

MCS 레벨에 따른 적응 선형 수신기

이규희*, 김재권**, 윤상균**

An MCS Level Adaptive Linear Receiver

Kyuhee Lee*, Jaekwon Kim**, Sangkyun Yun**

요 약

본 논문은 다중 안테나를 사용하는 통신시스템의 수신부에서 사용하는 복잡도가 낮은 신호검출 기법을 제안한다. 선형검출기법에는 Zero-Forcing (ZF)기법과 minimum mean squared error (MMSE) 기법이 있고, ZF기법은 MMSE 기법에 비해 하드웨어 구현관점에서 더 간단하나 성능이 열등한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 통신시스템에서는 채널상황에 따라 modulation coding scheme (MCS) 을 적응으로 바꾸어 사용한다. 본 논문에서는 사용되는 MCS 레벨에 따라 ZF기법과 MMSE기법 중 더 적합한 방식을 선택할 필요가 있음을 보인다. 또한 하드웨어 구현을 통해 적응 선형수신기의 복잡도가 기존의 MMSE 기법의 복잡도와 유사함을 보인다.

ABSTRACT

In this paper, a novel low complexity linear receiver is proposed that is used at the receiver of MIMO systems. Zero-forcing (ZF) and minimum mean squared error (MMSE) receivers are common linear receivers. ZF receiver is simpler than MMSE receiver from the hardware implementation perspective, however, MMSE shows better performance than ZF. In general, MCS level changes according to channel condition. This paper shows the benefit of choosing between MMSE and ZF according to the selected MCS level. We implement the MCS-adaptive linear receiver as hardware, and show that its complexity is comparable to the conventional MMSE receiver.

Key Word : Linear Receiver, Signal Detection, MIMO, MCS Level, Spatial Demultiplexing

1. 서 론

미래의 이동통신 시스템에서는 고정 및 이동 환경에서 고속의 데이터 전송이 요구된다. 이러한 요구 조건을 충족 시키기 위하여, 다중 데이터 레이어 전송을 가능하게 하는 공간 다중화 (Spatial Multiplexing, SM) 방식을 사용하는 다중 안테나 송수신(Multiple Input Multiple

Output, MIMO) 시스템이 주목을 받고 있다 [1].

본 논문은 공간 다중화(Spatial Multiplexing, SM) 방식을 사용하는 다중 송수신(Multiple Input Multiple Output, MIMO) 시스템에서 계산전력을 감소하는 방법에 관한 것으로써, 성상

* 연세대학교 전산학과 박사과정(powerpc@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 원주캠퍼스 컴퓨터정보통신공학부 교수
(jaekwon@yonsei.ac.kr)

접수일자 : 2009.02.02

완료일자 : 2009.02.27

접수번호 : KIIECT2009-01-14

도의 크기에 따른 적응 신호검출기법을 제안한다.

공간 다중화 방식을 사용하는 MIMO 시스템은 다중 송신 안테나를 통해 각각 다른 정보를 전송하며, 수신단은 중첩된 신호로부터 송신된 데이터 레이어를 분리한다. 종래 분리 기법에서는 송신 가능한 신호 벡터 각각에 대한 ML(Maximum Likelihood) 메트릭(Metric)을 계산하여 가장 작은 ML 메트릭(Metric)을 갖는 송신 신호 벡터를 찾는 ML 신호 검출 기법(Maximum Likelihood Bit Metric Detection)을 사용하였다. 그러나, ML 신호 검출 기법은 최적의 송신 신호 검출 성능을 보이지만, 성상도(constellation) 크기 및 송신단 안테나 수에 대해 하드웨어 복잡도가 지수 함수적으로 증가하기 때문에 매우 높은 복잡도를 요구하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 검출 기법인 QR-MRL[2], QR-LRL[3], QRM-MLD[4] 등의 기법들이 개발되었다. 이런 기법들은 기존 ML 신호 검출 기법에 비해서는 요구되는 계산량이 적지만, 여전히 높은 계산량이 요구된다. 특히 안테나의 개수가 증가하거나 성상도의 크기가 증가함에 따라 복잡도가 크게 증가한다. 높은 복잡도는 다시 높은 계산 전력을 요구하여 이동단말기의 배터리 수명을 단축시키는 문제점이 있다. 본 논문에서는 이러한 높은 연산량, 높은 계산 전력, 및 낮은 배터리 수명의 문제점을 해결한다.

Zero forcing (ZF) 및 minimum mean squared error (MMSE)와 같은 선형 신호 검출 기법들은 성상도의 크기가 커져도 그 복잡도가 높아지지 않고, 송수신 안테나의 개수가 많아져도 미미하게 계산량이 증가한다. 본 논문에서는 이러한 선형 수신 기법들을 기반으로 하는 적응 선형 신호 검출기를 제안한다. 본 논문에서는 공간다중화 MIMO 시스템의 수신부에서 MCS 레벨에 따른 선형 수신기법을 적응으로 사용하여, MMSE 수신기에 비해 성능열화는 미

미하면서 계산량을 줄여 계산 전력을 감소시킴을 보인다.

II. 공간다중화 MIMO 시스템 모델

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{z} \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = [y_1 y_2 y_3 y_4]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = [x_1 x_2 x_3 x_4]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{z} = [z_1 z_2 z_3 z_4]^T \quad (5)$$

여기서, $x_i, i = 1, 2, 3, 4$ 은 i 번째 송신안테나로부터 송신된 신호를 나타내고, $y_j, j = 1, 2, 3, 4$ 는 j 번째 수신 안테나에서 수신된 신호를 나타내며, $h_{ij}, j = 1, 2, 3, 4, i = 1, 2, 3, 4$ 는 i 번째 송신 안테나와 j 번째 수신 안테나 사이의 채널 이득을 나타낸다. 잡음 $z_i \sim CN(0, \sigma_z^2), i = 1, 2, 3, 4$ 은 환형 대칭 가우시안 잡음으로 가정한다. 본 논문에서 송신 신호 $x_i, i = 1, 2, 3, 4$ 는 QPSK, 16-QAM, 64-QAM등으로 변조된 심볼이라고 가정한다.

III. SM MIMO 시스템을 위한 선형 수신기

A. 기존 선형 수신기

수식 (1)의 송수신 신호관계를 가정할 때, zero forcing (ZF) 기법 및 minimum mean squared error (MMSE) 기법은 아래의 가중치 행렬을 각각 갖는다.

$$\mathbf{W}_{ZF} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (6)$$

위의 pseudo 역행렬을 \mathbf{H} 가 정방행렬이 아닐 때 이고, 정방행렬의 경우에는 아래식과 같게 된다.

$$\mathbf{W}_{ZF} = \mathbf{H}^{-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{W}_{MMSE} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma_z^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (8)$$

식 (6) 및 (8)에서, \mathbf{H}^H 는 \mathbf{H} 의 Hermitian transpose이다. MMSE의 경우 잡음에 대한 사전정보인 σ_z^2 가 사용됨을 볼 수 있다. 일반적으로 ZF에 비해 MMSE가 우월한 성능을 보이는데, 이는 채널 이득행렬의 condition number가 클 경우 가중치를 곱할 때 발생하는 잡음증폭이 MMSE의 경우가 ZF에 비해 적기 때문이다. 따라서, SNR이 낮아 잡음의 크기가 클 때, MMSE와 ZF의 성능 차이가 크고, SNR이 높아 잡음의 크기가 작을 때는 두 가지 기법의 성능이 유사하게 된다.

B. 선형 수신기의 성능

위에서 언급한 ZF과 MMSE의 상대적인 성능은 성상도의 크기에 따라 달라진다. 성상도의 크기에 따라 상대적인 성능을 관찰하기 위해 표1에 있는 모의실험환경에서 비교한다.

표 1. 모의실험 환경
Table 1. Simulation Environments

model Sysetm	4x4 MIMO systems (spatial multiplexing)
채널모델	i.i.d. Rayleigh fading channels
채널추정	Ideal CSI at Rx
변조방식	QPSK 및 16-QAM

그림 1과 2에서 관찰할 수 있듯이 QPSK를 사용할 경우에는 ZF과 MMSE가 각각 요구하는 SNR차이가 큰 값으로 유지되고, 16-QAM을 사용할 경우에는 SNR이 높아지면서 두 가지 검출기법의 성능차이가 매우 미미함을 할 수 있다. 성상도로 16-QAM이 사용됨에 따라 각 성상점의 전력이 차이가 생겨서 간섭신호와 잡음의 비율을 조절하는 MMSE는 정확하지 못한 정보를 사용하여 SINR을 최대가 되도록 하기 때

문에 이런 현상이 발생한다.

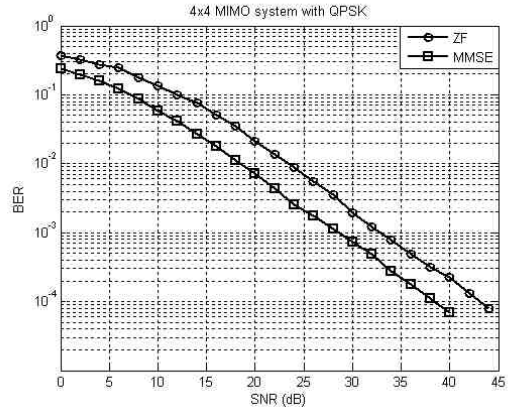


그림 1. QPSK 사용시 ZF과 MMSE 수신기의 상대적 성능.

Fig. 1. Performance comparison of ZF and MMSE when QPSK is used.

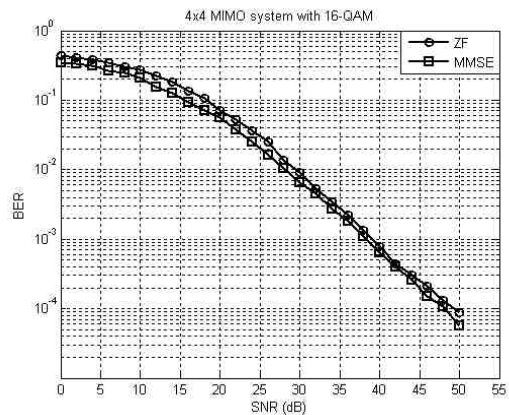


그림 2. 16-QAM 사용시 ZF과 MMSE의 상대적 성능.
Fig. 2. Performance comparison of ZF and MMSE when 16-QAM is used.

아래의 표 2 및 표 3은 정방행렬의 경우를 가정으로 ZF 및 MMSE 검출기의 복잡도를 나타낸다. 표2와 표3의 비교를 통해 ZF 검출기의 복잡도가 MMSE 검출기의 복잡도에 비해 매우 낮다는 것을 알 수 있다. 이러한 상대적인 복잡도 및 성상도에 따른 성능차이를 기반으로 적응 선형 검출기를 사용하여 계산량을 감소시

키고, 결과적으로 배터리의 수명을 연장할 수 있다.

표 2. ZF 복잡도
Table 2. ZF Complexity

동작	곱셈	나눗셈
H^{-1}	136	8
$W_{ZF}y$	64	0
Total	200	8

표 3. MMSE 복잡도
Table 3. MMSE Complexity

동작	곱셈	나눗셈
$A = H^H H + \sigma I$	104	0
$B = A^{-1}$	136	8
$W_{MMSE} B H^H$	192	0
$W_{MMSE} y$	64	0
Total	496	8

C. MCS-adaptive Linear Receiver

적응 선형 검출기는 MCS레벨 정보를 사용한다. 즉 QPSK를 사용할 경우에는 복잡한 MMSE 검출기를 사용하여 성능이득을 달성하고, QPSK 보다 큰 16-QAM/64-QAM등이 사용될 경우에는 간단하지만 성능열화가 미미한 ZF 검출기를 사용하여 사용 계산 전력을 감소시킨다.

IV. 하드웨어 구현

기존의 ZF/ MMSE 수신기 및 본 논문에서 제안된 적응 선형 수신기를 하드웨어로 구현하였다. 그림 3과 4는 각각 ZF 수신기와 MMSE 수신기의 하드웨어 블록도를 나타낸다. 그림 5는 본 논문에서 제안된 MCS적응 선형수신기의 블록도이다.

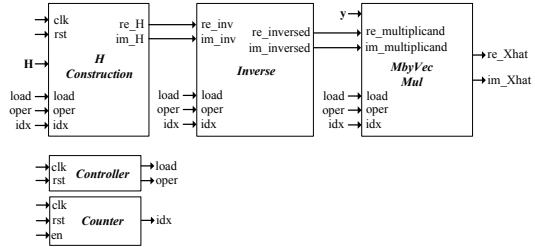


그림 3. ZF 하드웨어 블록도
Fig. 3. Hardware block diagram of ZF receiver

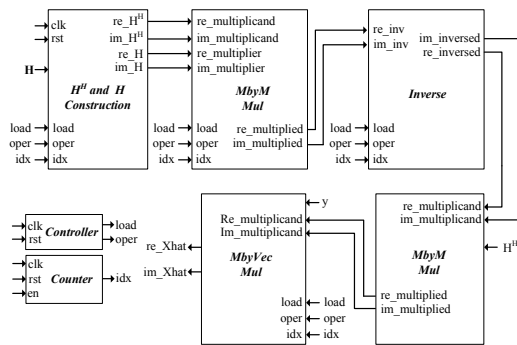


그림 4. MMSE 하드웨어 블록도
Fig. 4. Hardware block diagram of MMSE receiver

표 4는 ZF과 MMSE 그리고 제안된 적응 선형 수신기의 하드웨어 복잡도를 보여준다. ZF의 경우 제일 간단한 하드웨어 복잡도를 가지고 있으며, 합성 결과를 살펴보면 Logic Element(LE) 경우에 21,808개로 5%를 사용하였고, FPGA안에 내장된 18비트 DSP 블록을 784개 77%가 사용되었다. MMSE는 ZF 보다 상대적으로 많은 행렬 곱셈을 가지고 있고, 내장된 18비트 DSP 블록을 모두 사용하였기 때문에 추가로 발생하는 곱셈들은 LEs들로 합성되었다. 이와 같은 이유로 MMSE의 LEs 사용은 약 60,872개로 ZF보다 약 9% 증가되었으며, 내장된 18비트 DSP 블록은 1,024개를 모두 사용하였다.

제안된 적응 선형 수신기의 경우는 ZF보다 더 복잡한 MMSE와 대비하여 단지 멀티플렉서와

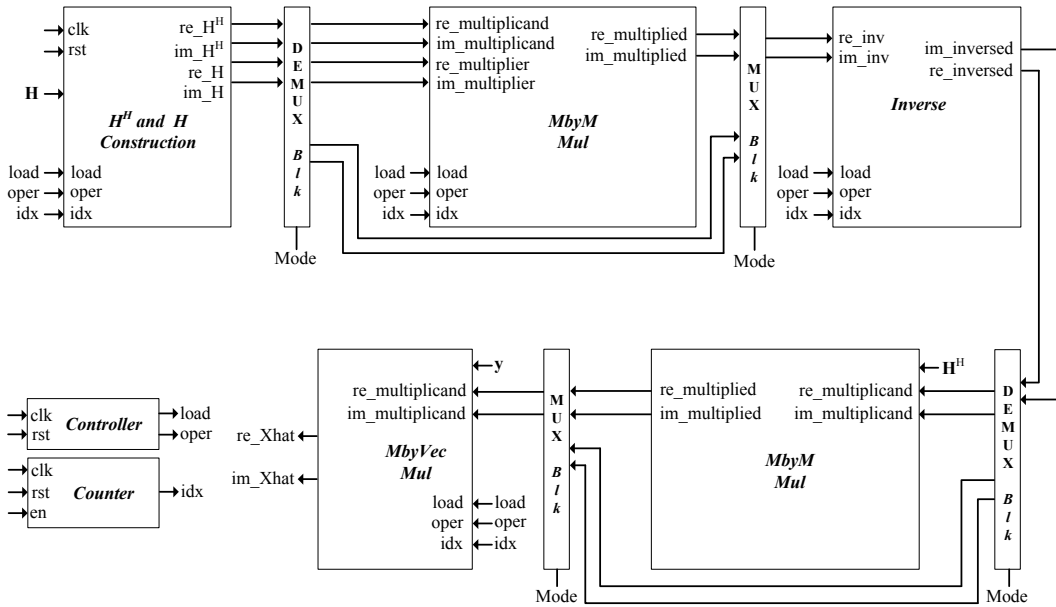


그림 5. 제안된 적응 선형수신기 하드웨어 블록도

Fig. 5. Hardware block diagram of proposed MCS-adaptive linear receiver

레지스터들만이 추가되므로 약 83개의 LEs들이 증가한 하드웨어 복잡도를 갖는다. 그러므로 약간의 LEs들을 추가하여 적응 선형 수신기를 구현할 수 있기 때문에, 제안된 적응 선형 수신기는 매우효율적인 구조이다.

표 4. ZF, MMSE 및 적응 선형수신기 하드웨어 복잡도

Table 4. Hardware complexity of ZF, MMSE, and the proposed adaptive linear receiver

연산	ZF	MMSE	적응 선형수신기
Total Logic Elements	60,872/424,960 (14%)	60,872/424,960 (14%)	60,872/424,960 (14%)
DSP Block 18-bit Elements	1024/1024 (77%)	1024/1024 (100%)	1024/1024 (100%)

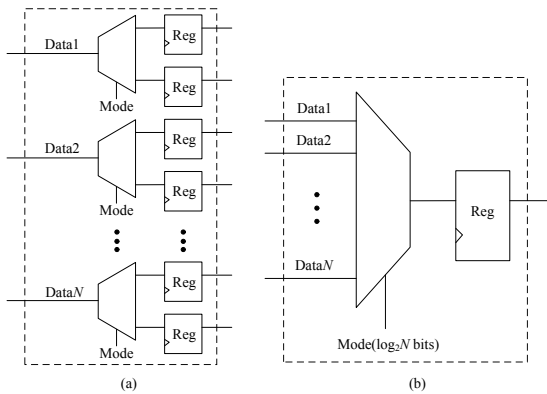


그림 6. 연결 블록도

(a) 디멀티플렉서 블록 (b) 멀티플렉서 블록

Fig. 6. Connector block diagram

(a) Demultiplexer (b) Multiplexer

V. 결론

본 논문에서는 공간다중화 MIMO시스템 수신기에서 필요한 신호검출기법을 제안하였다. 기존 ML 메트릭 기반의 수신기들은 복잡도가 일반적

으로 높아 하드웨어 구현에 어려움이 따른다. 본 논문에서는 하드웨어가 간단하다고 잘 알려진 ZF 및 MMSE 수신기를 기반으로 하는 수신 기법을 제안하였다. ZF와 MMSE의 성능은 성 상도로 QPSK가 사용될 때 성능의 차이가 크지 만, 16-QAM을 사용할 때에는 성능의 차이가 미미하다는 관찰을 기반으로 한다. 한편, 4x4 MIMO시스템과 같이 psuedo inversion이 필요 하지 않는 경우에는 ZF와 MMSE 수신기의 가 중치 행렬을 구하는 절차의 복잡도가 큰 차이 가 난다. 따라서, 본 논문에서는 QPSK가 사용 될 때에는 MMSE 수신기를 사용하고 16-QAM 이상의 성상도가 사용될 때에는 ZF를 사용하는 MCS 적응 선형수신기를 제안하였다. 따라서 제안된 MCS 적응 선형 수신기를 사용하면 계 산전력을 감소시킬 수 있다. 하드웨어 구현을 통해 기존 MMSE 수신기와 비교할 때 제안된 적응 선형수신기의 하드웨어 복잡도가 미미하 게 증가함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] A. F. Naguib, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Increasing data rate over wireless channel," IEEE Signal Process. Mag., vol. 17, no. 2, pp. 744-765, Mar. 1998.
 [2] J. Kim, D. Kim, and S. Yun, "Mitigating Error Propagation in Successive Interference Cancellation," IEICE Trans. Commun., vol. E89-B, No. 10, pp. 2956-2960, Oct. 2006.
 [3] S. Bahng, Y. Park, J. Kim, "QR-LRL signal detection for spatially multiplexed MIMO systems," IEICE Trans. Commun., vol. E91-B, no. 10, pp. 3383-3386, Oct. 2008.
 [4] H. Hur, H. Woo, W. Yang, S. Bahng, Y. Park, J. Kim, "A computationally efficient search space for QRM-MLD signal detection," IEICE Trans. Commun., vol.

E92-B, no. 3, pp. 1045-1048, Mar. 2009.

저자약력

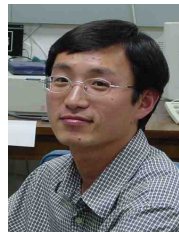
이 규 희 (Kyu-Hee Lee)



2007년 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부 컴퓨터공학 전공 졸업
 2009년 연세대학교 전산학과 석사
 2009년~현재 연세대학교 전산학과 박사과정

<관심분야> NIDS, 임베디드시스템

김 재 권 (Jae-Kwon Kim)



1995년 중앙대학교 전기공학과 졸업
 2000년 중앙대학교 전기공학과 석사
 2004년 The University of Texas at Austin 공학박사
 2004년~2005년 삼성종합기술연구원 4G 시스템 Lab
 2005년~현재 연세대학교 원주캠퍼스 컴퓨터정보통신공학부 교수

<관심분야> 디지털 통신, MIMO-OFDM,실용적인 신호검출 기법

윤 상 균 (Sang-Kyun Yun)



1984년 서울대학교 전자공학과 졸업
 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
 1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
 1984년~1990년 현대전자 정보사업본부
 1992년~2001년 서원대학교 전자계산학과 교수
 1998년~1999년 University of Michigan, Ann Arbor, Visiting Scholar
 2007년~2008년 University of Texas at Austin, Visiting Scholar
 2001년~현재 연세대학교 과학기술대학 컴퓨터정보통신공학부 교수

<관심분야>컴퓨터 및 네트워크 시스템, 임베디드 시스템, NIDS