
MIMO시스템에서 저 복잡도 선형 ML검출 기법

Christine Niyizamwiyitira* · 강철규* · 오창헌*

Low Complexity ML Detection Based on Linear Detectors in MIMO Systems

Christine Niyizamwiyitira* · Chul-gyu Kang* · Chang-heon Oh*

요 약

V-BLAST의 신호 복원을 위한 기법으로는 MMSE, ZF, ML등이 있으며, 이중 ML 기법이 최적의 성능을 나타낸다. 그러나 ML 기법은 송신안테나 수와 변조차수에 따라 연산복잡도가 지수적으로 증가하는 문제점이 있다. 본 논문에서는 V-BLAST의 신호 복원을 위해 보다 낮은 복잡도를 갖는 저 복잡도 선형 ML검출 기법을 제안하고 이 시스템을 기존의 검출 기법들과 BER과 연산량 측면에서 비교, 분석하였다. 분석결과 제안한 검출기법의 BER 성능은 ZF과 MMSE 검출기법보다 우수하였고 ML 검출기법과는 유사하였다. 그러나 연산량 측면에서는 제안한 시스템의 연산량이 ML 검출기법의 연산량보다 약 50%정도 적었다. 이 결과들을 통해 본 논문에서 제안한 저 복잡도 선형 ML 검출기법이 기존의 검출 기법보다 우수함을 알 수 있다.

ABSTRACT

MMSE, ZF and ML are the decoding mechanisms for V-BLAST system, and ML shows the best performance decoding the original signal among them. However, it has a problem that the computation complexity is increased exponentially according to the number of transmit antennas and transmit degrees. In this paper, we propose a low complexity linear ML detection algorithm having low computation complexity, then analyze the system performance in BER and computation complexity comparing with other algorithms. In the simulation, the BER performance of the proposed algorithm is superior than ZF and MMSE detection algorithms, and similar to ML detection algorithm. However, its computation complexity was 50% less than ML algorithm. From the results, we confirm that the proposed algorithm is superior than other ML detection algorithms.

키워드

V-BLAST, ML, ZF, MMSE, 저 복잡도 ML

Key word

V-BLAST, ML, Zero Forcing, MMSE, Low complexity ML

I. 서 론

가정 내에서 HDTV 등의 멀티미디어 통신에 대한 수요가 증가함에 따라 이를 수용할 수 있는 초고속 무선 시스템에 대한 요구가 증가하고 있다. 이와 같이 점차 증가하는 다양한 사용자의 고속 전송률 서비스를 낮은 가격으로 많은 사용자에게 제공하기 위해서는 무엇보다도 제한된 통신 자원을 이용하여 보다 많은 데이터를 전송할 수 있는 기술이 중요하다[1],[2]. 현재 고려되고 있는 다양한 전송효율 향상 기술 중 송수신단 모두에 다수의 안테나를 사용하는 다중 안테나 기술(MIMO: multiple-input multiple-output)은 추가적인 주파수 할당이나 전력 증가 없이도 통신 용량 및 송수신 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 방법으로 현재 가장 큰 주목을 받고 있다.

MIMO 기술 중 공간 멀티플렉싱 기법은 다중 안테나 환경에서 제공되는 독립적인 부 채널들에 서로 다른 신호를 전송하여 전송률을 높인다. 따라서 공간 다중화 방식의 이점을 충분히 얻기 위해서는 다이버시티 방식과는 달리 송수신단에서 모두 생성하고자 하는 부 채널의 개수만큼 여러 개의 안테나를 사용하여야 한다.

V-BLAST(Vertical - Bell laboratory layered space time)와 같은 공간다중화 MIMO 시스템의 수신단 검출기법은 선형 기법인 ZF(zero forcing), MMSE(minimum mean square error) 기법과 비선형 기법인 OSIC기법, 최적의 수신기법이라 할 수 있는 ML(maximum linklihood) 기법과 sphere decoding 기법이 있다. 또한 sphere decoding 기법의 변형 알고리즘으로 ML 방식을 기반으로 한 QRD-M 기법이 있다. 이 외에 준 최적 ML 기법인 ML-DFE 기법 등이 있다.

선형 기법은 각 수신 안테나에서 특정 신호만을 검출하고 다른 신호들은 간섭 신호로 간주하여 ZF 또는 MMSE 기법으로 nulling 또는 간섭으로 작용하는 신호의 영향을 최소화시키는 기법이다. 비선형 기법에는 검출 순서에 따라 순차적으로 검출된 신호를 제거하여 간섭신호의 영향을 줄이는 OSIC(orderd successive interference cancelation)기법이 있다. ML 기법은 최적의 송신신호 벡터 검출을 위해 가능한 조합의 송신신호 벡터 각각에 대한 ML 매트릭을 계산하여 가장 작은 ML 매트릭을 갖는 송신신호 벡터를 찾는 기법으로 최적의 성능을 보인다.

그러나 일반적으로 기존 ML 기법은 송신안테나의 수와 변조차수에 따라 연산복잡도가 지수적으로 증가하게 된다[3]-[8]. 본 논문에서는 최적의 성능을 갖지만 연산 복잡도가 송신 안테나의 수에 따라 지수적으로 증가하는 ML 기법에 대해 성능은 유사하나 연산량은 감소하는 방법을 제안한다. 연산량을 감소시키는 방법으로 선형 검출기법과 선형 검출기법으로 검출한 신호의 신뢰성을 판단하는 신뢰성판단 기법을 사용한다.

II. MIMO 시스템

2.1 MIMO 시스템의 채널 용량

그림 1은 N개의 송신 안테나와 M개의 수신 안테나를 사용하는 다중 안테나 시스템의 구조를 나타낸다.

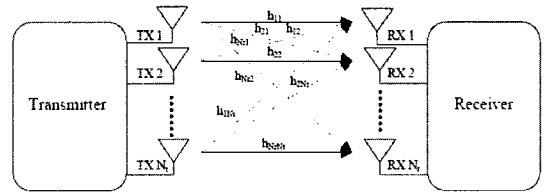


그림 1. 다중 안테나 시스템의 구조
Fig. 1 The structure of the multiple antenna system

송수신 안테나 사이의 채널 H 가 $M_R \times M_T$ 형태를 가질 때, 각 수신 안테나의 수신 신호는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$r = Hs + n. \tag{1}$$

여기서 $r = [r_0, r_1, \dots, r_{M_R-1}]^T$ 는 $M_R \times 1$ 수신신호 벡터이고, $s = [s_0, s_1, \dots, s_{M_T-1}]^T$ 는 $M_T \times 1$ 송신신호 벡터, $n = [n_0, n_1, \dots, n_{M_R-1}]^T$ 는 $M_R \times 1$ 잡음 벡터이다. 송신단에서 채널 정보를 알 수 없으므로 각 송신 안테나는 모두 동일한 전력으로 신호를 송신하는 것이 최적이다. 각 송신 안테나 전송 신호가 동일한 평균 전력을 갖고 상호 독립일 경우 다중 안테나 시스템의 채널 용량은 식 (2)와 같이 표현 가능하다.

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_{M_r} + \frac{\rho}{M_T} HH^H \right) \right] \text{bps/Hz.} \quad (2)$$

여기서 식 (2)는 식(3)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$C = \sum_{i=1}^{\min(N, M)} \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N} \lambda_i \right) \text{bps/Hz.} \quad (3)$$

식 (3)의 채널 용량은 서로 독립적인 레일리 페이딩 채널일 경우 안테나 수에 비례하여 선형적으로 증가한다.

그림 2는 $M_R = M_T$ 인 경우 평균 채널 용량의 변화를 나타낸다. 동일한 신호 대 잡음비(SNR; signal to noise ratio) 값에서 채널 용량이 안테나 수에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

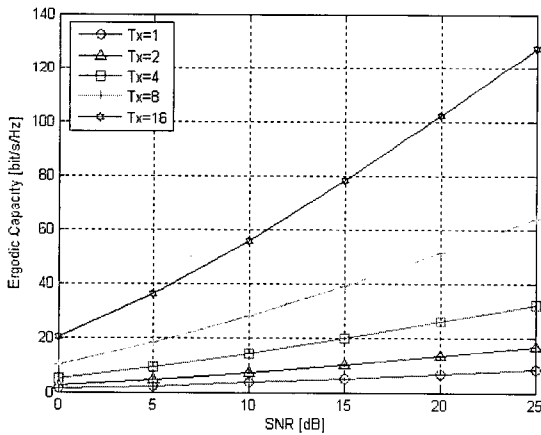


그림 2. 다중 안테나 시스템의 채널 용량
Fig. 2 The channel capacity of the multiple antenna system

2.2 BLAST 시스템

MIMO 채널 환경에서의 멀티플렉싱 기법은 여러 개의 송신 안테나를 사용하여 전송률을 향상시킨다. 따라서 단일 송수신 안테나를 적용하는 경우와 비교할 때, 같은 전송률을 얻기 위하여 낮은 차수의 변조기법을 사용할 수 있다는 장점을 가진다. 반면, 송신 단의 안테나 수가 증가할수록 수신 단 역시 안테나 수가 증가되어야 한다는 단점이 있다[5].

공간 멀티플렉싱 기법에 속하는 BLAST는 D-BLAST (diagonal VBLAST)와 V-BLAST (vertical BLAST)의 두 형태로 분류된다. 먼저 제안된 구조는 D-BLAST이다. 이 방식은 각 송신 안테나를 통해 전송되는 신호들을 때 심볼 구간마다 시간, 공간상에서 대각 방향으로 편이 시켜 반복적으로 송신함으로써 모든 송신 신호들이 높은 다이버시티를 얻도록 구현한 방식이다. 그러나 실제 구현이 어렵고 복잡도가 큰 단점이 있다. 이를 보다 단순화하기 위한 방안으로 각 부 채널을 수직적으로 구분하여 복원하는 V-BLAST가 제안되었다. V-BLAST 방식 역시 수신단의 안테나의 개수가 송신단의 안테나 개수 이상일 경우에 동작한다는 전제 조건을 가지고 있다. 그림 3은 V-BLAST 시스템의 송신 단 구조를 나타낸다.

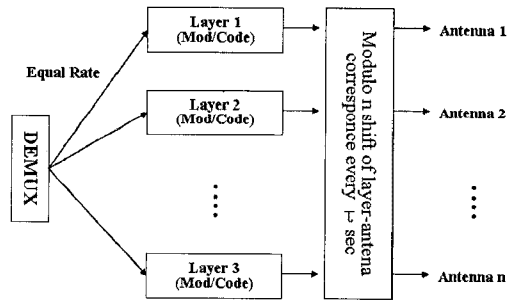


그림 3. V-BLAST의 송신단 구조
Fig. 3 The transmitter structure of V-BLAST

V-BLAST 시스템은 순차 입력되는 전송 데이터를 송신 안테나 개수만큼 병렬 화 시켜 변조 및 코딩을 수행한다. 따라서 데이터가 입력됨에 따라 송신 안테나 개수만큼의 비트 열, 즉 레이어가 형성된다. 다중 안테나로 수신된 레이어 신호들은 서로에게 간섭으로 작용하여 시스템 성능의 열화를 유발한다. 따라서 수신 단은 nulling과 canceling을 수행하여 다른 레이어에 전송된 심볼에 의한 간섭을 제거한다. V-BLAST의 디코딩 알고리즘에는 ZF, MMSE, ML 방식이 있다.

(1) Zero Forcing 알고리즘

ZF(zero forcing) 수신기는 다중 안테나 시스템에서 공간 멀티플렉싱을 구현하는 가장 간단한 형태의 선형 수신기이다. ZF 수신기는 수신 안테나의 개수가 송신

안테나의 개수와 같거나 많은 환경에서 동작한다. 송신단에서 N개의 안테나를 . 하고 수신단에서 M개의 안테나를 . 하는 통신 시스템을 가정하자 송신 단에서는 N개의 서로 다른 신호를 각각의 송신 안테나를 통해 전송하게 되고 수신단에서는 M개의 수신 안테나를 통해 채널을 겪은 전송 신호들이 서로 중첩된 형태로 수신된다. 이 때 송이번째 송신 안테나로부터 전송된 신호를 복원하고자 ZF경우에 수신기는 M개의 수신 신호들의 선형 조합으로 나머지 N-1개의 송신 안테나로부터 전송된 신호들을 제거하게 된다. ZF 수신기를 이하는 경우 수신기의 동작을 수식으로 정리해보면 다음과 같이 표현ZF 수신기[6]. 이 수식에서 H^+ 는 각 채널의 의사 역행렬을 나타내며, w_{k_i} 는 k_i 번째 nulling 벡터를 의미한다.

초기화 과정:

$$G_1 = H^+ \\ i = 1$$

반복과정:

$$k_j = \arg \min_j \|(G_i)_j\|^2 \\ w_{k_i} = (G_i)_{k_i} \\ y_{k_i} = w_{k_i}^T r_i \\ \hat{a}_{k_i} = Q(y_{k_i}) \\ r_{i+1} = r_i - \hat{a}_{k_i} (H)_{k_i} \\ G_{i+1} = H_{k_i}^+ \\ i = i + 1$$

(2) MMSE 알고리즘

MMSE(minimum mean squared error) 수신기는 ZF 수신기와 더불어 MIMO 시스템에서 멀티플렉싱을 구현하는 간단한 형태의 수신기 구조 중의 하나이다. 수신 신호에 복호 행렬을 곱하여 송신 신호를 복원하는 방식은 ZF 수신기와 유사하다. 그러나 ZF 수신기가 수신 신호로부터 n번째 송신 안테나로부터의 신호를 추정하는데 있어, M개의 수신 신호를 적절히 조합하여 다른 송신 안테나로부터의 간섭신호를 완전히 제거하는 방식으로 원하는 신호를 얻어내는 반면, MMSE 수신기의 경우는 수신단에서 더해지는 백색 가우시안 잡음의 분산 값을 고려

하여 추정하는 신호의 평균제곱오차가 최소가 되도록 수신 신호들을 조합하는 특징을 갖는다[6].

MMSE 수신기를 이용하는 경우 수신기의 동작을 수식으로 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기서 σ^2 은 평균이 0인 iid 복소 가우시안 잡음의 분산이다.

초기화 과정:

$$G_1 = H^+ \\ i = 1, \quad r_1 = r \\ G_1 = (H^H H + \sigma^2 I_{M_r})^{-1} H^H \\ k_1 = \arg \min_j \|(G_i)_j\|^2$$

반복과정:

$$w_{k_i} = (G_i)_{k_i} \\ y_{k_i} = w_{k_i}^T r_i \\ \hat{a}_{k_i} = Q(y_{k_i}) \\ r_{i+1} = r_i - \hat{a}_{k_i} (H)_{k_i} \\ G_{i+1} = (H_i^H H_i + \sigma^2 I_{M_r})^{-1} H_i^H \\ k_{i+1} = \arg \min_{j \in \{k_i, \dots, k_i\}} \|(G_{i+1})_j\|^2 \\ i = i + 1$$

(3) ML 알고리즘

ML(maximum likelihood) 수신기는 전송된 신호들을 성상도(constellation)의 모든 신호점들과 비교하여 확률적으로 가장 유사한 신호로 복원하는 방식이다. ML 수신기의 복원 과정은 수식 (4)와 같다.

$$\hat{s} = \arg \min_s \|r - Hs\|^2 \tag{4}$$

s는 모든 가능한 송신 심벌 벡터 집합이고, s에서 수신 심벌 벡터 r과 가장 유사한 심벌을 최종 심벌로 선택해야 하므로 s집합 내의 심벌 개수가 증가할수록 연산량도 증가된다.

III. 저 복잡도 선형 ML검출 기법

제한한 저 복잡도 선형 ML검출 시스템은 그림 4와 같다. 이 시스템에서 신호 검출 과정은 크게 3단계로 나눌 수 있다.

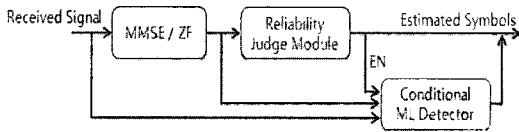


그림 4. 저 복잡도 선형 ML검출 시스템

Fig. 4 Low complexity linear ML detection system

Step 1. MMSE 혹은 ZF 알고리즘을 사용한 송신 심볼 추정

수신 신호들은 식(5), 식(6)과 같은 MMSE 혹은 ZF 알고리즘을 통해 송신 신호들을 추정한다.

$$\text{MMSE: } \hat{y} = (H^H H + \sigma^2 I_{M_r})^{-1} H^H r \quad (5)$$

$$\text{ZF: } \hat{y} = H^+ r \quad (6)$$

Step 2. 추정 심볼의 신뢰성 판단

두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 추정된 신호의 신뢰성을 평가한다. 신뢰성의 평가에는 식(7)이 사용된다.

$$\|r - H\hat{y}\|^2 < N_r \sigma^2 \quad (7)$$

만약 두 번째의 조건을 만족시키면 첫 번째 단계에서 추정된 신호는 송신 신호로 최종 결정된다. 그러나 만족시키지 못할 경우 세 번째 단계로 넘어간다.

Step 3. 조건부 ML검출

세 번째 단계에서는 수신 신호를 식(4)와 같은 ML 검출기를 사용하여 원래의 송신 신호를 복원하게 된다.

IV. 성능분석

이 장에서는 저 복잡도 선형 ML검출 기법을 실험한다. 실험을 위해 변조 기법은 BPSK 변조를 하였으며, 송신단과 수신단에서 사용하는 안테나 수는 2개로 제한한다. 실험을 위한 채널 환경은 레일리 페이딩 채널 환경이고 채널 코딩은 사용하지 않았으며, 수신단에서 채널에 대한 정보는 정확하게 알고 있다고 가정하였다. 이러한 실험 환경에서 제안한 저 복잡도 선형 ML 검출 기법의 BER(bit error rate) 성능을 ZF, MMSE, ML 검출 기법과 비교하여 분석한다.

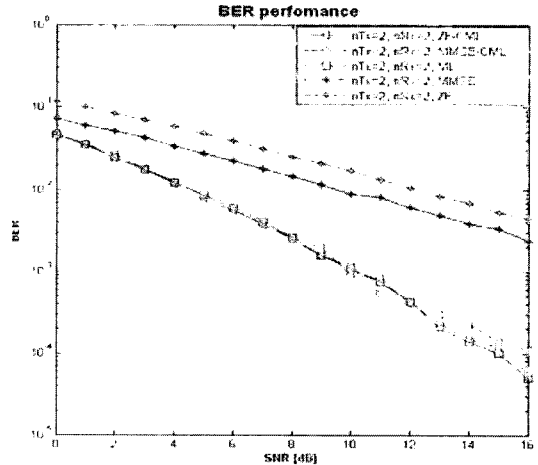


그림 5. 저 복잡도 선형 ML검출 시스템의 BER
Fig. 5 The BER performance of low complexity linear ML detection system

그림 5에서 보이는 것과 같이 MMSE_CML (MMSE+ conditional ML), ZF_ML(zero forcing+ conditional ML), ML의 BER 성능은 유사하다. 그러나 저 복잡도 선형 ML 검출기법(MMSE_CML, ZF_CML)을 사용한 시스템이 순수한 ZF 검출 기법을 사용한 경우보다 $BER = 10^{-2}$ 에서 약 8dB 우수한 성능을 보였으며, 순수 MMSE 검출 기법을 사용한 경우보다 $BER = 10^{-2}$ 에서 약 7dB 우수한 성능을 보였다.

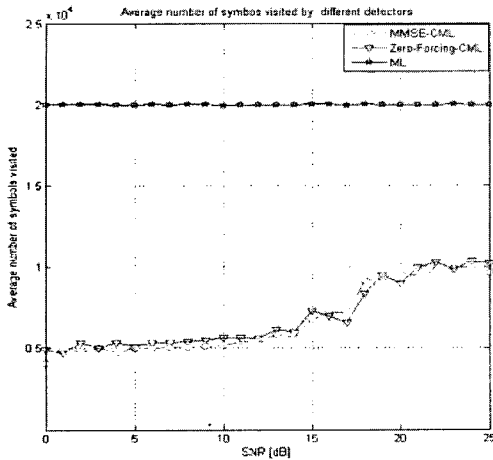


그림 6. 저 복잡도 선형 ML검출 시스템의 연산량
 Fig. 6 The computation complexity of the low complexity linear ML detection system

그림 6은 저 복잡도 선형 ML 검출 기법의 복잡도를 나타낸다. 그림 5에서 보았듯이 위의 세 검출 기법의 BER 성능은 모두 비슷하였다. 그러나 MMSE_CML과 ZF_CML 검출 기법의 복잡도는 ML 검출 기법의 복잡도보다 약 50%정도 낮은 것을 보인다. 이 결과들을 통해 볼 때, 제안한 검출 알고리즘은 ML과 유사한 BER 성능을 가지며, 그 연산량에서는 ML 검출 기법보다 우수함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 V-BLAST의 신호 복원을 위해 보다 낮은 복잡도를 갖는 저 복잡도 선형 ML검출 기법을 제안하고 기존의 검출 기법들과 BER과 연산량 측면에서 비교하여 분석하였다.

분석결과 제안한 검출기법의 BER 성능은 ZF과 MMSE 검출 기법보다 우수하였고 ML 검출 기법과는 유사하였다. 그러나 연산량 측면에서는 제안한 시스템의 연산량이 ML 검출 기법의 연산량 보다 약 50%정도 적었다.

이 결과들을 통해 본 논문에서 제안한 저 복잡도 선형 ML 검출기법이 기존의 검출기법보다 우수함을 보였다.

참고문헌

- [1] 이현규, *홈 네트워크이론*, 아이크로테크놀로지, 2003. 3.
- [2] 한국전파진흥협회, *디지털 홈 기술동향*, 2003. 8.
- [3] T.K.Y.Lo, "Maximum ration transmission," *IEEE Trans Comm.*, vol. 47, pp. 1458-1461, Oct. 1999.
- [4] J.K. Cavers, "Single-user and multiuser adaptive maximal ration transmission for Rayleigh channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, Nov. 2000.
- [5] J. Proakis, *Digital Communications. 3rd ed.* New York: McGraw-Hill, 1995.
- [6] 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 Communications and Networking Conference*, vol. 1, pp. 194-199, Mar. 2002.
- [7] 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.
- [8] 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*, Pisa, Italy, pp. 295-300, Sept.-Oct. 1998.

저자소개

Christine Niyizamwiyitira



2008년 11월: Computer Science in National University of Rwanda, (공학사)
 2009년 8월 ~ 현재: 한국기술교육대학교 대학원 전기전자 공학과(석사과정)

※ 관심분야: 무선통신, MIMO, OFDM, 모바일 커뮤니케이션



강철규(Chul-Gyu Kang)

2004년 2월 : 한국기술교육대학교
정보기술공학부(공학사)

2006년 2월 : 한국기술교육대학교
대학원 전기전자공학과
(공학석사)

2007년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기
전자공학과(박사과정)

※ 관심분야: HDR-WPAN, MIMO, Wireless Sensor N/W



오창헌(Chang-Heon Oh)

1988년 2월 : 한국항공대학교
항공통신공학과(공학사)

1990년 2월 : 한국항공대학교 대학원
항공통신정보공학과
(공학석사)

1996년 2월 : 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과
(공학박사)

1990년 2월~1993년 8월 : 한진전자(주) 기술연구소
전임연구원

1993년 10월~1999년 2월 : 삼성전자(주) CDMA 개발팀
선임연구원

2006년 8월~2007년 8월 : 방문교수 (University of
Wisconsin-Madison)

1999년 2월~현재 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부
부교수

※ 관심분야: 이동통신, 멀티미디어 무선통신, Wireless
Sensor N/W, CR