

논문 2004-41TC-10-8

# 복수 사용자 MIMO 시스템을 위한 동적 슬롯 할당 하향링크 공간분할 다중접속 기술

(Downlink Space Division Multiple Access with Dynamic Slot  
Allocation for Multi-User MIMO Systems)

임 민 중\*

(Minjoong Rim)

## 요 약

차세대 무선 통신 시스템은 현재보다 고속의 데이터 전송과 매우 큰 시스템 용량을 요구하며, 이와 같은 요구를 충족시키기 위해서 복수의 안테나를 사용하여 송수신을 하는 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 기술이 널리 연구되고 있다. 이 논문은 하나의 송신기에서 복수의 수신기에게 각각 복수의 데이터 스트림을 동시에 전송하면서 동적 슬롯할당을 이용하여 성능을 향상시키는 동적 슬롯할당 공간분할 다중접속 MIMO 시스템을 제안한다. 제안하는 기술은 빔포밍 차원의 감소로 인한 성능 감소를 최소화하면서 다른 MIMO 기술보다 많은 수의 병렬 데이터를 전송할 수 있게 함으로써 시스템 용량을 크게 증가시키는 것이 가능하다.

## Abstract

The next generation cellular wireless communication systems require high data rate transmissions and large system capacities. In order to meet these requirements, multiple antennas can be used at the base and mobile stations, forming MIMO(Multiple Input Multiple Output) channels. This paper proposes a MIMO SDMA(Space Division Multiple Access) technique with dynamic slot allocation which allows the transmitter to efficiently transmit parallel data streams to each of multiple receivers. The proposed technique can increase system capacities significantly by transmitting a larger number of data streams than conventional MIMO techniques while minimizing the performance degradation due to the beamforming dimension reduction.

**Keywords:** MIMO, Smart Antenna, Channel Capacity, SDMA, Dynamic Slot Allocation, Scheduling, Wireless

## I. 서 론

차세대 무선통신 시스템은 현재보다 매우 큰 고속 데이터 전송과 시스템 용량을 요구한다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 복수의 안테나를 사용하여 송신과 수신을 하는 MIMO(Multiple-Input, Multiple-Output) 기술들이 널리 연구되고 있다<sup>[1-4]</sup>. 무선을 통한 데이터 서

비스의 경우 하향링크가 상향링크보다 큰 용량을 요구한다. 하향링크 용량을 증대시키기 위해서는 단말기의 안테나 수를 증대시키는 것이 효과적이지만 단말기의 경우 전력, 크기, 무게, 가격의 제약 때문에 많은 수의 안테나를 두는 것은 현실적이지 않다. 이에 반해서 기지국은 그러한 제약이 상대적으로 적으므로 그 대안으로 기지국의 안테나 수를 증가시키는 방법을 택할 수 있다. 이 논문은 다수의 안테나를 가지는 기지국과 소수의 안테나를 가지는 단말기를 가정하여 하향링크에 초점을 맞추어 논한다. 이 논문에서 가정하는 채널 환경은 변동이 적으며(quasi-stationary) 평탄한 페이딩(flat-fading)을 가지는 채널이다. 채널의 변화가 적음으로써 TDD(time-division duplexing) 방식을 사용할 경

\* 동국대학교 정보통신공학과  
(Department of Information and Communication  
Engineering, Dongguk University)

※ 이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-003-D00283).

접수일자: 2003년10월29일, 수정완료일: 2004년10월5일

우 상향링크 채널 상태를 이용하며, FDD(frequency-division duplexing) 방식을 사용할 경우에는 단말기로부터 채널 상태를 받음으로써 기지국에서 송신 채널의 상태를 알 수 있다고 가정한다.

기지국의 안테나 수가  $M$ 이고 단말기의 안테나 수가  $N$ 이며  $M$ 이  $N$ 에 비해서 크다고 할 때 하향링크 MIMO 채널의 용량은  $N$ 에 비례하며, 기지국은  $N$ 개의 데이터 스트림(stream)을 동시에 전송함으로써 차세대 무선 통신에서 요구하는 고속 데이터 전송을 가능하게 한다. 단일 사용자를 위한 MIMO 시스템에서 기지국이 하향링크 채널의 상태를 알고 있다면 기지국은 SVD(Singular Value Decomposition)를 이용하여 빔포밍(beamforming)을 함으로써 병렬 데이터 스트림 전송의 이득과 함께 수신 SNR(Signal-to-Noise Ratio)의 증가로 인한 채널용량의 증대를 이룰 수 있다<sup>[5-7]</sup>. 이와 같은 기술을 이 논문에서는 SVD-MIMO라 부른다.

하나의 기지국이 여러 개의 단말기를 지원하는 복수 사용자를 위한 MIMO 시스템에서  $M$ 이  $N$ 에 비해 매우 크고 기지국이 하향링크 채널의 상태를 알고 있다면, 스마트 안테나의 공간분할 다중접속 기술을 확장시켜 사용자간의 간섭을 고려한 데이터 전송을 할 수 있다. 복수 사용자 MIMO 시스템에서 공간분할 다중접속 기술을 응용함으로써 사용자간 간섭을 일으키지 않으면서 복수의 사용자에게 각각 복수의 데이터 스트림을 병렬로 동시에 전송할 수 있으므로 고속 데이터 전송과 함께 큰 시스템 용량을 얻을 수 있다<sup>[8]</sup>. 이 논문에서는 이와 같은 기술을 SDMA(Space Division Multiple Access)-MIMO라 부른다. SDMA-MIMO는 MIMO 기술에 스마트 안테나 기술이 접목된 것으로서 하나의 기지국이 전송하는 전체 채널용량 측면에서 SVD-MIMO보다 우수한 성능을 낼 수 있다. SDMA-MIMO에 다시 링크계층 기술인 동적 슬롯할당 기술을 활용하여 사용자를 스케줄링을 하면 SDMA-MIMO보다 더 큰 전체 채널용량을 얻는 것이 가능하다. 동적 슬롯할당 기술을 접목한 SDMA-MIMO 기술을 이 논문에서는 DSA(Dynamic Slot Allocation)-SDMA-MIMO라고 부른다.

DSA-SDMA-MIMO는 MIMO 기술에 스마트 안테나 기술이, 그리고 그 위에 다시 링크계층 기술이 합해진 것이다.

이 논문은 복수사용자 환경에서 사용될 수 있는 DSA-SDMA-MIMO 기술을 제안한다. 이 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 단일사용자 환경에서 최대의 채널용량을 얻을 수 있는 SVD-MIMO에 대해 기술

하며 III장에서는 복수사용자 MIMO 시스템에서 용량 증대를 이루기 위한 DSA-SDMA-MIMO를 제안한다. IV장에서는 제안된 기술의 채널용량을 SVD-MIMO의 경우와 비교하고 V장에서는 실험 결과를 통해 제안된 기술의 성능을 보이며 VI장에서 결론을 맺는다.

## II. SVD-MIMO

송신기(기지국)의 안테나 수가  $M$ 이고 수신기(단말기)의 안테나 수가  $N$ 이며  $M$ 이  $N$ 에 비해서 클 때 수신기에서는 최대  $N$ 개의 데이터 스트림을 동시에 수신할 수 있으므로 송신기에서는 다음과 같이  $N$ 개의 데이터 스트림을 전송한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{t} &= \mathbf{G}\mathbf{x} \\ \mathbf{r} &= \mathbf{H}\mathbf{t} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\mathbf{x}$ 는  $(N \times 1)$ 의 전송하고자 하는 데이터 벡터,  $\mathbf{G}$ 는  $N$ 개의 데이터 스트림을  $M$ 개의 송신 안테나에 매핑시키는  $(M \times N)$  빔포밍행렬,  $\mathbf{t}$ 는  $(M \times 1)$  송신신호벡터,  $\mathbf{H}$ 는  $(N \times M)$  채널행렬,  $\mathbf{n}$ 은  $\sigma^2 \mathbf{I}$  ( $\mathbf{I}$ 은  $(N \times N)$  항등행렬)의 covariance 행렬을 가지는  $(N \times 1)$  백색잡음벡터,  $\mathbf{r}$ 은  $(N \times 1)$  수신신호벡터이다. 전송되는  $N$ 개의 병렬 데이터 스트림은  $(N \times N)$  의사채널행렬  $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{G}$ 을 통해서 전송된다고 생각할 수 있다.

먼저, 송신기에서 채널 상태 정보를 사용하지 않는 open-loop MIMO 시스템을 생각해 보자. 간단한  $\mathbf{G}$ 의 선택은  $N$ 개의 병렬 데이터 전송을 위해서  $N$ 개의 송신 안테나를 사용하는 것이며 예를 들어서  $\mathbf{G}$ 는 다음과 같이 선택될 수 있다.

$$\mathbf{G} = \mathbf{E} \quad (2)$$

식 (2)에서  $\mathbf{E}$ 는 주대각선만 1이고 나머지는 0인  $(M \times N)$  행렬이다. 만일 송신기에 채널 상태 정보가 있다면 채널 용량 증대를 위해서 SVD-MIMO 시스템은 다음과 같이  $\mathbf{G}$ 를 선택한다<sup>[5-7]</sup>.

$$\mathbf{G} = \mathbf{V}\mathbf{W} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\mathbf{V}$ 는 SVD,  $\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}'$  ( $\mathbf{V}'$ 는  $\mathbf{V}$ 의 복소전치행렬)에 의한  $(M \times M)$  unitary 행렬이며  $\mathbf{W}$ 는  $(M \times N)$  대각선 행렬로서 주대각선값이 water-filling에

의해서 결정된다<sup>15-17</sup>.

### III. DSA-SDMA-MIMO

SVD 기반의 MIMO 기술은 단일사용자 MIMO 시스템에서는 최대의 성능을 얻을 수 있지만 복수사용자 환경에서는 간섭을 고려한 MIMO 기술이 필요하다. M개의 안테나를 가지는 하나의 기지국과 각각 N개의 안테나를 가지는 다수의 단말기가 있는 환경을 고려할 경우 SVD-MIMO 시스템은, 한 순간에 K명의 사용자를 시분할 다중접속을 사용하여 지원할 때, 각 사용자를 위한 채널용량은 K분의 1로 줄어든다. 만일 기지국에 다수의 안테나가 존재하며 기지국이 복수사용자들의 채널 상태를 알고 있다면 기지국은 스마트 안테나에서 사용하였던 공간분할 다중접속 기술을 응용함으로써 채널용량을 증대시킬 수 있다.  $K \leq M/N$ 이라고 할 때 기지국은 다음과 같은 방법으로 K명의 사용자에게 각각 N개의 데이터 스트림을 동시에 전송한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{t} &= \sum_{i=1}^K \mathbf{G}_i \mathbf{x}_i \\ \mathbf{r}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{t} + \mathbf{m}_k \quad k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서  $\mathbf{x}_i$ 는 i 번째 사용자를 위한  $(N \times 1)$ 의 전송하고자 하는 데이터벡터,  $\mathbf{G}_i$ 는 i 번째 사용자를 위한  $(M \times N)$  빔포밍행렬,  $\mathbf{t}$ 는  $(M \times 1)$  전송신호벡터,  $\mathbf{H}_k$ 는 k번째 사용자를 위한  $(N \times M)$  채널행렬,  $\mathbf{m}_k$ 는 k번째 사용자를 위한  $(N \times 1)$  백색잡음벡터,  $\mathbf{r}_k$ 는 k번째 사용자가 수신하는  $(N \times 1)$  수신신호벡터이다. 공간분할 다중접속을 하기 위해서는 k번째 사용자를 위한 빔포밍행렬  $\mathbf{G}_k$ 는 데이터가 k번째 사용자를 제외한 다른 사용자에게 간섭으로 작용하지 않도록  $((K-1)N \times M)$  채널행렬  $\tilde{\mathbf{H}}_k \equiv [\mathbf{H}_1' \ \Lambda \ \mathbf{H}_{k-1}' \ \mathbf{H}_{k+1}' \ \Lambda \ \mathbf{H}_K']$ 에 직교하여야 한다.

$$\tilde{\mathbf{H}}_k \mathbf{G}_k = \mathbf{0} \quad (5)$$

만일  $\mathbf{N}_k$ 를  $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 의 null space의 orthonormal basis를 나타내는  $(M \times (M+N-KN))$  행렬이라 하면 식 (5)를 만족하는  $\mathbf{G}_k$ 는  $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 의 null space에 속해 있으므로

임의의  $((M+N-KN) \times N)$  행렬  $\mathbf{F}_k$ 에 대해서

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{N}_k \mathbf{F}_k \quad (6)$$

로 놓을 수 있다. 이 때의 k번째 사용자의 수신 신호는

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{N}_k \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{m}_k \quad (7)$$

이 되므로  $\mathbf{F}_k$ 는 의사채널행렬  $\mathbf{H}_k \mathbf{N}_k$ 을 통과할 때의 빔포밍 행렬이라고 생각할 수 있다. 따라서  $\mathbf{F}_k$ 는 식 (3)의 SVD-MIMO의 경우와 같은 방법으로 구해질 수 있으며 SVD,  $\mathbf{H}_k \mathbf{N}_k = \mathbf{U}_k \mathbf{S}_k \mathbf{V}_k'$  라고 한다면

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{V}_k \mathbf{W}_k \quad (8)$$

이 된다. 식 (8)에서  $\mathbf{W}_k$ 는  $(M \times N)$  대각선 행렬로서 water-filling에 의해서 결정된다. 식 (6)과 (8)에 의해서  $\mathbf{G}_k$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{N}_k \mathbf{V}_k \mathbf{W}_k \quad (9)$$

만일 기지국이 데이터를 전송해야 하는 사용자의 수 L이 공간분할 다중접속을 하여 전송할 수 있는 사용자의 수 K보다 크다면 기지국에서는 데이터를 전송할 때 마다 L명의 사용자 중 K명의 사용자를 선택하여 전송하여야 한다. 공간분할 다중접속을 할 때의 성능은 동시에 지원되는 사용자의 채널행렬의 차원이 얼마나 서로 겹치는가에 따라 결정되므로 서로 채널행렬의 차원이 독립적인 사용자들을 그룹지을 수 있다면 보다 높은 채널용량을 얻는 것이 가능하다. MIMO 시스템의 공간분할 다중접속은 링크계층 기술인 동적패킷할당 방법을 결합하여 지원하는 사용자의 수를 적응적으로 선택하고 동시에 지원하는 사용자들을 효율적으로 그룹지을 때 더욱 효과적으로 동작할 수 있으며 일반적인 MIMO 시스템에서는 이를 수 없는 커다란 시스템 용량을 얻을 수 있게 한다.

이 논문에서 사용한 스케줄링 알고리즘은 간단한 형태의 greedy 알고리즘이다. 사용된 알고리즘은 스케줄링에 참여되는 사용자의 수가 L이고 K명을 공간분할 다중접속을 한다고 할 때 다음과 같다.

- L명 중에서 스케줄되지 않은 사용자를 임의로 선택한다.

- 아직 스케줄되지 않은 사용자 중 선택된 사용자와 공간분할 다중접속을 할 때 가장 큰 채널용량을 가지는 사용자를 선택한다.
- K명의 사용자가 공간분할 다중접속이 될 때까지 위의 작업을 반복한다.
- L명의 사용자가 모두 스케줄 될 때까지 위의 작업을 반복한다.

#### IV. 채널 용량

식 (1)의 MIMO 시스템의 채널용량은 다음과 같이 표현될 수 있다<sup>[1-4]</sup>.

$$C = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H} \mathbf{G} E\{\mathbf{x}\mathbf{x}'\} \mathbf{G}' \mathbf{H}' \right) \right] \quad (10)$$

전송전력이  $P_T$ 로 제한되어 있고  $\mathbf{x}$ 가 균일전력분포를 가진다고 가정하면

$$E\{\mathbf{x}\mathbf{x}'\} = P_T / \text{trace}\{\mathbf{G}\mathbf{G}'\} \mathbf{I} \quad (11)$$

이때 따라서 채널용량은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C &= \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{P_T}{\text{trace}\{\mathbf{G}\mathbf{G}'\} \sigma^2} \mathbf{H} \mathbf{G} \mathbf{G}' \mathbf{H}' \right) \right] \\ &= \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{\text{trace}\{\mathbf{G}\mathbf{G}'\} |h|^2} \mathbf{H} \mathbf{G} \mathbf{G}' \mathbf{H}' \right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서  $|h|$ 는 SISO (Single Input, Single Output) 채널에서의 평균채널이득의 절대 값이며  $\rho \equiv P_T |h|^2 / \sigma^2$ 는 SISO 채널에서의 수신 안테나의 평균SNR이다.

Open-loop MIMO 시스템에서 빔포밍 행렬  $\mathbf{G}$ 를 식 (2)와 같이정하면 채널용량은 다음과 같이 쓰여진다.

$$C_{\text{Open-loop MIMO}} = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{N|h|^2} \mathbf{H} \mathbf{E} \mathbf{E}' \mathbf{H}' \right) \right] \quad (13)$$

Open-loop MIMO에 비해서 SVD-MIMO는 빔포밍 효과에 의한 SNR 증대를 얻는다.

특히 M이 N보다 매우 클 때 water-filling 효과는 무시되며  $\mathbf{H}\mathbf{H}' \approx M|h|^2 \mathbf{I}$ 로 근사화 될 수 있으므로 식 (13)은 다음과 같이 쓰여질 수 있다<sup>[7]</sup>.

$$\begin{aligned} C_{\text{SVD-MIMO}} &\approx \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{N|h|^2} \mathbf{H} \mathbf{V} \mathbf{V}' \mathbf{H}' \right) \right] \\ &\approx \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{N|h|^2} \mathbf{H} \mathbf{H}' \right) \right] \\ &\approx N \log_2 \left( 1 + \frac{M}{N} \rho \right) \end{aligned} \quad (14)$$

SVD-MIMO는 N개의 병렬 데이터 전송과 함께 수신 SNR의 증가로 인한 빔포밍 효과를 같이 얻게 된다.

DSA-SDMA-MIMO에서는 K명의 사용자를 위하여 KN개의 데이터 스트림을 병렬로 전송한다. 전송전력이

$P_T$ 로 제한되어 있고  $\mathbf{x}_k$ 가 균일전력분포를 가지고 있으며 각 사용자를 위해서 전송전력을 같은 양으로 분배한다면

$$E\{\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k'\} = P_T / (K \text{trace}\{\mathbf{G}_k \mathbf{G}_k'\}) \mathbf{I} \quad (15)$$

이 성립한다. 따라서 하나의 기지국의 전체 채널용량은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_{\text{DSA-SDMA-MIMO}} &= \sum_{k=1}^K \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H}_k \mathbf{G}_k E\{\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k'\} \mathbf{G}_k' \mathbf{H}_k' \right) \right] \\ &= \sum_{k=1}^K \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{K \text{trace}\{\mathbf{G}_k \mathbf{G}_k'\} |h_k|^2} \mathbf{H}_k \mathbf{G}_k \mathbf{G}_k' \mathbf{H}_k' \right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

DSA-SDMA-MIMO에서는 여러 명의 사용자 중 채널의 차원이 서로 가장 독립적인 사용자들을 같은 슬롯에 스케줄링하여 공간분할 다중접속을 하는 것으로서 스케줄링에 참여되는 사용자의 수가 많을수록 서로 영향을 주지 않는 채널을 가지는 사용자들을 선택할 수 있는 확률이 높아지게 된다. 만일 스케줄링에 참여되는 사용자의 수가 매우 커서 거의 항상 채널이 직교하는 K명의 사용자들을 선택할 수 있다고 가정한다면 각 사용자에 대해서 간섭에 대한 고려 없이 일반적인 SVD-MIMO와 같이데이터를 전송할 수 있다. 또한 M이 KN보다 매우 커서 water filling의 효과가 없을 때 기지국이 송신할 수 있는 전체 채널 용량은 다음과 같이 쓰여진다.

$$C_{DSA-SDMA-MIMO} \approx \sum_{k=1}^K \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{KN|h|^2} \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k' \right) \right] \quad (17)$$

M과 N이 크고 M이 KN보다 클 때 식 (14)에서와 같이  $\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k' \approx M|h|^2 \mathbf{I}$  으로 근사화할 수 있으며 식 (17)은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$C_{DSA-SDMA-MIMO} \approx KN \log_2 \left( 1 + \frac{M}{KN} \rho \right) \quad (18)$$

식 (18)을 식 (14)와 비교하면 DSA-SDMA-MIMO는 송신기의 안테나 수 M에 비해서 수신기의 안테나 수 N이 적을 때 N개의 데이터 스트림을 전송하는 대신 KN개의 데이터 스트림을 전송함으로써 SVD-MIMO에 비해서 커다란 이득을 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

### V. 모의 실험

채널 환경은 다음과 같이  $K_{Ricean}$  인자를 이용하여 상관도가 작은 채널부터 상관도가 많은 채널을 만들어 낼 수 있게 하였다<sup>[6,8]</sup>.

$$\mathbf{H}_k = \sqrt{\frac{K_{Ricean}}{K_{Ricean} + 1}} \mathbf{H}_k^{sp} + \sqrt{\frac{1}{K_{Ricean} + 1}} \mathbf{H}_k^{sc} \quad (19)$$

식 (19)에서  $\mathbf{H}_k^{sp}$  는  $(N \times M)$ 의 채널 행렬로서 각 사용자마다 불규칙적인  $\theta_k^r$  과  $\theta_k^t$  에 대해서

$$H_k^{sp}(n, m) = |h| \exp(jn\theta_k^r) \exp(jm\theta_k^t) \quad (20)$$

의 형태로 만들어졌으며  $\mathbf{H}_k^{sc}$  는 독립적인 페이딩 값을 가지는  $(N \times M)$ 의 채널 행렬이다.

실험은 SISO SNR  $\rho$  가 20dB일 때 하나의 기지국에서 전송하는 전체 채널용량의 CDF(Cumulative Distribution Function)의 측면에서 여러 가지 MIMO 기술들을 비교하였다. 그림들에서 X축은 bits/sec/Hz 단위의 전체 채널용량이며 Y축은 채널용량이 x값을 넘을 확률을 나타낸다. 그림 1은  $K_{Ricean} = 0$ 의 스퀘터링 채널에서 송신 안테나의 수가 4이고 수신 안테나의 수가 2이며 사용자의 총 수가 12이고 두 명의 사용자를 공간분

할 다중접속을 할 때의 실험 결과로서 왼쪽부터 SISO, open-loop MIMO, SVD-MIMO, SDMA-MIMO, DSA-SDMA-MIMO이다. Open-loop MIMO에 비해서 SVD-MIMO는 큰 용량을 보이지만 SDMA-MIMO는 이보다 더 큰 용량을 나타내고 동적 슬롯할당을 적용하면 용량을 더 증대시킬 수 있다.

그림 2는 같은 환경에서 송신 안테나의 수를 7로 증가했을 때이다. 송신 안테나의 수가 증가하면 SDMA-MIMO는 SVD-MIMO에 비해서 매우 큰 성능 향상을

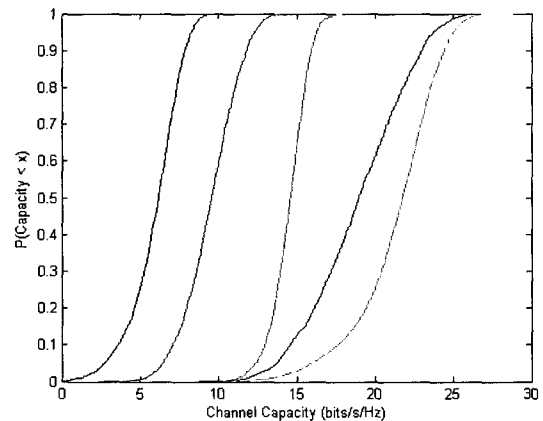


그림 1. 여러 MIMO 기술들의 채널 용량 (M=4, N=2, K=2, L=12,  $K_{Ricean}=0$ ) (왼쪽부터 SISO, open-loop MIMO, SVD-MIMO, SDMA-MIMO, DSA-SDMA-MIMO)

Fig. 1. The channel capacities of various MIMO techniques (M=4, N=2, K=2, L=12,  $K_{Ricean}=0$ ). (From the leftmost, SISO, open-loop MIMO, SVD-MIMO, SDMA-MIMO, DSA-SDMA-MIMO)

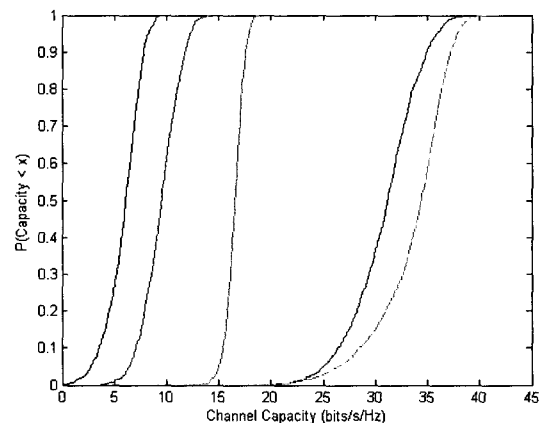


그림 2. 여러 MIMO 기술들의 채널 용량 (M=7, N=2, K=2, L=12,  $K_{Ricean}=0$ ) (왼쪽부터 SISO, open-loop MIMO, SVD-MIMO, SDMA-MIMO, DSA-SDMA-MIMO)

Fig. 2. The channel capacities of various MIMO techniques (M=7, N=2, K=2, L=12,  $K_{Ricean}=0$ ). (From the leftmost, SISO, open-loop MIMO, SVD-MIMO, SDMA-MIMO, DSA-SDMA-MIMO)

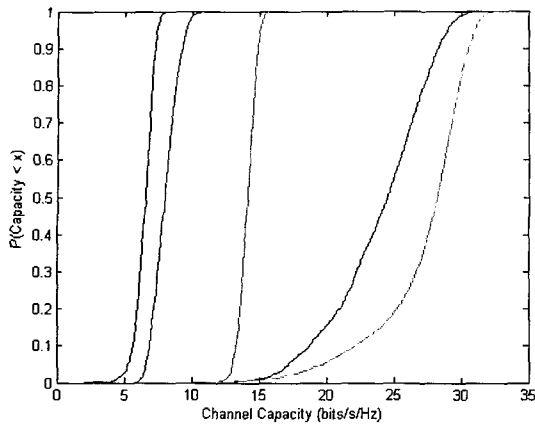


그림 3. 여러 MIMO 기술들의 채널 용량  
( $M=7, N=2, K=2, L=12, K_{Ricean}=10$ )  
(왼쪽부터 SISO, open-loop MIMO, SVD-MIMO, SDMA-MIMO, DSA-SDMA-MIMO)  
Fig. 3. The channel capacities of various MIMO techniques ( $M=7, N=2, K=2, L=12, K_{Ricean}=10$ ).  
(From the leftmost, SISO, open-loop MIMO, SVD-MIMO, SDMA-MIMO, DSA-SDMA-MIMO)

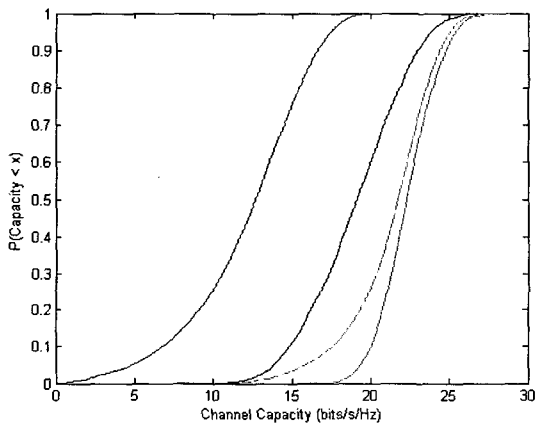


그림 4. SDMA와 SDMA-MIMO  
(왼쪽부터 SDMA( $M = 4, N = 1, K = 4$ ), SDMA-MIMO( $M = 4, N = 2, K = 2$ ), DSA-SDMA-MIMO( $M = 4, N = 2, K = 2, L = 12$ ), SVD-MIMO( $M = 4, N = 4$ ))  
Fig. 4. SDMA vs. SDMA-MIMO.  
(From the leftmost, SDMA( $M = 4, N = 1, K = 4$ ), SDMA-MIMO( $M = 4, N = 2, K = 2$ ), DSA-SDMA-MIMO( $M = 4, N = 2, K = 2, L = 12$ ), SVD-MIMO( $M = 4, N = 4$ ))

보이는 것을 볼 수 있다. 그림 3은  $K_{Ricean}=0$ 의 스펙트럼 채널에서 그림 2의 실험을 다시 한 것이다. 스펙트럼 채널에서는 모든 MIMO 기술의 성능이 많이 떨어지며 DSA-SDMA-MIMO의 경우도 성능이 떨어지게 되지만 여전히 다른 MIMO 기술에 비해서 우수하다.

그림 4는 MIMO를 사용하지 않은 SDMA, 즉 수신

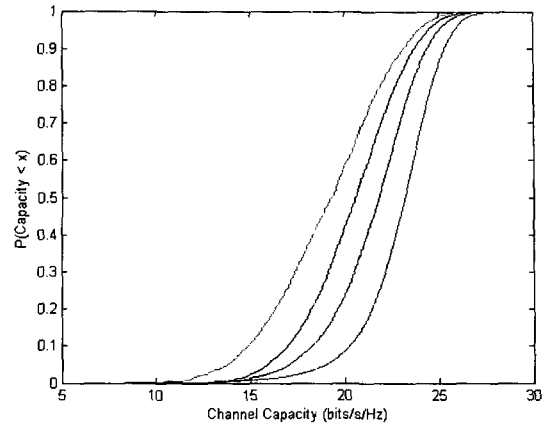


그림 5. 스케줄링을 위한 사용자의 증가에 따른 효과  
( $M=4, N=2, K=2, K_{Ricean}=0$ )  
(왼쪽부터  $L=2, L=4, L=12, L=100$ )  
Fig. 5. The effect of increasing the number of users for scheduling ( $M=4, N=2, K=2, K_{Ricean}=0$ ).  
(From the leftmost  $L=2, L=4, L=12, L=100$ )

안테나가 한 개인 경우와 SDMA-MIMO에 대한 비교, 그리고 DSA-SDMA-MIMO와 SVD-MIMO의 비교 결과이다. 실험은 송신 안테나의 수가 4이고  $K_{Ricean} = 0$ 인 경우이며, 안테나 1개를 가지는 4명의 사용자를 공간분할 다중접속하는 SDMA와 두 개의 안테나를 가지는 2명의 사용자를 공간분할 다중접속하는 SDMA-MIMO 및 DSA-SDMA-MIMO (사용자의 수  $L = 12$ ), 그리고 4 개의 안테나를 가지는 한 명의 사용자의 SVD-MIMO의 전체 채널용량을 비교한 것이다. SDMA, SDMA-MIMO, SVD-MIMO를 비교해보면 모두 4개의 송신 안테나로 전송하여 4개의 수신 안테나에서 수신을 하지만 4개의 수신 안테나가 같은 사용자에게 속하는가 아닌가에 따라서 채널 용량에는 차이가 나 것을 볼 수 있다. 같은 사용자에게 속하지 않은 경우 송신을 할 때 간섭이 일어나지 않도록 하여야 하며 이는 전송할 수 있는 차원을 감소시키므로 성능을 저하시킨다. 따라서 이상적인 경우는 각 사용자가 수신 안테나가 많은 경우이지만 단말기에 많은 수의 수신 안테나를 가지는 것은 현실적이지 않다. 기지국의 안테나 수가 많고 단말기의 안테나의 수가 복수이지만 적을 경우 SDMA-MIMO 기술을 사용할 수 있으며 이는 일반적인 SDMA 기술보다 효과적이다. DSA-SDMA-MIMO와 SVD-MIMO를 비교하면, 식 (14)와 식 (18)에서 볼 수 있는 것과 같이, 송신 안테나의 수가 같을 때 적은 수의 수신 안테나를 가지는 DSA-SDMA-MIMO는 많은 수의 수신 안테나를 가지는 SVD-MIMO에 근접하는 성능을

보인다.

그림 5는 스케줄링을 할 때 스케줄링에 참여되는 사용자의 수,  $L$ 에 따른 성능의 변화를 보여주는 실험이다.  $K_{Rician} = 0$ 이며 송신 안테나의 수는 4, 수신 안테나의 수는 2이며 두 명의 사용자를 공간분할 다중접속하였다. 왼쪽부터  $L = 2, 4, 12, 100$ 의 경우이다. 쉽게 예상할 수 있는 것과 같이 사용자의 수가 증가할수록 성능은 향상된다.

## VI. 결 론

이 논문은 다수의 안테나를 가지고 있는 기지국, 소수의 안테나를 가지고 있는 단말기, 스캐터링 및 변동이 적은 평탄한 페이딩 채널을 가정하여 하향링크에 적용될 수 있는 MIMO 기술에 대해서 논하였다. 단일 사용자 환경에서는 SVD를 이용했을 때 채널용량을 극대화시킬 수 있지만 다수의 단말기가 존재하는 복수 사용자 환경에서는 SVD-MIMO 기술과 공간분할 다중접속 기술, 그리고 동적 슬롯할당 기술을 결합한 DSA-SDMA-MIMO가 더 성능이 우수하다는 것을 보였다. 제안된 기술은 차세대 무선통신 시스템이 요구하는 고속 데이터 전송과 큰 시스템 용량을 만족시킬 수 있는 가능성을 가지고 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] A. Lozano, F.R. Farrokhi, R.A. Valenzuela, "Lifting the Limits on High Speed Wireless Data Access Using Antenna Arrays," *IEEE Communications Magazine*, Vol.39, No.9, pp. 156-162, September 2001.
- [2] G. J. Foschini, "Layered Space-Time Architecture for Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multi-element Antennas," *Bell Labs Technical Journal*, pp. 41-59, 1996.
- [3] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On the Limits of Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multiple Antennas," *Wireless Personal Communication*, pp. 315-335, 1998.
- [4] D. Gesbert, M. Shafi, D.S. Shiu, P.J. Smith, A. Naguib, "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.21, No.3, pp.281-302, April 2003.
- [5] G. G. Raleigh and J. M. Cioffi, "Spatio-Temporal Coding for Wireless Communications," *IEEE Transactions on Communications*, Vol.46, No.3, pp 357-366, March 1998.
- [6] F. R. Farrokhi, G. J. Foschini, A. Lozano, and R. A. Valenzuela, "Link-Optimal Space-Time Processing with Multiple Transmit and Receive Antennas," *IEEE Communications Letters*, Vol.5, No.3, pp.85-87, March 2001.
- [7] J. B. Andersen, "Array Gain and Capacity for Known Random Channels with Multiplex Element Arrays at Both Ends," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.18, No.11, pp.2172-2178, November 2000.
- [8] M. Rim, "Multi-User Downlink Beamforming with Multiple Transmit and Receive Antennas," *IEEE Electronics Letters*, Vol.38, No.25, pp.85-87, December 2002.
- [9] A. Paulraj, R. Nabar, D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2003.

## 저 자 소 개



임 민 중(정회원)

1987년 서울대학교 전자공학과 졸업 (공학사).

1993년 University of Wisconsin-Madison, Electrical and Computer Engineering (공학박사).

1993년~2000년 삼성전자 선임연구원.

2000년~현재 동국대학교 정보통신공학과 조교수.

<주관심분야: 이동통신, 무선통신, 통신 VLSI, 통신 소프트웨어>