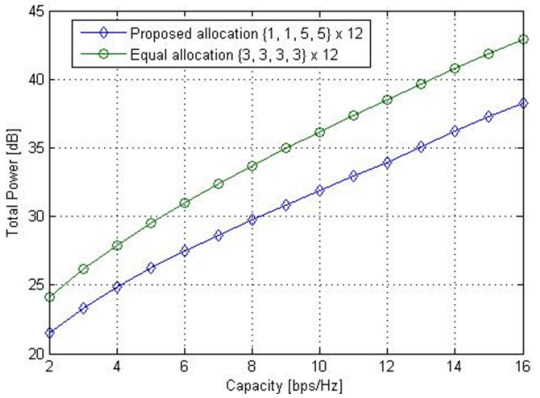

그림 6. 각 사용자의 large scale fading 차이가 4배일 때, 요구 채널 용량 대 전체 송신 전력

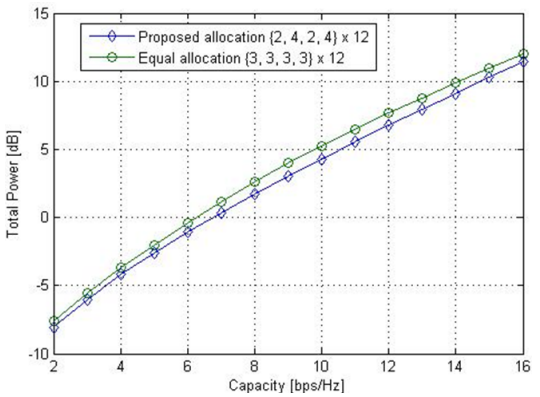

그림 7. large scale fading이 모두 같을 때, 요구 채널 용량 대 전체 송신 전력

졌을 뿐만 아니라 두 기법간의 송신 전력의 차이 역시 매우 커진 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 모든 사용자의 large scale fading이 같은 환경에서 제

안된 기법과 기존 기법의 전체 송신 전력을 비교한 그래프이다. 모든 사용자의 large scale fading의 차이가 없을 지라도 small scale fading의 차이는 존재하기 때문에 동일한 수의 스트림을 사용하는 기존 기법에 비해 채널의 차이에 따라 데이터 스트림을 분배하는 제안된 기법의 송신 전력이 더 작은 것을 확인할 수 있다. 특정한 환경에서의 실험뿐만 아니라 일반적인 환경에서의 실험 결과가 그림 8에 나타나있다. 그림 8은 랜덤한 large scale fading을 갖는 사용자들의 요구 채널 용량 대 전체 송신 전력을 비교한 그래프이다. 일반적으로 셀 내에서 사용자들의 위치가 동일한 경우는 거의 없으므로 사용자의 large scale fading의 크기 또한 다양하게 나타난다. 이런 환경에서는 모든 사용자에게 동일한 데이터 스트림을 분배하는 기존의 기법보다 사용자의 채널의 상태에 따라서 데이터 스트림의 수를 다르게 분배하는 제안된 기법의 송신 전력이 매우 작은 것을 확인할 수 있다.

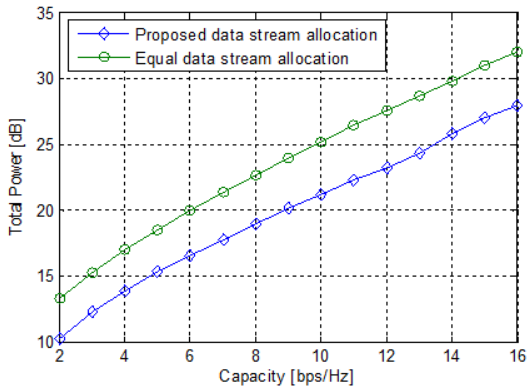

그림 8. 요구 채널 용량 대 평균 전체 송신 전력

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 블록 대각화 프리코딩 기법을 사용하는 다중 사용자 MIMO 채널 환경에서 모든 사용자에게 균등한 성능을 보장하기 위하여 상대적인 채널의 크기에 따라 데이터 스트림의 수를 할당하는 기법을 제안하고, 실험을 통해 이를 찾았다. 또한, 제안된 기법의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 분석했다. 그 결과 각 사용자의 채널 이득에 따라서 데이터 스트림의 수를 분배하는 제안된 기법이 채널 이득과는 상관없이 동일한 데이터 스트림의 수를 사용하는 기존의 기법에 비해 송신 전력당 채널 용량의 성능이 기존의 기법에 비해 좋은 것을 보였고, 요구되는 채널 용량 대 전체 송신 전력의 차이가 매우 큰 것을 확인했다.

참 고 문 헌

〔1〕 C. 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.

임 동 호 (Dong-ho Lim) 준회원

2008년 8월 영남대학교 정보통신공학과

2008년 9월~현재 영남대학교 정보통신공학과 석사과정

<관심분야> OFDM, MIMO

최 권 휴 (Kwonhue Choi) 종신회원

1994년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과

1996년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 석사

2000년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 박사

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

2003년 2월~현재 영남대학교 전자정보공학부 정보통신공학전공 부교수

<관심분야> OFDM, MIMO, CDMA