

# MIMO 환경에서 OSUC 알고리즘을 적용한 V-BLAST 시스템의 성능분석

한덕수\*, 이지훈\*\*, 조성준\*\*, 오창현\*\*\*

## 요약

최근 대용량 고속데이터 전송을 위해 여러 개의 송·수신 안테나를 이용하여 전송용량을 증가시킬 수 있는 MIMO(Multi-Input Multi-Output) 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 먼저 MIMO 채널을 모델링하고, MIMO 채널에서 OSUC 복호알고리즘을 이용한 ZF수신기와 MMSE 수신기를 각각 적용하여 V-BLAST 시스템의 성능을 비교분석하였다.

## Performance Analysis of V-BLAST System using OSUC Algorithm over MIMO

Deog-Su Han\*, Ji-Hoon Lee\*\*, Sung-Joon Cho\*\*, Chang-Heon Oh\*\*\*

## Abstract

MIMO(Multi-Input Multi-Output) system, which can increase the channel capacity by using multiple transmit and/or receive antennas, has been intensively studied for higher data rates and better quality in wireless communications. This paper treats the MIMO channel modeling and analyze the performance of V-BLAST systems with ZF receiver and MMSE receiver, using OSUC algorithm respectively, over MIMO channel.

Key words : MIMO 환경, OSUC 알고리즘, V-BLAST

## 1. 서론

최근 무선통신을 이용하여 음성 서비스 이외에 동영상, 인터넷 서비스와 같은 보다 큰 전송률을 요구하는 다양한 서비스 요구가 급속도로 높아지고 있다. 현재 서비스 되고 있는 cdma2000 EV-DO 또는 곧 상용서비스가 제공될 cdma2000 EV-DV 및 W-CDMA 기반의 3세대 이동통신 시스템에서도 이러한 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있지만, 유선에 비하여 물리계층 전송용량이 제한적이므로 저렴한 서비스 요금으로 많은 이용자를 지원하기 힘들다. 이에 따라 3세대 이동통신이 완전히 시장을 정착하기도 전에 WWRF(Wireless World Research Forum)와 ITU 같은 다양한 연구 그룹에서는 beyond 3G, 즉, 4세대 이동통신 관련 프로젝트를 조직하고 있고 모든 통신관련 기업 및 연구소에서 활발한 연구를 진행하고 있다[1],[2].

이와 같이 점차 증가하는 다양한 사용자의 고속 전송률 서비스를 낮은 가격으로 많은 사용자에게 제공하

기 위해서는 무엇보다도 제한된 통신 자원을 이용하여 보다 많은 데이터를 전송할 수 있는 물리계층 요소 기술개발이 중요하다. 일반적으로 고속 데이터 전송을 하기 위해서는 단위 시간당 전송할 수 있는 데이터 수를 증가시켜야 하기 때문에 큰 전송 대역폭을 필요로 한다. 그러나 이와 같은 대역폭의 증가는 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하지 못하는 문제점이 있다. 그러므로 전송 대역폭의 변화 없이 무선채널을 통해 고속으로 데이터를 전송할 수 있는 시스템의 필요성이 대두되었다. 현재 고려되고 있는 다양한 전송효율 향상 기술 중에서 송/수신단 모두에 다수의 안테나를 사용하는 MIMO(Multi-Input Multi-Output) 기술은 추가적인 주파수 할당이나 전력증가 없이도 통신 용량 및 송수신 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 방법으로서 현재 가장 큰 주목을 받고 있다[2].

MIMO 시스템에 적용되는 기술들은 크게 다이버시티 계열과 멀티플렉싱 계열로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 멀티플렉싱 계열의 대표적인 시스템인 V-BLAST

\* 제일저자(First Author) : 한덕수

접수일 : 2004년 10월 21일, 완료일 : 2004년 11월 16일

\* 한국항공대학교 대학원 정보통신공학과 박사과정

choh@kut.ac.kr

※ 본 연구는 과학기술부한국과학재단 지정 한국항공대학교 부설 인터넷정보검색연구센터의 지원에 의함.

(Vertical Bell-Lab Layered Space-Time)의 성능을 MIMO 환경에서 분석해 본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 MIMO 채널을 모델링 하고, 3장에서 V-BLAST의 기본 원리와 시스템 구조를 분석한다. 4장에서 시뮬레이션을 통해 성능을 확인하고, 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. MIMO 채널

### 2.1 MIMO 채널

그림 1에  $N$ 개의 송신 안테나와  $M$ 개의 수신 안테나를 사용하는 전형적인 MIMO 시스템의 구조를 나타낸다.

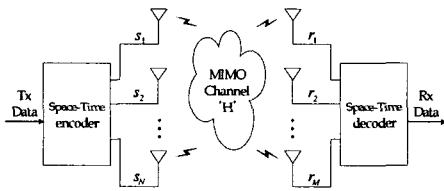


그림 1. MIMO를 이용한 송수신 시스템의 개념도

그림 1과 같이 송/수신 단에서 안테나의 수를 동시에 늘리게 되면 송신기나 수신기에서만 다수의 안테나를 사용하게 되는 경우와 달리 안테나 수에 비례하여 이론적인 채널 전송 용량이 증가하므로 주파수 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있다.

그림1에서처럼, 송신단에서 전송하는 신호를  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ 와 같이 벡터형태로 표현할 수 있다. 여기서  $x_n$ 은  $n$ 번째 안테나에서 전송하는 신호를 나타내고,  $[\cdot]^T$ 는 transpose 연산을 나타낸다. 수신신호도 같은 방법으로  $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ 와 같이 표현할 수 있다.

또한, 송신단과 수신단 사이의 협대역 MIMO 채널  $H \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1M} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{N1} & \alpha_{N2} & \dots & \alpha_{NM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식에서  $\alpha_{nm}$ 은 송신단의  $n$ 번째 안테나에서 수신단의  $m$ 번째 안테나로의 복소 전송 계수를 나타낸다. 또한,  $\alpha_{nm}$ 은 동일한 평균 전력을 갖는 복소 가우시안 분포로 가정한다. 따라서 송신신호벡터  $\mathbf{X}$ 와 수신신호벡터  $\mathbf{Y}$ 의 관계를 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\mathbf{Y} = H\mathbf{X} + N \quad (2)$$

단,  $N$ 은 수신 신호와 배열의 크기가 같고  $\sigma^2 = 1$ 인 AWGN을 의미한다.

### 2.2 MIMO 알고리즘

MIMO 시스템에 적용되는 기술들은 앞서 언급한 바와 같이 크게 두개의 카테고리로 분류된다. 현재까지의 MIMO 관련 연구 동향을 살펴보면 다양한 채널 환경 및 다중접속 환경에서의 MIMO 통신 용량 계산 등과 관련된 정보 이론 측면 연구, MIMO 시스템의 무선 채널 측정 및 모형 도출 연구, 그리고 전송 신뢰도 향상 및 전송률 향상을 위한 시공간신호 처리 기술 연구 등 다양한 관점에서 활발한 연구가 진행되고 있다. MIMO 기술은 다양한 채널 경로를 통과한 심볼 들을 이용하여 전송 신뢰도를 높이는 공간 다이버시티(spatial diversity) 방식과 다수의 송신 안테나를 이용하여 다수의 데이터 심볼을 동시에 송신하여 전송률을 향상시키는 공간 멀티플렉싱(spatial multiplexing) 방식이 있다. 또한 이러한 두 가지 방식을 적절히 결합하여 각각의 장점을 적절히 얻고자 하는 방식에 대한 연구도 최근 많이 연구 되고 있는 분야이다[3],[4].

#### 2.2.1 다이버시티 계열

다이버시티 방식은 안테나마다 다른 레일리 페이딩을 겪은 신호를 다수의 송/수신 안테나에 의해 결합함으로써 경로간의 채널 곱(deep)을 서로 보완시켜서 수신 성능을 높이는 기능이다. 그러므로 이의 성능은 독립된 채널의 개수에 의해 그 성능이 결정되고 이를 다이버시티 이득(diversity gain)이라 표현한다. 다이버시티 기술은 다이버시티 이득을 송신단에서 얻느냐 수신단에서 얻느냐에 따라 다시 송신 다이버시티와 수신 다이버시티로 구분된다. 시공간 블록 부호(Space-Time Block Code : STBC) 계열과 다이버시티 이득과 부호화 이득을 동시에 이용하는 시공간 트렐리스 부호(Space-Time Trellis Code : STTC) 계열 방식이 있다. 일반적으로 비트 오류율 개선 성능과, 부호 생성 자유도는 STTC 부호 방식이 우수하지만 연산 복잡도는 STBC 부호가 간단하다. 다이버시티 이득은 송신 안테나 수와 수신 안테나 수의 곱에 해당되는 양을 얻을 수 있는데, 송신 안테나의 개수가  $N$ 이고 수신 안테나의 개수가  $M$ 개 있는 경우 최대  $MN$ 개의 독립된 페이딩 채널을 결합시킬 수 있으므로 최대 다이버시티 이득은  $MN$ 이다.

#### 2.2.2 멀티플렉싱 계열

멀티플렉싱 방식은 송/수신 안테나간의 가상의 부채널들을 만들어서 각각의 송신 안테나를 통해 서로 다른 데이터를 전송함으로써 전송 속도를 높이는 방식이다. 이 때 수신기에서는 송신기로부터 동시에 전송된 데이터 사이에 상호 간섭이 발생하게 된다. 수신기에서는 이 간섭을 적절한 신호처리 기법을 이용하여 제거한 후 수신한다.

여기에 사용되는 잡음 제거 방식은 ML(maximum likelihood) 수신기, ZF(Zero-Forcing) 수신기, MMSE 수신기, D-BLAST, V-BLAST 등이 있으며, 특히 송신단에서 채널 정보를 알 수 있는 경우에는 singular value decomposition(SVD) 방식 등을 사용할 수 있다. 멀티플렉싱 방식은 다이버시티 방식과는 달리 송신단 혹은 수신단 한쪽에서만 다중의 안테나를 사용하는 경우 그 이득을 충분히 얻을 수 없다. 멀티플렉싱 방식의 성능은 동시에 전송할 수 있는 독립적인 송신신호의 개수를 멀티플렉싱 이득(multiplexing gain)으로 표현되고 이는 송신단의 안테나 수와 수신단의 안테나 수의 최소값과 같다.

### 3. V-BLAST 시스템

BLAST(Bell-Lab Layered Space-Time)방식은 다이버시티 이득이 적은 공간 멀티플렉싱 방식의 단점을 극복하고 복호 성능을 향상시키기 위한 기법이다[5],[6]. Foschini에 의해 D-BLAST(Diagonal BLAST) 방식이 처음 고안되었고, 이 방식은 각 송신 안테나를 통해 전송되는 신호들을 매 심볼 구간마다 시간, 공간 상에서 대각 방향으로 편이시켜 반복적으로 송신함으로써 모든 송신 신호들이 높은 다이버시티를 얻도록 구현한 방식이다. 그러나 구현이 다소 복잡하고 복호 지연이 발생하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 각 송신 안테나로부터 전송된 신호들의 각 부채널을 수직적으로 구분하여 복원하는 V-BLAST(Vertical BLAST) 방식이 제안되었다[5]. V-BLAST 방식 역시 수신단의 안테나 개수가 송신단의 안테나 개수 이상일 경우에 동작한다는 전제 조건을 갖는다. V-BLAST 방식은 MIMO의 사용을 통해 멀티플렉싱 이득을 얻고자 한다는 점에서 ZF 수신기와 MMSE 수신기와 같은 계열이지만 ordered successive cancellation(OSUC)의 방법을 이용하여 보다 높은 다이버시티 이득을 얻을 수 있다는 면에서 한 단계 발전된 기법이라고 할 수 있다.

그림 2에 V-BLAST 시스템의 구조를 나타낸다.

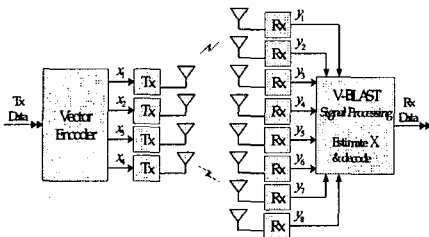


그림 2. V-BLAST 시스템 구조

송/수신단에서 각각 N, M개의 안테나를 사용하는 시스템(N≤M)을 고려할 때, N개의 서로 다른 송신 신호를 각 송신 안테나를 통해 전송한다.

V-BLAST 수신기의 복호기는 수신 신호들로부터 ZF 수신기나 MMSE 수신기 등을 통하여 송신 신호들을 분리해내고 이 중에서 신호 대 간섭 잡음비(SINR)가 가장 좋은 심볼 하나를 검출한다. 이렇게 검출된 심볼은 다시 재생(regeneration)되어 다른 부채널의 수신 신호들로부터 제거되는 간섭 제거 과정을 거치게 된다. 검출된 심볼들을 제거하고 새로이 얻어진 수신 신호들로부터 다시 ZF/MMSE 수신기를 통하여 남은 송신 신호들 중에서 SINR이 최대인 신호가 검출되고 또다시 재생된 후에 간섭 제거를 거치는 과정이 계속되어 마지막 송신 신호까지 검출한다. 이때 간섭 제거과정에서 오차전이(error propagation)가 없는 상황을 가정한다면 검출과정이 반복되면 될수록 유효한 간섭 신호의 개수가 줄어들기 때문에 검출 성능이 좋아지게 된다. 이러한 OSUC 알고리즘은 일반적으로 ZF 수신기이나 MMSE 수신기에 많이 적용하여 사용한다. 본 논문에서는 OSUC 알고리즘을 ZF 수신기와 MMSE 수신기에 각각 적용해보고, 시뮬레이션을 통해 성능을 비교 분석하였다. 논문에서 사용한 수신기의 기본 구조는 다음과 같다.

ZF 수신기

$$\hat{s} = (H^H H)^{-1} H^H Y \tag{3}$$

MMSE 수신기

$$\hat{s} = \left( \frac{1}{SNR} I_{M_n} + H^H H \right)^{-1} H^H \times Y \tag{4}$$

ML 수신기

$$\hat{s} = \text{argmin} | Y - Hx | \tag{5}$$

### 4. 시뮬레이션

시뮬레이션에서는 ZF-OSUC, MMSE-OSUC, ML 수신기를 각각 사용하는 2x2 MIMO 시스템을 모델링하였다. 각 안테나에서의 채널은 Rayleigh fading을 가정하였으며, 시뮬레이션에서 사용된 파라미터들은 표 1과 같다. 또한 시스템 동기화 및 채널 추정에는 완벽하다고 가정하였으므로 별도의 파일럿 신호와 프리앰블은 고려하지 않았다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

parameter	value
Modulation	BPSK, QPSK, QAM
Frame length	130 symbols
Fading	Rayleigh
Tx ant. × Rx ant.	2 × 2
correlation coeff. @ Rx	0.5
Detection algorithm	ZF-OSUC MMSE-OSUC ML

그림 3~5는 각각 BPSK, QPSK, QAM 변조에 따른 ML, ZF-OSUC, MMSE-OSUC 수신기의 BER(Bit Error Rate) 성능 곡선을 나타낸 그래프이다. 시뮬레이션 결과 MMSE-OSUC 수신기가 ZF-OSUC 수신기보다 전반적으로 성능이 우수하였다. 하지만 성좌도가 큰 변조기법을 사용할수록 그 성능 차이는 크게 줄어들어 64QAM를 사용하는 경우에는 비슷한 성능을 보임을 알 수 있었다.

### 5. 결론

본 논문에서는 MIMO 채널을 이론적으로 모델링하고, 이를 바탕으로 OSUC 알고리즘을 적용한 여러 가지 수신기에 따른 V-BLAST 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. V-BLAST 수신기의 복호기는 수신 신호들로부터 ZF 수신기나 MMSE 수신기 등을 통하여 송신 신호들을 분리해내고 이 중에서 신호 대 간섭 잡음비(SINR)가 가장 좋은 심볼 하나를 검출하여 반복과정을 통해 송신신호를 검출해낸다. 이러한 OSUC 알고리즘을 적용해 본 결과, ZF 수신기는 간단한 구조이지만 수신단에서 각 송신 안테나로부터 전송된 신호를 복호하는 과정에서 다른  $N-1$ 개의 송신 안테나로부터 전송된 신호들을 억제하기 위하여 수신단에서  $N-1$ 개의 자유도를 사용하기 때문에 수신단에서  $M-(N-1)$ 만큼의 다이버시티 이득이 생기므로 수신 성능이 떨어진다는 단점이 있다. 반면, MMSE 수신기는 잡음 신호의 분산을 고려하기 때문에 ZF 수신기에 비해 우수한 성능을 나타내지만 수신기를 통해 얻을 수 있는 다이버시티 이득은 ZF 수신기와 같음을 확인하였다. 향후 다이버시티 이득의 성능을 더욱 개선하고, 전송율을 향상시킬 수 있는 멀티플렉싱 기법의 알고리즘 연구가 필요하다.

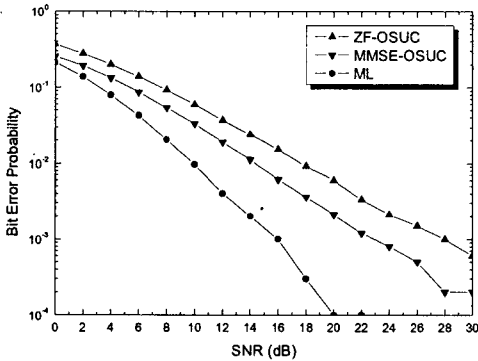


그림 3. 수신기에 따른 BER 성능 곡선 BPSK

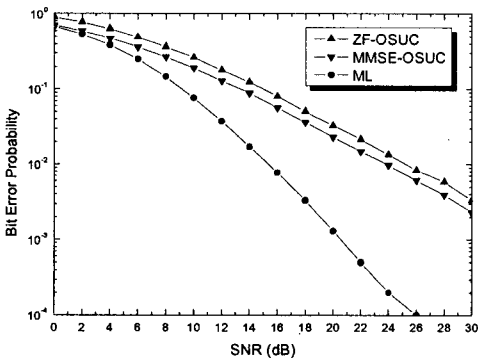


그림 4. 수신기에 따른 BER 성능 곡선 QPSK

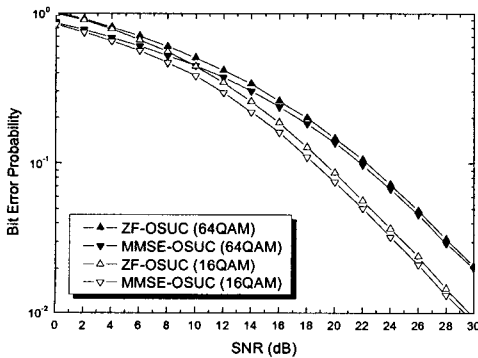


그림 5. 수신기에 따른 BER 성능 곡선 (16QAM, 64QAM)

### 참고 문헌

- [1] E. Dahlman and S. Parkvall, "The evolution of 3G WCDMA," *Telecommunications Review*, vol. 13, no. 6, pp. 824-833, Dec. 2003.
- [2] 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.
- [3] M. Jankiraman, *Space-time codes and MIMO systems*, Artech House, 2004.
- [4] A. Paulraj, R. Nabar and D. Gore, *Introduction to space-time wireless communications*, Cambridge University Press, 2003.
- [5] 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.
- [6] E. Biglieri, G. Taricco, and A. Tulino, "Decoding space-time codes with BLAST architectures," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 50, Oct. 2002.



**한 덕수**

1987년 2월 : 한국항공대학교  
항공통신공학과 졸업 (공학사)  
1989년 2월 : 한국항공대학교 대학원  
전자공학과 졸업 (공학석사)

2003년 3월 - 현재 : 한국항공대학교 대학원  
정보통신공학과 박사과정 재학 중  
1988년11월 - 1993년 12월 : (주)동양정밀공업  
주임연구원  
1994년 1월 - 현재 : 삼성전자(주) 수석연구원  
관심분야 : 이동통신, CDMA



**오 창현**

1988년 2월 : 한국항공대학교  
항공통신정보공학과 (공학사)  
1990년 2월 : 한국항공대학교 대학원  
항공통신정보공학과 (공학석사)  
1996년 2월 : 한국항공대학교 대학원  
항공전자공학과 (공학박사)

1990년 2월 - 1993년 9월 : 한진전자(주)  
기술연구소 근무  
1993년 10월 - 1999년 2월 : 삼성전자(주)  
CDMA 개발팀 근무  
1993년 3월 - 현재 : 한국기술교육대학교  
정보기술공학부 조교수  
관심분야 : 이동통신, 무선통신, SDR



**이지훈**

2003년 2월 : 한국항공대학교  
항공통신정보공학과 졸업 (공학사)

2003년 3월 - 현재 : 한국항공대학교 대학원  
정보통신공학과 석사과정 재학 중  
관심분야 : 이동통신, MIMO, 시공간부호화



**조성준**

1969년 2월 : 한국항공대학교  
항공통신공학과 졸업 (공학사)  
1975년 2월 : 한양대학교 대학원 졸업  
(공학석사)  
1981년 2월 : 오사카대학 대학원  
통신공학과 졸업 (공학박사)

1972년 8월~현재 : 한국항공대학교  
항공전자·정보통신공학부 교수  
관심분야 : 무선통신, 이동통신, 환경전자공학