

# 다중안테나 기술

인하대학교 정재학, 삼성종합기술원 남승훈, 숭실대학교 신요안, 이원철

차례

I. 서론

II. 다중안테나에서의 채널 용량

III. 다중안테나 알고리즘

IV. IEEE802.16e의 다중안테나 기술

V. 결론

## 요약

다중안테나 (multiple-input multiple-output: MIMO) 시스템의 장점은 단일안테나에 비해서 추가적인 주파수나 송신 전력을 증가시키지 않고 채널 용량을 안테나 수에 비례하여 증가시킬 수 있는 것이다. 본 논문에서는 다중 안테나 시스템의 이론적 용량을 살펴보고, 이를 달성하기 위한 기법들을 소개한다. 다중안테나 기법은 다이버시티 이득을 얻어 전송 신뢰도를 높이는 방식들과, 전송률을 높이는 공간 다중화 방식, 그리고 이 두 가지를 결합한 방식 등으로 크게 나눌 수 있다. 끝으로 휴대 인터넷에 사용되는 다중안테나 기술을 다룬다.

## I. 서론

무선 이동 통신에서의 고속 데이터 서비스를 낮은 가격으로, 많은 사용자에게 제공하려는 노력은 유한한 주파수 자원과, 송신 전력으로 인하여 기술적인 한계를 가지게 된다. 그러나 1995년 Teletar에 의해서 발표된 다중안테나 (multiple-input multiple-output: MIMO) 기술은 추가적인 주파수 할당이나 전력증가 없이도 통신 용량을 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있으며 이들 기술들은 현재 3세대 이동 통신, 차세대 무선랜, 휴대 인터넷 시스템 등의 다양한 무선 통신의 표준에 반영되고 있다.

다중안테나 연구는 다양한 채널 환경 및 다중접속 환경에서의 다중안테나 통신 용량 계산 등의 정보 이론 측면 연구, 다수 송수신 안테나 시스템의 채널 모형도출 및 채널 추정 연구, 전송률 향상 및 전송 신

되도 향상을 위한 시공간 신호 처리 기술 연구 등의 관점에서 진행되어 왔으며 다중 사용자 환경에서의 기술도 연구 되고 있다.

다중 안테나를 사용함으로써 얻을 수 있는 장점은 전송률 향상과 전송 신뢰도 향상이다. 이를 얻기 위한 구체적인 방법으로, 다수의 송신 안테나를 이용하여 다수의 데이터 심볼을 동시에 송신하여 전송률을 향상시키는 공간 다중화 (spatial multiplexing) 기반 방식들과, 송수신 안테나 수의 곱에 비례하는 다이버시티 이득을 얻음으로써 데이터 전송 신뢰도를 높이는 공간 다이버시티 (spatial diversity) 기반 방식이 있다. 또한 공간 다중화와 공간 다이버시티를 적절히 결합하여 두 가지 방식의 장점을 모두 얻고자 하는 방식도 있다.

## II. 다중안테나에서의 채널 용량

### 2.1. 채널 용량의 정의

(그림 1)은  $N$ 개의 송신 안테나와  $M$ 개의 수신안테나를 사용한 다중안테나 시스템의 개념도이다. 송신 안테나에서는  $N$  길이의 벡터  $x = [x_1 \dots x_N]^T$  를 송신하며, 각 송수신 안테나 사이의 채널을 단일 경로 페이딩 (frequency flat fading)으로 가정한다면, 각 수신 안테나의 수신 신호로 구성된 벡터

$$y = [y_1 \dots y_M]^T \text{ 는}$$

$$y = Hx + w \tag{1}$$

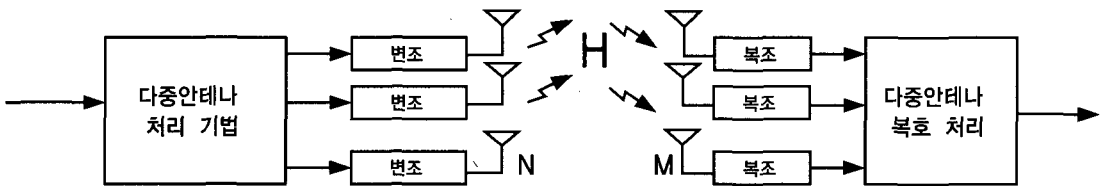
와 같이 표시된다. 여기서  $H$ 는  $M \times N$  크기의 채널 행렬이고  $w$ 는  $M \times 1$  크기의 AWGN 벡터이다. 만약  $R_x$  를  $x$ 의 공분산 행렬 (covariance matrix)로 정의할 경우, 다중 안테나 시스템의 채널 용량  $C$ 는 수신 신호  $y$ 로 부터 얻을 수 있는  $x$ 에 대한 최대 상호정보 (mutual information)의 값으로 정의되고, 다음과 같이 구할 수 있다 [1]-[2].

$$C = \max_{T, (R_{xx}) \leq P} I(x; y) = \log_2 \left[ \det(I_M + HR_x H^H) \right] \text{bps/Hz} \tag{2}$$

위 식에서  $I_M$ 은  $M \times M$  항등 행렬이고, 송신 전력의 총 합이 제한되므로,  $tr(R_x) \leq \rho$ 의 조건을 갖는다. 채널 용량  $C$ 는 채널  $H$ 에 따라 변하는 랜덤 변수이므로 일반적으로 채널은 평균 용량 (Ergodic capacity)  $C_E$ 와 outage 용량 (outage capacity)  $C_{out}$ 로 사용되며 다음과 같이 표시 가능하다.

$$C_E = E_H \left[ \log \det(I_M + HR_x H^H) \right] \tag{3}$$

$$C_{out} = \arg \left[ P(C < C_o) = \alpha \right]_{C_o} \tag{4}$$



(그림 1) 다중안테나 개념도

여기서  $\alpha$ 는 outage 확률이다.

식 (3)에 나타낸 값은 이론적인 값이고 이를 통신 시스템의 실제적인 상황에 대해서 분류 하면 채널 정보를 송신단이 채널 정보를 알 경우와 모를 경우로 나눌 수 있다.

## 2.2. 채널 용량: 송신단에서 채널 정보를 알 때

송신단에서 채널 정보를 알면 송신단에서 SVD (singular value decomposition) 를 통한 채널 분리와, 고유치 별 가중치(weighting value) 등의 선 신호처리를 이용하여 식 (2)의  $\mathbf{R}_x$ 를 조절 할 수 있다.  $\mathbf{R}_x$ 의 최적해는 waterfilling을 이용하여 구해지는데, 이를 통한 최적 채널 용량은 다음과 같이 구해진다.

$$C_{WF} = \sum_{i=1}^{\min(N,M)} \log_2(1 + k_i \lambda_i) \quad (5)$$

여기서

$$k_i = (\gamma - \gamma_i^{-1})^+ \quad (6)$$

와 같고,  $\gamma$ 는  $\sum_{i=1}^{\min(N,M)} k_i = \rho$  가 되도록 정한다.

식 (5)의 채널 용량은 다음 절에 설명할 채널 정보를 수신단에서만 아는 경우에 비하여 큰 값을 가지며, 그 차이는 신호대 잡음비가 작을수록 크게 나타난다.

## 2.3. 채널 용량: 송신단에서 채널을 모를 때

송신단에서 채널 정보를 모르는 경우는 각 안테나에 모두 동일한 전력으로 신호를 송신하는 것이 최적이다. 각 송신 안테나 전송 신호가 동일한 평균 전력

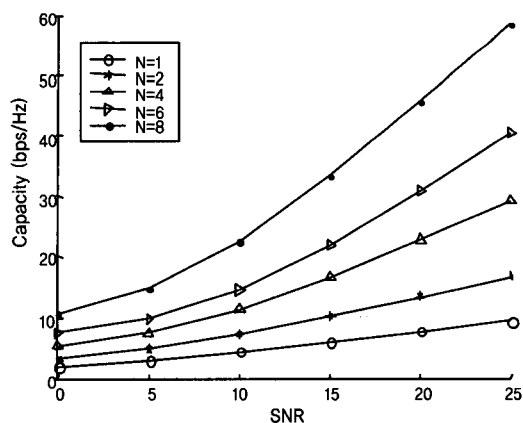
을 가지며, 상호 독립일 경우  $\mathbf{R}_x = (\rho/N)\mathbf{I}_N$  과 같고, 이를 식 (2)에 대입하면

$$C = \log_2 \det(\mathbf{I}_N + \frac{\rho}{M} \mathbf{H}\mathbf{H}^H) \quad (7)$$

을 얻는다. 이 식은 아래와 같이 다시 쓸 수 있는데 [3],

$$C = \sum_{i=1}^{\min(N,M)} \log_2(1 + \frac{\rho}{N} \lambda_i) \quad (8)$$

여기서  $\lambda_i$ 는  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  ( $M \leq N$ 인 경우) 또는  $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$  ( $M > N$ 인 경우)의 0이 아닌  $I$ 번째 고유값 (eigenvalue)이다.



(그림 2) 다중안테나 시스템의 채널 용량 ( $N=M$ , 송신 안테나에서 채널을 모를 때)

위의 채널 용량은 서로 독립인 레일리 페이딩 채널의 경우,  $M$ 과  $N$  중 작은 값에 비례하여 선형적으로 증가한다 [1]-[2]. (그림 2)는 송수신 안테나의 수가 같을 경우 SNR의 변화에 따라 그린 평균 채널 용량을 나타낸 그림이다. 동일한 SNR 값에서 채널 용량이

안테나 수에 비례하여 증가 하는 것을 알 수 있다.

반면 단일 송신 안테나를 사용하고, 다수의 수신 안테나를 사용하는 경우 채널 용량이나, 다수의 송신 안테나를 사용하고 단일 수신 안테나를 사용하는 경우 채널 용량은 안테나 수가 증가함에 따라 log값에 비례하여 증가하므로 안테나 수를 늘리더라도 성능 이득이 포화된다.

또한 다중안테나 시스템의 채널 용량은 채널의 특성에 따라 큰 영향을 받는다. 라이시안 채널(Rician channel), 상호 상관이 있는 채널 등에서는 채널 용량이 줄어들게 된다. 이에 관한 연구 결과는 [3]-[5]에 나와 있다.

### III. 다중안테나 알고리즘

다중 안테나 시스템에 적용되는 기술들은 앞서 언급한 바와 같이 크게 두 개의 기술 군으로 분류된다. 본 절에서는 이들의 구체적인 알고리즘들에 대하여 알아본다.

#### 3.1. 송신 다이버시티 기술

##### 3.1.1. Space-Time Block Code

송신 다이버시티 방법은 크게 수신단에서 송신단으로의 되먹임 채널이 존재하여 그 정보를 이용하는 페루프 방식과 되먹임을 이용하지 않는 개루프 방식으로 분류된다. 이 중에 개루프 방법으로 V. Tarokh에 의해 여러개의 송신 안테나를 사용하는 경우에 대한 시공간 부호(space-time code) 기법이 제안되었다 [6]. 처음 제안된 시공간 부호는 시공간 트렐리스 부호(space-time trellis code: STTC)의 형태로 나타나는데, trellis code의 경우는 송신 안테나의 개수가 늘어날 경우에 복호 복잡도가 변조 차수(mod-

ulation order)에 비례하여 지수적으로 증가하는 문제점이 있다. 이와 반대로 간단하게 송수신 할 수 있는 STBC(space time block code)가 제안되었다 [7]. STBC는 각 송신 안테나를 통해 전송되는 송신 신호들이 시간, 공간적으로 서로 상관관계(correlation)를 갖도록 설계하여 다이버시티 이득을 얻게 된다. 특히 두 개의 송신 안테나를 사용하는 경우 S. Alamouti에 의해 Space-Time Transmit Diversity(STTD)이라 불리는 간단한 기법이 제안되었다 [8]. 발명자의 이름을 따 Alamouti 기법이라고도 불리며 이 방식은 encoding과 decoding이 매우 간단하며 특히 decoding은 최대 우도 검출(Maximum likelihood: ML)을 선형 방식으로 유도할 수 있는 장점을 갖는다. STTD 기법은 현재 WCDMA나 ARIB, ANSI-IS 136, IEEE802.16e등의 다수의 표준화 단계들에 의해 표준안으로 채택되었다.

본 절에서는 송신 다이버시티의 대표적인 방식으로 두 개의 송신 안테나를 사용하는 Alamouti의 STBC에 대하여 설명한다.

두 개의 송신 안테나를 사용하는 경우에 대하여 transmission matrix  $S$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$S = \begin{pmatrix} S_1 & S_2 \\ -S_2^* & S_1^* \end{pmatrix} \quad (9)$$

여기서, 행렬의 첫 번째 행은 첫 번째 심볼 구간에 전송되는 신호, 두 번째 행은 두 번째 심볼 구간에 전송되는 신호를 나타내고, 행렬의 첫 번째 열은 첫 번째 송신 안테나를 통해 전송되는 신호, 두 번째 열은 두 번째 송신 안테나를 통해 전송되는 신호를 나타낸다. 즉, 식 (9)에서 보이는 것과 같이 두 개의 심볼 구간 동안에 두 개의 심볼이 전송되므로 단위 시간당 심볼 전송률은 1 이다.

복호 식을 간단히 하기 위하여 수신 단에서 사용하

는 안테나의 개수가 하나일 경우에 대하여 고려해 보기로 한다. 첫 번째 심볼 구간에 수신되는 신호를  $r_1$ 라 하고, 두 번째 심볼 구간에 수신되는 신호를  $r_2$ 라 하면 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r_1 &= h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \\ r_2 &= h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + n_2 \end{aligned} \quad (10)$$

이를 다시 행렬 형태로 정리하면

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2^* \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} h_1 s_1 + h_2 s_2 \\ -h_1^* s_2 + h_2^* s_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & h_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

와 같이 표현된다.

복호는 수신 신호의 직교 성질을 이용하여 송신 신호를 쉽게 검출할 수 있다. 이로부터 송신 신호 성분은 독립된 두 개의 채널 이득이 제공하여 더해진 형태로 나타나므로 송신 다이버시티 이득 2를 얻고 있음을 알 수 있다.

### 3.1.2. 송신 안테나가 세 개 이상인 경우의 Space-Time Block Code

STBC의 경우 송신 안테나가 3개 이상인 경우에 complex 신호를 전송할 수 없다. 이 문제를 해결하기 위해서 많은 연구가 진행되었는데 [9]에 의해서 최대의 전송 다이버시티와 전송률을 가지는 방식이 제안되었다. 전송 행렬은 다음과 같이 표시된다.

$$A = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* & 0 & 0 \\ s_2 & s_1^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & -s_4^* \\ 0 & 0 & s_4 & s_3^* \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} x_1 &= s_{1,I}^r + js_{3,Q}^r \\ x_2 &= s_{2,I}^r + js_{4,Q}^r \\ x_3 &= s_{3,I}^r + js_{1,Q}^r \\ x_4 &= s_{4,I}^r + js_{2,Q}^r \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에 나타난 전송 심볼  $s$ 는 먼저  $\theta = 0.5 \tan^{-1} 2$ 에 의해서 회전(rotation)된 심볼이며, 이 심볼 들은 실수부와 허수부가 각각 나뉘어져서 다른 새로운 전송 심볼  $x$ 를 만들게 된다. 그러므로 새로이 만들어진 심볼  $x$ 는 전송된 심볼이 된다. 하나의 심볼  $x$ 는 2개의 심볼  $s$ 의 내용을 가지고 있으므로 전송 다이버시티는 4를 가지게 된다. 이 전송 방식의 복호 방법은 전송 신호의 직교 성질을 이용하여 간단하게 구현된다.

### 3.1.3. Transmit Antenna Array (TxAA)

TxAA 방식은 현재 3GPP(WCDMA)에서 채택되어 사용되는 기술이다 [10]. TxAA 기술은 다중의 송신 안테나를 사용하여 송신 다이버시티를 얻는 방법 중 페 루프 방식의 하나로 수신 단으로부터 송신 단으로 되먹임 된 정보를 이용하여 신호를 송신하는 방식이다. TxAA 방식은 송신 안테나 개수만큼의 다이버시티 이득을 얻는 동시에 송신 안테나의 수가 하나 증가할 때 마다 평균 수신 신호대잡음비가 3dB 증가하는 배열 이득(array gain)을 추가로 얻기 때문에 페 루프 방식에 비해 보다 우수한 성능을 나타낸다 [11][12].

앞서 살펴본 다이버시티 방식들은 단위시간당 심볼 전송률이 1 이하인 방식들이다. 다이버시티 방식은 Rayleigh fading 환경하에서 비트수신오율 곡선의 기울기가 신호대잡음비의 다이버시티 이득 거듭제곱 SNR<sup>d</sup> (d: 다이버시티 이득)에 비례하기 때문에 단일의 송수신 안테나를 사용할 때 보다 전송 신뢰도를 높일 수 있다는 것이 장점이다.

### 3.2. 공간 다중화 (spatial multiplexing) 기술

차세대 무선 통신 시스템에서 요구되는 높은 주파수 효율은 다이버시티 방식만을 사용해서는 만족시키기 어렵다.

공간 다중화(spatial multiplexing) 방식은 다중 안테나 환경에 의해 제공되는 독립적인 부 채널들을 이용하여 서로 다른 신호를 전송함으로써 전송률을 높이는 방식이다. 다중의 송신 안테나를 통해 동시에 전송할 수 있는 서로 다른 신호의 개수는 사용하는 송수신 안테나 개수의 최소값과 같게 되므로 멀티플렉싱 방식의 이점을 충분히 얻기 위해서는 다이버시티 방식과는 달리 송수신 단에서 모두 다중의 안테나를 사용하는 것이 필요하다.

멀티플렉싱 방식 역시 되먹임 정보를 사용하는 페루프 방식과 되먹임 정보를 사용하지 않는 개루프 방식으로 분류된다. 본 절에서는 멀티플렉싱 방식을 구현하는 기본적인 개루프 방식으로서 수신 성능을 향상시키기 위해 제안된 V-BLAST 기법에 대해 설명한다. 또한 페루프 방식으로 다중 안테나 시스템의 채널 용량을 달성하는 SVD 방식에 대해서도 살펴보기로 한다.

#### 3.2.1. V-BLAST

BLAST 방식은 Bell lab. LAYered Space-Time의 약자로써 다이버시티 오더가 ZF(zero forcing)이나 MMSE(minimum mean square error) 방식 같은 공간 다중화 방식의 단점을 극복하고 복호 성능을 향상시키기 위한 기법이다 [13]-[15]. Foschini에 의해 D-BLAST (Diagonal BLAST)방식이 처음으로 고안되었고 이 방식은 각 송신안테나를 통해 전송되는 신호들을 매 심볼 구간마다 시간, 공간 상에서 대각 방향으로 편이시켜 반복적으로 송신함으로써 모든 송신 신호들이 높은 다이버시티를 얻도록 구현한 방식

이다 [13]. 그러나 구현이 다소 복잡하고 복호 지연이 발생하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 각 송신 안테나로부터 전송된 신호들을 수직적으로 구분하여 복원하는 V-BLAST방식이 제안되었다 [13]. V-BLAST 방식 역시 수신 단의 안테나의 개수가 송신 단의 안테나 개수 이상일 경우에 동작한다는 전제 조건을 갖는다. V-BLAST방식은 다중 안테나의 사용을 통해 멀티플렉싱 이득을 얻고자 한다는 점에서 ZF 수신기나 MMSE 수신기와 유사한 기술이지만 연속 간섭 제거 (successive interference cancellation)의 방법을 이용하여 보다 높은 다이버시티 이득을 얻을 수 있다는 면에서 한 단계 발전된 기법이라고 할 수 있다. V-BLAST 수신기의 복호기는 크게 ZF 수신기나 MMSE 수신기 등을 이용하여 여러 안테나에서 들어오는 간섭 신호를 분리해내는 부분과 분리된 간섭 신호를 통해 연속 간섭 제거를 수행하는 부분으로 구성된다.

그러므로 V-BLAST 방식은 첫 번째 단계에서 검출되는 신호의 다이버시티 이득이 제일 적고 각 복호 단계마다 간섭 신호를 제거한 뒤 신호를 검출할수록 다이버시티 오더가 1씩 증가하게 된다. 그러나 먼저 검출한 신호에 오류가 발생했을 때 이 오류가 계속 다른 단계로 전이되는 단점이 있다.

#### 3.2.2. Singular Value Decomposition (SVD)

SVD(singular value decomposition) 방식은 송신 단에 채널을 SVD함으로써 채널을 고유 벡터 영역으로 나누고 이를 substream으로 이용하여 전송하는 방식이다. 즉, 통신 채널을  $\min(M, N)$ 개의 간섭이 존재하지 않는 서로 평행한 서브채널(sub-channel)로 분리하여 준다.

채널 행렬  $\mathbf{H}$ 를 singular value decomposition 하게 되면 다음과 같은 결과를 얻게 된다.

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H \quad (14)$$

여기서  $\mathbf{U}$ 와  $\mathbf{V}$ 는 각각  $M \times M$ ,  $N \times N$ 의 크기를 갖는 유니터리 행렬(unitary matrix)이고,  $\mathbf{D}$ 는  $M \times N$  크기를 갖는 음이 아닌 실수를 원소로 갖는 대각 행렬(non-negative diagonal matrix)이다. 이 때 송신 단에서 송신신호에  $\mathbf{V}$ 를 곱한 후에 전송하고, 수신 단에서 수신신호에  $\mathbf{U}^H$ 를 곱하게 되면 다음과 수식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}' &= \mathbf{U}^H \mathbf{y} = \mathbf{U}^H \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^H \mathbf{V}_x + \mathbf{U}^H \mathbf{n} \\ &= \mathbf{D} \mathbf{x} + \mathbf{n}' \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,  $\mathbf{D}$ 가 대각 행렬이므로, 송신 단에서 전송한 신호들은 각각 간섭 신호가 없는 평행한 채널을 겪은 뒤에 수신 단에서 수신되는 형태를 띠게 된다.

SVD 방식은 송수신 단에서 채널 정보가 유용할 경우에 채널의 용량을 달성하는 송수신 방법으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} c &= \max_Q \log \det(\mathbf{I}_M + \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H \mathbf{Q} \mathbf{V}\mathbf{D}^H \mathbf{U}^H) \\ &= \max_Q \log \det(\mathbf{I}_M + \mathbf{Q}\mathbf{D}\mathbf{D}^H) \\ &= \max_{\rho} \sum_{i=1}^{\min(M,N)} \log(1 + \rho_i \lambda_i) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $\mathbf{Q} = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\}$ 는 입력 신호의 공분산 행렬(covariance matrix)은  $\rho_i$ 가 서브채널에 할당되는 송신 전력을 나타내고,  $\lambda_i$ 는  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 의 영이 아닌 고유치(non-zero eigen value)들을 나타낸다. 채널의 용량을 달성하는 송신 전력의 값들은 워터필링(waterfilling) 알고리즘을 통해 구할 수 있다. 워터필링 알고리즘으로 구해진 최적의 송신 전력과 그에 대응하는 적절한 변조 차수를 선택하면 다중 안테나 시스템의

이론적인 채널 용량에 근접하는 전송량(throughput)을 얻을 수 있다.

이 밖에 수신 단으로부터 되먹임 받은 채널 정보를 이용하여 송신 단에서 전송효율을 높이는 방법으로는 Per Antenna Rate Control (PARC) 방식 [16]과 Per Antenna Power Control (PAPC) 방식 [17]이 있다. PARC 방식은 요구되는 비트수신오율(BER)에 대하여 전송률을 최대화시키기 위하여 각 송신 안테나를 통해 전송되는 신호들의 변조 차수를 조절하는 방식이고, PAPC 방식은 요구되는 전송률이 주어진 환경에서 비트수신오율을 최소화 하기 위하여 각 송신 안테나의 전력을 제어해주는 방식이다.

### 3.3. Diversity 와 multiplexing의 결합 기술

공간 다이버시티로 인한 성능 이득은 다이버시티 차수가 증가함에 따라 포화되는 경향을 보인다. 따라서 많은 수의 송신 안테나를 사용할 경우 전체 안테나 중 일부만 공간 다이버시티에 사용하고, 나머지를 이용해서는 공간 다중화 이득을 얻어 전송률을 높이는 연구가 진행되었다. 본 논문에서는 시공간 블록 코딩과 공간 다중화를 결합한 Double STTD와 Coded modulation과 공간 다중화를 결합한 ST-BICM을 소개한다.

#### 3.3.1. Double STTD

다중 안테나를 사용함으로써 얻을 수 있는 다이버시티 이득과 멀티플렉싱 이득은 서로 trade off 관계에 있다. 따라서, 채널 환경이나 요구되는 서비스의 특징 등에 따라 다이버시티 기법을 사용하는 것이 유리한 것인지 멀티플렉싱 기법을 사용하는 것이 유리한 것인지 결정되게 되고, 상황에 따라 이 두 가지 기법의 이득을 동시에 얻기 위한 알고리즘 역시 필요하다.

Double STTD 기법은 네 개의 송신 안테나를 사용하는 시스템에서 두 개의 안테나가 한 쌍을 이루어 STTD 기법을 이용하여 신호를 전송하고 수신 단에서는 종래의 STTD 수신기의 동작을 먼저 수행하고, 이들 신호를 이용하여 ZF 수신기나 MMSE 수신기, 혹은 V-BLAST 기법 등을 이용해 송신 신호들을 검출해내는 기법이다 [18][19]. 송신 단에서는 두 심볼 구간 동안 두 개의 STTD 블록이 전송되고, 수신 단에서는 이를 검출하기 위해 두 개 이상의 수신 안테나가 존재하여야 한다.

네 개의 송신 안테나를 통해 전송되는 신호들은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \end{pmatrix} \quad (17)$$

여기서 행렬의  $i$ 번째 열은  $i$ 번째 송신 안테나를 통해 전송되는 신호를 나타내고,  $j$ 번째 행은  $j$ 번째 심볼 구간에 전송되는 신호를 나타낸다. 수신 단에서 두 개의 수신 안테나를 사용하는 경우를 생각하면, 수신 신호들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{31} & h_{32} \\ h_{41} & h_{42} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} \\ n_{21} & n_{22} \end{pmatrix} \quad (18)$$

여기서  $r_j$ 는  $j$ 번째 수신 안테나를 통해  $i$ 번째 심볼 구간에 수신되는 신호를 뜻한다.

수신 신호 복호 시에는 2 단위의 시간 동안에 수신하여 이 두 관계를 이용하여 복호한다. 복원된 신호

들은 다이버시티 오더 2 를 갖는다. 또한 V-BLAST 기법에 사용되는 SIC 기법을 적용할 경우에는 복호 단계에 따라 추가적인 다이버시티 이득을 얻게 된다.

DSTTD 기법은 다이버시티 이득만을 추구하는 기법들에 비하여 높은 전송률을 얻을 수 있고, 멀티플렉싱 이득을 추구하는 멀티플렉싱 기법들에 비하여서는 높은 다이버시티 이득을 얻을 수 있기 때문에, 간단한 방법으로서 두 가지 기법의 이득을 동시에 얻는다는 장점이 있다.

### 3.3.2. Space Time Bit Interleaved Coded Modulation (ST-BICM)

[20]에서 연구된 Bit Interleaved Coded Modulation (BICM)은 기존의 coded modulation 계열에 비해 다이버시티 이득을 효과적으로 얻기 때문에 레일리 페이딩(Rayleigh fading)이 있는 환경에서 좋은 성능을 보인다. 또한 채널 code와 modulation이 interleaver에 의해 분리되어 있기 때문에 적응 변조 방식을 적용하기 용이하다. 이러한 특징을 가지는 BICM을 spatial multiplexing 방법들과 concatenation한 방법을 기존의 STTC (Space time trellis code)와 비교하면 fast fading 혹은 OFDM과 같이 채널에서 diversity를 얻을 수 있는 경우 더 낮은 오류율을 얻을 수 있다 [21]. 그러나 [22]에서는 Spatial multiplexing에 대한 수신기가 ML 형태이므로 각 Bit별 Log likelihood Ratio (LLR)을 구할 때 많은 복잡도가 필요하다. 복잡도를 줄이기 위해 BLAST 구조의 수신기를 사용하고 [23]에서와 유사하게 LLR계산 과정을 간단히 하는 방법이 개발 되었다. 이러한 방식의 경우 de-mapper의 복잡도를 간단히 할 수 있지만 SIC의 error propagation 때문에 성능 저하를 겪게 된다. 이를 극복하기 위해 [23]에서는 송신 단에서 rate compatible punctured code (RCPC)를 활용하여 각 layer들이 독립적으로 decode가 되도록 하



고, error propagation을 고려한 경우 최적화된 soft bit metric을 개발하여 error propagation의 효과를 크게 줄이고 있다.

#### IV. IEEE802.16e의 다중안테나 기술

IEEE802.16e에는 cellular 형식의 이동 통신시스템에 본격적으로 다중안테나 기술이 사용된 표준이다. 2005년 현재 다중안테나 기능들은 거의 확정이 되었으며 본 절에서는 이에 채택된 기술들을 간략하게 소개 한다.

IEEE802.16e에서는 다중안테나의 공간 다이버서티 방식과 공간 다중화 방식을 모두 채택하였다. 3개 이상의 송신 안테나를 가지고 있을 때 전송 심볼의 속도에 따라서 A, B, C 형태로 나뉘는데 안테나가 4개인 경우에는 다음과 같은 형태의 STBC 형태로 전송을 한다.

$$A = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* & 0 & 0 \\ s_2 & s_1^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & -s_4^* \\ 0 & 0 & s_4 & s_3^* \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$B = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* & s_5 & -s_7^* \\ s_2 & s_1^* & s_6 & -s_8^* \\ s_3 & -s_4^* & s_7 & -s_5^* \\ s_4 & s_3^* & s_8 & s_6^* \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$C = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서 A 형태는 전송률 1인 경우이고 B 는 전송률이 2 그리고 C 형태는 전송률이 4인 경우의 송신 블록이다. A의 형태는 전송률이 1 이지만 공간 다이버서티가 2를 가지는 형태로 최적의 전송방식은 아니지만 간단한 복호 성능을 이유로 사용되고 있다.

IEEE802.16e에서는 개루프 (open loop) 형태의 이와 같은 공간 다이버서티 또는 공간 다중화 방식이 사용되고 있고 이와 더불어 성능을 보다 높이기 위한 되먹임이 있는 폐루프 (closed loop) 형태의 전송 방식도 사용하고 있다. 이 방식의 주된 기술은 송신 단에서 precoding (또는 eigen beamforming)을 위해 임의의 정해진 look up table을 이용하여 전송하는데 수신 단에서는 이에 해당하는 정보를 송신 단에 넘겨 주어서 최적의 송신을 하도록 한다 [24]-[25].

#### V. 결 론

다중안테나에 사용되는 기본적인 원리와 사용되는 기술들에 대해서 알아보고, 최근에 진행 중인 휴대인터넷 표준인 IEEE802.16e에서 사용 중인 기술들에 대해서 살펴보았다. 다중안테나의 기술은 현재도 연구가 많이 되고 있는 분야로서 기존의 단일 사용자 간의 방식에서 확장하여 다중 사용자의 경우에 대한 전체의 cell 용량을 늘리는 연구들이 많이 진행되고 있다. 이와 같은 연구들의 결과를 바탕으로 다중안테나 기술은 차세대 이동 통신의 핵심 기술로서 사용될 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] G. J. Foschini, M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading

- environment when using multiple antennas," Kluwer: Wireless Personal Communications, pp. 311-335, 1998.
- [2] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," AT&T Bell Labs Technical Memorandum BL011217 ? 950615 - 07TM, June 1995.
- [3] P. F. Driessen and G. J. Foschini, "On the capacity formular for multi-input multi-output wireless channels: A geometric interpretation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, pp. 173-176, Feb. 1999.
- [4] D. Shu, G. J. Foschini, M. J. Gans, and J. M. Kahn, "Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48 pp. 502-513, Mar. 2000.
- [5] D. Chizhik, F. Rashid-Farrokhi, F. Ling, and A. Lozano, "Effect of an antenna separation on the capacity of BLAST in correlated channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 4, pp. 337-339, Nov. 2000.
- [6] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communications: performance criterion and code construction," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 44, pp. 744-765, Mar. 1998.
- [7] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 45, pp. 1456-1467, July 1999.
- [8] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [9] Z. A. Khan and B. S. Rajan, "Space-time block codes from coordinate interleaved orthogonal designs," in Proc. IEEE Int. Symp. Info. Theory, Lausanne, Switzerland, p. 275, June 2002,
- [10] Siemens, "Description of the eigenbeam-former concept and performance evaluation," TSG-R WG 1 document, TSGR1#19 (01)0203, Las Vegas, USA, Feb. 27-March 2, 2001.
- [11] T. K. Y. Lo, "Maximum ratio transmission," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, pp. 1458-1461, Oct. 1999.
- [12] J. K. Cavers, "Single-user and multiuser adaptive maximal ratio transmission for Rayleigh channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, pp. 2043-2050, Nov. 2000.
- [13] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 1, pp. 41-59, Autumn 1996.
- [14] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," in Proc. URSI Int. Symp. Signals, Systems, and Electronics, pp. 295-300, Pisa, Italy, Sept.-Oct. 1998.
- [15] E. Biglieri, G. Taricco, and A. Tulino, "Decoding space-time codes with BLAST architectures," *IEEE Trans. Signal Processing*,

- Vol. 50, pp. 2547-2552, Oct. 2002.
- [16] S. T. Chung, A. Lozano, and H. C. Howard, "Approaching eigenmode BLAST channel capacity using V-BLAST with rate and power feedback," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, Atlantic City, NJ, USA, Oct. 2001 pp. 915-919.
- [17] S. H. Nam and K. B. Lee, "Transmit power allocation for an extended V-BLAST system," in *Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 2, pp. 843-848, Sept. 2002.
- [18] E. N. Onggosanusi, A. G. Dabak, and T. A. Schmidl, "High rate space-time block coded scheme: performance and improvement in correlated fading channels," in *Proc. IEEE Wireless Comm. and Net. Conf.*, vol. 1, pp. 194-199, Mar. 2002.
- [19] Texas Instruments, "Double-STTD scheme for HSDPA systems with four transmit antennas: Link Level Simulation Results," TSG-R WG1 document, TSGR1#20(01)0458, Busan, Korea, 21?24 May, 2001.
- [20] G. Caire, G. Taricco, and E. Biglieri, "Bit-Interleaved Coded Modulation," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 44, No. 3, pp. 927-946, May 1998.
- [21] S. Muller-Weinfurtner, "Coding Approaches for Multiple Antenna Transmission in Fast Fading and OFDM," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 50, No. 10, pp. 2442-2450, Oct. 2002.
- [22] F. Tosato and P. Bisaglia, "Simplified soft-output demapper for binary interleaved COFDM with application to HIPERLAN/ 2," *Proc. IEEE ICC 2002*, pp. 664-668.
- [23] K. B. Song, C. S. Hwang, J. Cioffi, "Rate-compatible Punctured Convolutionally (RCPC) Space-Frequency Bit-interleaved Coded Modulation (SF-BICM)," *Proc. IEEE ICC 2004*, June 2004.
- [24] D. J. Love, and R. W. Heath Jr., "Grassmanian Beamforming for Multiple-Input Multiple-Output Wireless Systems," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 49, No. 10, October 2003.
- [25] B. Hochwald et al, "Systematic Design of Unitary Space-Time Constellations", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol 46, No 6, pp1962-1973, Sept 2000.



**정재학**

1988년 연세대학교 전자공학과 학사  
 1990년 연세대학교 전자공학과 석사  
 2000년 University of Texas at Austin, 전기및컴퓨터 공학과 박사  
 1990년 ~ 1995년 (주)신도리코 선임 연구원  
 2000년 ~ 2001년 University of Texas at Austin,

postdoc fellow

2001년 ~ 2005년 삼성종합기술원 전문연구원

2005년 ~ 현재 인하대학교 전자전기공학과

관심분야 : 이동통신, 다중 안테나 신호 처리, cognitive radio, UWB



**남승훈**

2000년 서울대학교 학사  
 2002년 서울대학교 석사  
 2002년 ~ 현재 삼성종합기술원 Communication and Networking Lab. 연구원  
 관심분야 : 이동통신, 다중 안테나 신호 처리



**신요안**

1987년 서울대학교 전자공학과 학사  
 1989년 서울대학교 전자공학과 석사  
 1992년 University of Texas at Austin 전기및컴퓨터공학과 박사  
 1992년 ~ 1994년 오스틴 소재 MCC (Microelectronics & Computer Technology Corp.) 연구원

소시업 Member of Technical Staff

1994년 ~ 현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수

2005년 ~ 현재 한국통신학회 부호및정보이론연구회 위원장

관심분야 : MIMO 시공간 신호처리, CDMA 및 OFDM 모뎀, UWB 전송 시스템



**이원철**

1986년 서강대학교 전자공학과 학사  
 1988년 연세대학교 전자공학과 석사  
 1994년 New York, Polytechnic University, Electronic Eng. 박사  
 1994년 ~ 1995년 Polytechnic Univ. Post-doctoral Fellow

1995년 ~ 현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수

2002년 ~ 현재 한국통신학회 이동통신연구회 전문위원

2002년 ~ 현재 한국전자공학회 통신연구회 협동 전문위원

2002년 ~ 현재 HY-ITRC 센터 연구원

관심분야 : Ultra WideBand Communication, Smart Antenna, MIMO system, Wireless Position Location, and Software Defined Radio