

페이딩 채널에서 V-BLAST 시스템의 성능 분석

정희원 박기식*

Performance Analysis of V-BLAST System in Fading Channel

Ki Sik Park* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 레일리(Rayleigh) 페이딩 채널 환경에서 MMSE-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 V-BLAST 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 변조 기법은 BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM으로 각각 나누어 시뮬레이션을 수행하였고, 프레임의 길이는 130 심볼로 설정하였다. 성능 해석 결과, MMSE-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 경우가 기존 ZF-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 경우보다 전반적으로 성능은 우수하지만, 성좌도가 큰 변조 기법을 사용할수록 그 성능 차이는 크게 줄어들어 64QAM을 사용하는 경우에는 거의 비슷한 성능이 얻어짐을 알 수 있었다.

Key Words : Rayleigh, ZF-OSUC, MMSE-OSUC, Algorithm, V-BLAST

ABSTRACT

In this paper, we simulate and evaluate the performance of V-BLAST systems adopting MMSE-OSUC receiver algorithm under Rayleigh fading channel environment. In the simulation, BPSK, QPSK, 16QAM, and 64QAM modulation is used with frame length of 130 symbols. From the performance analysis results, it is found that MMSE-OSUC receiver algorithm generally outperform conventional ZF-OSUC receiver algorithm in performance but the performance difference between the two algorithms is reduced as modulation scheme with larger constellation point is used.

I. 서 론

최근 한정된 주파수 자원을 유효하게 이용하는 기술로서 MIMO(Multiple-Input Multiple- Output) 다중 전송기술이 주목받고 있다. MIMO 전송은 복수의 송수신 안테나를 사용하여 동일한 주파수로 동시에 복수의 신호를 공간적으로 다중 전송하는 방식이며, 산란 환경에서 이론적으로는 안테나의 수에 거의 비례하는 통신 용량이 얻어진다^[1,2]. MIMO 전송에서의 응용으로서 공간적으로 신호를 다중화하는 공간분할다중(SDM : Spatial Division Multiplexing) 방식이 거론된다. 공간다중방식으로는 양쪽 송수신기에서 통신로 정보를 이용하여 지향성 제어를 행하는 고유 빔형

MIMO 시스템이 있지만, 피드백의 오버 헤드가 크고 페이딩 변동이 심한 환경에서는 실현하기가 어렵다. 이 때문에 일반적인 SDM 방식에서는 송신측에서 MIMO 채널이 미지임을 전제로 하여 각 송신 안테나에 균일한 정보와 송신 전력을 할당하고 있다. 수신측에서는 각 송신 신호(substream)를 분리검출하기 위해 ZF(Zero Forcing)와 MMSE (Minimum Mean Square Error)에 의한 공간 필터링 등이 행해진다. SDM 방식 중에서도 V-BLAST(Vertical-Bell Lab Layered Space Time)는 낮은 복잡도로 신호를 검출할 수 있고, MIMO 채널에서 고속 전송을 실현할 수 있는 어플리케이션으로 주목받고 있다^[3-6]. V-BLAST 방식은 MIMO의 사용을 통해 다중화 이득을

※ 본 연구는 2008년도 인하공업전문대학 교내 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

* 인하공업전문대학 정보통신과 (gspark@inhac.ac.kr)

논문번호: 10006-0126, 제출일자: 2010년 1월 26일

얻고자 한다는 점에서 ZF 및 MMSE 수신기와 같은 계열이지만, OSUC(Ordered Successive Cancellation) 방법을 이용하여 보다 높은 다이버시티 이득을 얻을 수 있다는 면에서 한 단계 발전된 기법이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 MIMO 시스템의 채널을 이론적으로 모델링하고, 이를 기반으로 최근 V-BLAST 시스템에서 급부상되고 있는 MMSE-OSUC 수신기 알고리즘을 분석하고자 한다. 그리고 MMSE-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 V-BLAST 시스템의 성능을 레일리 페이딩 채널 환경에서 시뮬레이션을 통해 평가하고자 한다.

II. MIMO 시스템 채널 모델

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

그림 1에서처럼 송신단에서 전송하는 신호를 벡터 형태로 표현하면,

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $s_N(t)$ 는 N 번째 안테나에서 t시간 동안 전송하는 신호를 나타내고, $(\cdot)^T$ 는 transpose 연산을 나타낸다. 수신 신호도 같은 방법으로 표현하면,

$$\mathbf{r}(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_M(t)]^T \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 또한, 송신단과 수신단 사이의 협대역 MIMO 채널은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1M} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{N1} & \alpha_{N2} & \dots & \alpha_{NM} \end{bmatrix} \quad (3)$$

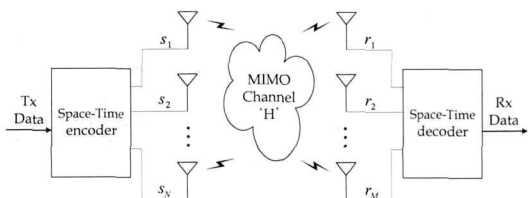


그림 1. MIMO 시스템의 송·수신 블록도

식 (3)에서 α_{nm} 은 송신단의 n번째 안테나에서 수신단의 m번째 안테나로의 복소 전송 계수를 나타낸다. 또한, α_{nm} 은 동일한 평균 전력을 갖는 복소 가우시안 분포로 가정한다. 따라서 송신 신호 $s(t)$ 와 수신 신호 $r(t)$ 의 관계를 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (4)$$

단, $\mathbf{n}(t)$ 는 수신 신호와 배열의 크기가 같고 $\sigma^2 = 1$ 인 AWGN을 의미한다.

III. V-BLAST 시스템 구조 및 수신기 알고리즘

3.1 V-BLAST 시스템 구조

그림 2에 V-BLAST 시스템의 송수신기 구성을 나타낸다^[6].

V-BLAST 시스템은 N_t 개의 송신 안테나와 N_r 개의 수신 안테나로 구성된다. 송신기에서 송신 데이터는 직렬변환되고 N_t 개의 서브스트림(substream)으로 분할된다. 그리고 각각의 서브스트림에서 송신 심볼 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{N_t}]^T$ 가 생성된다. i 번째의 송신 안테나에는 송신 전력 P_i 가 할당되고, 각 안테나에서 동일한 주파수로 송신된다. 수신기에서는 N_r 개의 수신 안테나에 의해 수신된 심볼로부터 송신 신호를 추정한다. 여기서 수신 신호 벡터 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_{N_r}]$ 는

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (5)$$

로 표현된다. 여기서 \mathbf{H} 와 \mathbf{n} 은 각각 통신로 행렬과 잡음 벡터를 나타낸다. 또한 \mathbf{P} 는 송신 전력을 대각 성분으로 갖는 대각 행렬이다. 송신 신호의 추정에는 ZF와 MMSE 등의 공간 필터링을 이용한다. 각 안테나로 할당된 전력 P_i 는 수신기에서 계산된 것이 피드백(feedback)된다. 수신기 계산에서는 총 송신 전력이 일정하다는 결국,

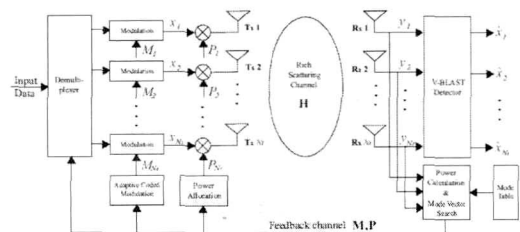


그림 2. V-BLAST 시스템의 송·수신기 구성

$$\sum_{i=1}^N E_i = \text{const} \quad (6)$$

라는 조건을 토대로 BER(Bit Error Rate)를 최소화하는 최적화가 행해진다. 구체적으로 평균한 BER의 근사값은

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\prod_{j=1}^i (1 + \alpha_{N-j+1}) \right) f\left(\frac{P_i}{\sigma_n^2 \|v_k\|^2}\right) \quad (7)$$

로 표현된다. 여기서 E_i 는 i 번째 검출시의 BER의 근사값을 나타내며, $\alpha_{\#}$ 는 j 부터 $i-1$ 번째의 검출 단계에서 에러 검출이 생긴 경우의 i 번째 검출시의 에러율을 나타낸다. 그리고 v_i 는 i 번째 검출 스트림 벡터이며, $f(\cdot)$ 는 수신기에서 SNR을 변수로 하는 BER 함수이다⁷⁾.

3.2 V-BLAST 시스템 수신기 알고리즘

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 제거 과정에서 오차 전이(error propagation)가 없는 상황을 가정한다면 검출 과정이 반복되면 될수록 유효한 간섭 신호의 개수가 줄어들기 때문에 검출 성능이 좋아지게 된다. 이러한 OSUC(Ordered Successive Cancellation) 알고리즘은 일반적으로 ZF 수신기나 MMSE 수신기에 많이 적용하여 사용한다. 본 논문에서는 OSUC 알고리즘을 ZF 수신기와 MMSE 수신기에 각각 적용해보고, 시뮬레이션을 통해 성능을 비교 분석하였다. ZF-OSUC 수신기와 MMSE-OSUC 수신기의 알고리즘은 참고 문헌 [8]를 참고하였다.

IV. 성능 평가

본 논문에서는 ZF-OSUC, MMSE-OSUC, ML(Maximum

Likelihood) 수신기를 각각 사용하는 2x2 MIMO 시스템을 기준으로 모델링하였다. 우선 변조 기법은 BPSK, QPSK, M-ary QAM으로 각각 나누어 시뮬레이션을 수행하였고, 프레임의 길이는 130 심볼로 설정하였다. 또한 전송 채널은 Rayleigh fading 채널 환경으로 모델링하였으며, 수신단에서의 correlation 계수는 0.5로 가정하였다.

그림 3~5는 각각 BPSK, QPSK, M-ary QAM 변조에 따른 ML, ZF-OSUC, MMSE-OSUC 수신기의 BER 성능 곡선을 나타낸 그래프이다. OSUC 알고리즘을 적용해 본 결과, ZF 수신기는 간단한 구조이지만 수신 단에서 각 송신 안테나로부터 전송된 신호를 복호하는 과정에서 다른 N-1 개의 송신 안테나로부터 전송된 신호들을 억제하기 위해 수신기에서 N-1개의 자유도를 사용하기 때문에, 수신 단에서 M-(N-1)만큼의 다이버시티 이득이 생기므로 수신 성능이 떨어진

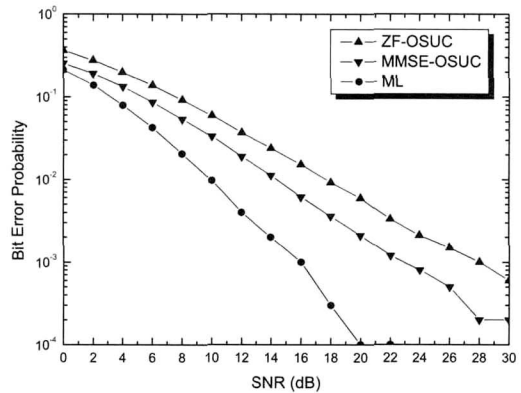


그림 3. BPSK 변조방식을 적용한 V-BLAST 시스템의 수신 알고리즘에 따른 BER 성능

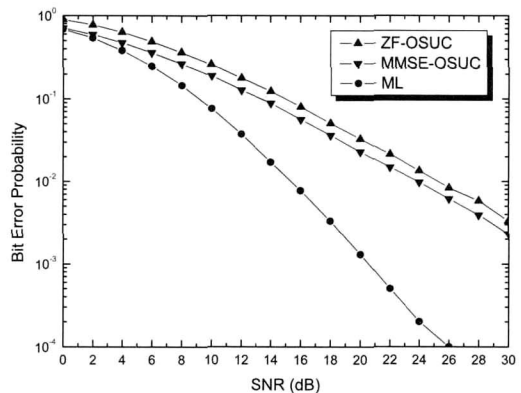


그림 4. QPSK 변조방식을 적용한 V-BLAST 시스템의 수신 알고리즘에 따른 BER 성능

다는 단점이 있다. 반면, MMSE-OSUC 수신기는 잡음 신호의 분산을 고려하기 때문에 ZF-OSUC 수신기에 비해 우수한 성능을 나타내지만 수신기를 통해 얻을 수 있는 다이버시티 이득은 ZF-OSUC 수신기와 같음을 알 수 있다.

따라서 MMSE-OSUC 수신기가 ZF-OSUC 수신기보다 전반적으로 성능이 우수하지만, 성좌도가 큰 변조기법을 사용할수록 그 성능 차이는 크게 줄어들어 64QAM를 사용하는 경우에는 비슷한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 MIMO 시스템의 채널을 이론적으로 모델링하고, 이를 기반으로 최근 V-BLAST 시스템에서 급부상되고 있는 MMSE-OSUC 수신기 알고리즘과 DC 적용한 AST 그리고 MMSE-OSUC 수신기 알고리즘과 DC 적용한 V-BLAST 시스템의 성능을 레일리 페이딩 채널 환경에서 시뮬레이션을 통해 평가하였다.

MMSE-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 경우가 기존 ZF-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 경우보다 전반적으로 성능은 우수하지만, 성좌도가 큰 변조기법을 사용할수록 그 성능 차이는 크게 줄어들어 64QAM를 사용하는 경우에는 거의 비슷한 성능이 얻어짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels", *Eur. Trans. Tele-commun.*, Vol. 10, No.6, pp.585-595, Nov. 1999.

[2] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Wireless Pers. Commun.*, Vol.6, pp.311-355, Mar. 1998.

[3] 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", *URSI ISSSE'98*, pp.295-300, Sept. 29-Oct. 2 1998.

[4] M. F. Demircol and M. A. Ingram, "Power-controlled capacity for interfering MIMO links", *In Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, Atrantc City, Nj, pp.915-919, Oct. 2001.

[5] K. J. Hwang and K. B. Lee, "Transmit power

allocation with rate and power feedback," *In Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, Vancouver, BC, Canada, pp.2158-2162, Sept 2002.

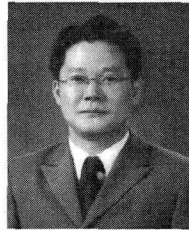
[6] S. H. Nam, O. S. Shin and K. B. Lee, "Transmit Power Allocation for a Modified V-BLAST System," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.51, No. 11, pp.1783-1787, Nov. 2003.

[7] S. T. Chung and A. J. Goldsmith, "Degree of freedom in adaptive modulation," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.49, pp.1561-1567, Sept. 2001.

[8] M. Jankiraman, *Space Time Codes and MIMO Systems*, Artech House, pp.144-160, 2004.

박 기 식 (Ki Sik Park)

정회원



1991년 2월 한국항공대학교 항공통신정보공학과 공학사
 1991년 3월~1993년 2월 일본 교토대학교 광통신연구실 연수
 1996년 8월 한국항공대학교 공학석사
 2000년 2월 한국항공대학교 공학박사

2001년 3월~현재 인하공업전문대학 정보통신과 부교수

<관심분야> 이동 통신, 무선 통신