



---

## **Modified QRM-ML Detection by Stage Reduction in MIMO Systems**

**Gunyoung Ko<sup>1</sup>, Sang Kyu Park<sup>1</sup>, Kwangmin Hyun<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University*

<sup>2</sup>*Department of Information and Communication Engineering, Gangneung-Wonju National University*

---

### **A B S T R A C T**

In this paper, modified QRM-ML detection algorithm is proposed to reduce computational complexity of the conventional QRM-ML detection algorithm in MIMO systems. We consider a stage reduction algorithm to QRM-ML detection algorithm and arrange all steps of each stage and computational complexity, which is calculated the number of multiplications per each step. The proposed detection algorithm has lower complexity than full candidates of QRM-ML detection algorithm. It also has no saturation on BER performance and better performance in high SNR than QRM-ML detection algorithm of lower candidates, which has a similar complexity to proposed algorithm. We also set a new arbitrary parameter which can adjust the number of reduced stages, and it can be selected by considering a trade-off relationship between BER performance and computational complexity. A stage reduction algorithm and each detection algorithm are presented in a row and compared in terms of BER performance and computational complexity by numerical results and experimentations. In the process of experimentations, the cross points of conventional QRM-ML detection algorithm and modified QRM-ML detection algorithm in BER performance graphs are also analyzed in diverse situations and compared in terms of efficiency of proposed algorithm according to the number of antennas and modulation order.

© 2015 KKITS All rights reserved

---

**KEYWORDS :** Multiple-input-multiple-output (MIMO), Maximum Likelihood; QRM-ML detection; Complexity Reductions

---

**ARTICLE INFO:** Received 12 January 2015, Revised 13 February 2015, Accepted 13 February 2015.

---

---

\*Corresponding author is with the department of Information & Telecommunication Engineering, Gangneung-Wonju National University, 150 Namwon-ro

---

Heungup, Wonju, 220-711, KOREA.  
*E-mail address:* [kamihyun@gwnu.ac.kr](mailto:kamihyun@gwnu.ac.kr)

## 1. 서론

최근 무선통신기술이 급속하게 발전함에 따라, 폭증하는 데이터 트래픽을 감당하기 위해 더 많은 데이터를, 더 효율적으로 보내는 무선통신기술이 요구되고 있다. 하지만 무선통신의 성능은 페이딩, 간섭, 전파감쇠, 잡음 등의 많은 요소로부터 방해받고 있다[1]. 특히 서로 다른 크기와 위상 차이를 갖는 신호들이 수신단에서 합쳐지게 되어 발생하는 다중경로 페이딩은, 신호의 심각한 왜곡을 초래한다. 이러한 채널의 특성을 극복하기 위해, 다중안테나(Multi-Input Multi-Output : MIMO) 시스템이 다양하게 개발되어 오고 있다. 1990년 중반부터 활발히 연구 되어온 다중 안테나 기술은 여러 개의 송신 안테나와 수신 안테나를 사용하는 기술로, 주파수와 전력의 증가 없이 안테나 수에 비례하는 채널용량을 극대화시킬 수 있는 장점을 갖는다[2].

다중 안테나 시스템에서는 여러 개의 안테나로부터 송신된 신호를 각각의 수신단에서 검출하게 되는데, 최대우도(Maximum Likelihood: ML) 검출기법, 제로포싱(Zero Forcing: ZF) 검출기법, 최소평균평방오차(Minimum Mean Square Error: MMSE) 검출기법 등을 비롯한 다양한 검출기법들이 제안되어 왔다[3][4][5]. 하지만 수많은 기법 중에서도 낮은 오류확률과 낮은 복잡도를 동시에 만족하는 검출기법을 선택하기는 어렵다. 특히 최적의 성능을 갖지만 높은 복잡도 때문에 실생활에 거의 적용시키지 못하는 최대우도 검출기법의 복잡도를 낮추기 위한 검출기법들이 많이 연구되어 오고 있다 [6][7]. 그 중 채널행렬에 QR행렬분해를 적용하며, 성상도에 후보군 개념을 도입한 QRM-최대우도(Maximum Likelihood with QR decomposition and M algorithm : QRM-ML) 검출기법은, 최대우도 검출기법의 오류확률과 유사한 성능을 가지는 반면에 복잡도를 크게 절감할 수 있다[8]. 또한 검출하

는 각 단계마다 변복조기법의 성상도 심볼 중 선택한 일부의 후보군을 고려함으로써 보다 낮은 복잡도를 가질 수 있다.

하지만 최근 다중 사용자 간의 다중 안테나 기술이 WLAN 및 이동통신 분야의 표준에 채택되면서, 시스템 구현 시 다중 안테나 시스템의 송수신 안테나차수와 변복조기법의 차수가 급속도로 증가하고 있으며, 다중 안테나 검출기 복잡도의 기하급수적 증가가 불가피하다. 이처럼 더 높은 변복조기법차수와 더 많은 안테나를 사용할 수 있는 massive MIMO 시스템이 화두가 되는 가운데, QRM-최대우도 검출기법을 비롯한 기존 검출기법의 복잡도를 더욱 낮출 필요가 있다.

본 논문에서는 기하급수적으로 증가하는 복잡도를 고려하여, 기존 QRM-최대우도 검출기법의 복잡도를 낮추는 알고리즘을 제시한다. 기존 QRM-최대우도 검출기법의 복잡도 저감을 위한 연구[9]를 확장하여, 안테나의 개수 중 단계감소기법을 적용할 단의 개수를 변수로 선정한다. 변수에 따라 적절한 오류확률과 복잡도를 정할 수 있으며, 큰 성능 저하 없이 복잡도를 대폭 낮출 수 있다. 제안된 알고리즘을 다양한 변복조기법차수와 안테나 환경에서의 기존 QRM-최대우도 검출기법의 성능과 비교 및 분석한다.

이하의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문의 시스템 모델을 정의하며, 3장에서는 기존의 최대우도 검출기법과 QRM-최대우도 검출기법을 비교 및 분석하며, 단계감소기법을 적용한 새로운 검출기법을 제안한다. 4장에서는 다양한 환경에서의, 제안된 검출기법과 기존의 검출기법의 오류확률과 복잡도를 비교 및 분석하며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 2.4와 같이 송신단과 수신단이 여러 개의 안테나로 구성된 다중 안테나 시스템을 고려한다. 이에 주파수와 전력의 증가 없이 안테나 수에 비례하는 채널용량을 얻을 수 있다.

NT 개의 송신 안테나를 통해 송신된 신호는 채널을 거쳐 NR 개의 수신 안테나를 통해 수신하게 되는데, 수신된 신호는  $\mathbf{y}=[y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{N_R}]^T$ 로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \tag{1}$$

여기서  $\mathbf{x}=[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{N_T}]^T$ 는  $N_T$ 개의 송신 안테나를 통해 송신된 신호이며,  $\mathbf{n}=[n_1 \ n_2 \ \dots \ n_{N_R}]^T$ 은 백색 부가 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise: AWGN)을 나타내는 잡음 벡터이다. 또한  $\mathbf{H}$ 는 채널 행렬로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \dots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 각각의 원소들은 송수신 안테나로부터의 채널 응답으로 구성된 복소수 꼴이다. 채널 행렬의 모든 원소들은 평균이 0이고, 분산이 1인 레일레이 확률 분포(Rayleigh Probability Distribution)를 따른다. 채널의 상태정보(Channel State Information: CSI)는 완벽하게 알고 있음을 가정하였다.

### 3. 검출기법

#### 3.1 최대우도 검출기법

최대우도 검출기법은 송신 가능한 심볼 벡터 중 가장 최소의 메트릭(metric) 값을 갖는 송신심볼 벡터를 찾는 기법이다. 송신심볼 벡터의 전송 확률이 모두 동일한 경우에 최적의 오류성능을 갖게 되는데, massive MIMO와 같이 송수신 안테나의 수가 많아지거나, 변복조기법차수가 증가함에 따라 지수 함수적으로 증가하는 연산량 때문에 실용적이지 않다. 송신심볼의 추정치를 구하는 최대우도 검출 표현식은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x} \in \Omega} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 \tag{3}$$

여기서  $\Omega$ 은 변복조기법차수의 성상도 상의 심볼들의 집합을 나타내며,  $\|\cdot\|$ 은 벡터 또는 행렬의 정규화된 값을 나타낸다. 기존 최대우도 검출기법은 최대우도확률(Maximum Likelihood Probability)을 고려한 상세한 검출이  $\mathbf{X}$ 의 전체 성상도 심볼들의 집합  $\Omega$ 에 걸쳐 진행된다. 집합  $\Omega$ 의 원소의 개수를  $\Omega_n$ 라고 하면, 최대우도 검출기법은  $\Omega_n$ 개의 가지를 갖는 각각의 단의 경로를 모두 고려하는 검출기법이다.

최대우도 검출기법은  $\Omega_n$ 개의 가지를 갖는  $N_T$ 개의 단의 경로를 모두 고려하기에, 필요한 총 메트릭 연산량은  $\Omega_n^{N_T}$ 이다. 4개의 송수신 안테나를 적용하였을 때, 최대우도 검출기법의 메트릭을 나타내면 다음과 같다.

$$\|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 = \left\| \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \right\|^2$$

$$\tag{4}$$

위 식에서 출발하는 검출 알고리즘은 트리의 모든 가지의 수를 비교해야 한다. 최대우도 검출기법의 알고리즘은  $\Omega_n^{N_t}$  개의  $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$  값을 위의 매트릭에 대입하여 그 값들을 비교하여 가장 최소의 값을 갖는  $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$  를 찾는 과정이다.

### 3.2 QRM-최대우도 검출기법

QRM-최대우도 검출기법은 기존 최대우도 검출기법의 지수적으로 증가하는 복잡도를 감소시키기 위해 제안되었다. 채널행렬에 QR 행렬분해가 적용되어 다음과 같이 직교행렬  $\mathbf{Q}$ 와 상삼각행렬  $\mathbf{R}$ 로 분해된다.

$$\mathbf{H} = \mathbf{QR} \quad (5)$$

여기서 기존 최대우도 검출기법의 표현식인 식 (3)에서 채널 행렬  $\mathbf{H}$ 에 QR 행렬분해를 적용한 식은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x} \in \Omega} \|\mathbf{Q}^H \mathbf{y} - \mathbf{R}\mathbf{x}\|^2 \quad (6)$$

여기서,  $\mathbf{H}$ 는 직교행렬의 에르미트 행렬 (Hermitian Matrix)을 의미한다.

QRM-최대우도 검출기법 또한, 최대우도확률을 고려하여  $\mathbf{X}$ 의 전체 성상도 심볼들의 집합  $\Omega$ 에 걸쳐 상세한 검출이 진행되며, 기존 최대우도 검출기법과는 달리 각각의 단을 지나갈 때  $M$  알고리즘을 성상도에 적용함으로써 후보군의 개수를 정한다. 여기서  $M \in \{1, 2, \dots, \Omega_n\}$ 은 후보군의 개수를 나타낸다. 4개의 송수신 안테나 상황을 적용한 QRM-최대우도 검출기법의 매트릭을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \|\mathbf{Q}^H \mathbf{y} - \mathbf{R}\mathbf{x}\|^2 &= \|\tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{R}\mathbf{x}\|^2 \\ &= \left\| \begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \\ \tilde{y}_3 \\ \tilde{y}_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ 0 & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ 0 & 0 & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & r_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \right\|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\tilde{\mathbf{y}}$ 는 직교행렬  $\mathbf{Q}$ 와 기존 수신된 신호의 곱인  $\mathbf{Q}^H \mathbf{y}$ 를 의미한다. 식 (7)에서 출발하는 검출 알고리즘을 단계별로 언급하면 다음과 같다[10].

**1단계:**  $|\tilde{y}_4 - r_{44}x_4|^2$ 의 값을 최소화 시키는  $x_4$ 의 후보군  $M$  개를,  $\Omega_n$  개 중에서 선택한다.

**2단계:**  $|\tilde{y}_4 - r_{44}x_4|^2 + |\tilde{y}_3 - r_{33}x_3 - r_{34}x_4|^2$ 의 값을 최소화 시키는 벡터  $[x_3 \ x_4]^T$ 의 후보군  $M$  개를,  $M \times \Omega_n$  개 중에서 선택한다.

**3단계:**  $|\tilde{y}_4 - r_{44}x_4|^2 + |\tilde{y}_3 - r_{33}x_3 - r_{34}x_4|^2 + |\tilde{y}_2 - r_{22}x_2 - r_{23}x_3 - r_{24}x_4|^2$ 의 값을 최소화 시키는 벡터  $[x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ 의 후보군  $M$  개를,  $M \times \Omega_n$  개 중에서 선택한다.

**4단계:**  $|\tilde{y}_4 - r_{44}x_4|^2 + |\tilde{y}_3 - r_{33}x_3 - r_{34}x_4|^2 + |\tilde{y}_2 - r_{22}x_2 - r_{23}x_3 - r_{24}x_4|^2 + |\tilde{y}_1 - r_{11}x_1 - r_{12}x_2 - r_{13}x_3 - r_{14}x_4|^2$ 의 값을 최소화 시키는 벡터  $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ 의 후보군  $M$  개를,  $M \times \Omega_n$  중에서 찾는다.

QRM-최대우도 검출기법은 더 적은 후보군을 고려함으로써, 기존 최대우도 검출기법에 비해 복잡도를 감소시킨다. 즉, 최대우도 검출기법은 3단계, 4단계에서  $M \times \Omega_n^2$ ,  $M \times \Omega_n^3$  중 선택된  $M$ 개의 후보군 안에서 매트릭 값을 최소화시키는 벡터를 찾

는 반면에, QRM-최대우도 검출기법은 3단계와 4단계에서  $M \times \Omega_n$  중 선택된  $M$  개의 후보군 안에서 매트릭 값을 최소화시키는 벡터를 찾음으로써 복잡도를 대폭 줄일 수 있다.

QRM-최대우도 검출기법의 성능은 후보군의 개수  $M$  의 값에 따라 결정된다.  $M$  의 값이 크면 QRM-최대우도 검출기법의 성능은 기존 최대우도 검출기법의 성능에 근접하게 되지만 복잡도가 증가하고, 작은  $M$  의 값을 사용하게 되면 복잡도는 감소하지만 성능이 열화되는 trade-off 관계에 놓여있다.

#### 4. 수정된 QRM-최대우도 검출기법

본 논문에서는 massive MIMO와 같이 급격하게 증가하는 복잡도를 갖는 상황을 고려하여, 기존 QRM-최대우도 검출기법의 복잡도를 낮추는 알고리즘을 제시한다. 안테나의 개수 중 단계감소기법을 적용할 단의 개수를  $P$  라는 변수로 선정하였다. 제안된 검출 알고리즘을 단계별로 언급하면 다음과 같다.  $P=1$ 일 때, 4개의 송수신 안테나 상황을 가정하였다. 기존 QRM-최대우도 검출기법은 4단계로 진행된 반면, 제안된 기법은 5단계로 이루어져 있다. 처음 단계에서  $P$  의 크기에 따른 매트릭을 추출하게 되며, 기존 QRM-최대우도 검출기법과 유사하게 검출이 진행된다. 그 후 마지막 단계에서는 더 적은 후보군을 고려하여 추정하게 된다.

**1단계:** 우선, 식(7)의 매트릭 값에서, 가장 위의 단의 행렬 원소들을 제외한 나머지 원소만 이루어진 매트릭을 추출한다.

**2단계:** 추출된 매트릭에서,  $|\tilde{y}_4 - r_{44}x_4|^2$  의 값을 최소화시키는  $[x_3 \ x_4]^T$  의 후보군  $M$  개를,  $M \times \Omega_n$  개 중에서 선택한다.

**3단계:**  $|\tilde{y}_4 - r_{44}x_4|^2 + |\tilde{y}_3 - r_{33}x_3 - r_{34}x_4|^2$  의 값을 최소화 시키는 벡터  $[x_3 \ x_4]^T$  의 후보군  $M$  개를,  $M \times \Omega_n$  개 중에서 선택한다.

**4단계:**  $|\tilde{y}_4 - r_{44}x_4|^2 + |\tilde{y}_3 - r_{33}x_3 - r_{34}x_4|^2 + |\tilde{y}_2 - r_{22}x_2 - r_{23}x_3 - r_{24}x_4|^2$  의 값을 최소화 시키는 벡터  $[x_2 \ x_3 \ x_4]^T$  의 후보군  $M$  개를,  $M \times \Omega_n$  개 중에서 선택한다.

**5단계:** 4단계에서 추정하여 얻은  $[x_2 \ x_3 \ x_4]^T$  값을 이용하여,  $|\tilde{y}_4 - r_{44}x_4|^2 + |\tilde{y}_3 - r_{33}x_3 - r_{34}x_4|^2 + |\tilde{y}_2 - r_{22}x_2 - r_{23}x_3 - r_{24}x_4|^2 + |\tilde{y}_1 - r_{11}x_1 - r_{12}x_2 - r_{13}x_3 - r_{14}x_4|^2$  의 값을 최소화 시키는  $x_1$  를 후보군  $M$  개 중에서 선택한다.

#### 5. 복잡도 계산 및 모의실험 결과

복잡도를 산출하기 위해 정한 기준은 실수 곱셈의 수이다. 실수부와 허수부로 이루어진 값들의 곱은 4개의 곱셈으로 셈하였다. 3.2절에서 확인할 수 있듯이, QRM-최대우도 검출기법은 첫 번째 단에서 64개의 곱셈과 나머지 세 개의 단에서 각각 1024개의 곱셈이 필요하였다. 반면, 4절에서 나타내었듯이, 제안된 검출기법은 첫 번째와 마지막 단에서 64개의 곱셈, 그리고 두 번째와 세 번째 단에서 각각 1024개의 곱셈을 필요로 하였다. 즉, 3136개의 곱셈이 필요한 QRM-최대우도 검출기법에 비해, 제안된 검출기법은 2176개의 곱셈을 사용하였기에, 총 960개의 곱셈을 줄일 수 있었다.

즉, QRM-최대우도 검출기법의 복잡도(연산량)는  $4 \times (M \times \Omega_n \times (N-1) + M)$  이며, 제안된 검출기법의 복잡도는  $4 \times (M \times \Omega_n \times (N-1-P) + M \times P)$  이다.

<표 1>은 제안된 알고리즘의 복잡도를 기존 최대우도 검출기법, QRM-최대우도 검출기법과 비교하기 위해 나타낸 표이다. SNR은 비트 당 에너지

인  $E_b$ 를 잡음전력 스펙트럼 밀도인  $N_0$ 로 나눈 값을 고려하였다.

표 1. 4개의 송수신 안테나, 16QAM 상황에서의 복잡도  
Table 1. Complexity of 4 antennas and 16QAM situation

QRM-최대우도 검출기법 (M=16)	3,136
제안된 검출기법 (M=16)	2,176
QRM-최대우도 검출기법 (M=8)	1,568
QRM-최대우도 검출기법 (M=11)	2,156

제안된 검출기법의 복잡도는 2176으로, 3136의 복잡도를 갖는 기존 QRM최대우도 검출기법(M=16)에 비해 약 31% 감소함을 확인할 수 있다. 또한 비슷한 복잡도를 지니는 더 적은 후보군의 QRM-최대우도 검출기법과 성능을 비교해야 한다. 4개의 송수신 안테나와 16QAM의 변복조방식을 선택하였을 때는 제안된 검출기법이 QRM-최대우도 검출기법(M=11)와 매우 유사한 복잡도를 갖는다. <표 1>에 나타난 복잡도를 가지는 각각의 기법들의 비트 오류확률 성능은 다음과 같다.

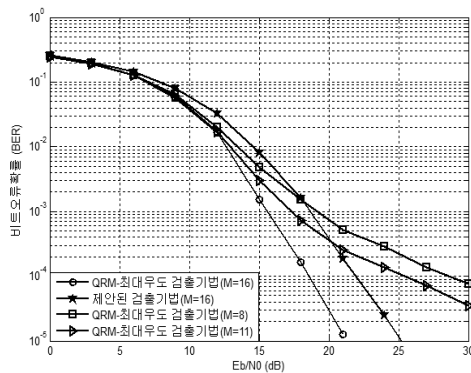


그림 1. 4개의 송수신 안테나, 16QAM 상황에서의 각각의 검출기법의 비트오류확률  
Figure1. Bit Error Rate of 4 antennas and 16QAM situation

<그림 1>에서, 제안된 검출기법과 M=11일 때의 QRM-최대우도 검출기법의 비트오류확률 성능을

비교하였을 때, 약 21dB에서 교차점이 발생한다. 더 높은 SNR로 갈수록, 제안된 알고리즘의 성능이 더욱 좋아지며, 기존 QRM-최대우도 검출기법과 달리 포화상태에 이르지 않음을 확인할 수 있다. 즉, 비트오류확률이 10<sup>-4</sup>가 되는 지점의 SNR은 제안된 검출기법이 22dB인 반면, 적은 후보군을 지닌 기존 QRM-최대우도 검출기법은 25dB이다. 이와 마찬가지로, 더 높은 변복조기법 차수와 더 많은 송수신 안테나 환경에서 살펴보면 다음과 같다.

표 2. 4개의 송수신 안테나, 64QAM 상황에서의 복잡도  
Table 2. Complexity of 4 antennas and 64QAM situation

QRM-최대우도 검출기법 (M=64)	49,408
제안된 검출기법 (M=64,P=1)	33,280
QRM-최대우도 검출기법 (M=44)	33,968
제안된 검출기법 (M=64,P=2)	17,152
QRM-최대우도 검출기법 (M=23)	17,756

표 3. 8개의 송수신 안테나, 16QAM 상황에서의 복잡도  
Table 3. Complexity of 8 antennas and 16QAM situation

QRM-최대우도 검출기법 (M=16)	7,232
제안된 검출기법 (M=16,P=1)	6,272
QRM-최대우도 검출기법 (M=14)	6,328
제안된 검출기법 (M=16,P=2)	5,312
QRM-최대우도 검출기법 (M=12)	5,424
제안된 검출기법 (M=16,P=3)	4,352
QRM-최대우도 검출기법 (M=10)	4,520

<표 2>와 <표 3>은 제안된 알고리즘의 복잡도를 기존 최대우도 검출기법과 더 높은 변복조기법과 더 많은 송수신 안테나를 적용하였을 때 비교한 표이다. 감소된 복잡도를 가진 제안된 검출기법과, 유사한 복잡도를 지닌 낮은 후보군의 QRM-최대우도 검출기법의 성능을 비교하면 다음과 같다.

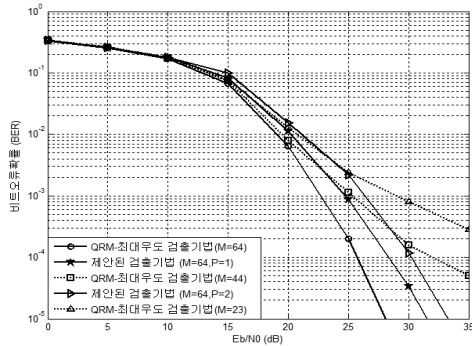


그림 2. 4개의 송수신 안테나, 64QAM 상황에서의 각각의 검출기법의 비트오류확률  
Figure2. Bit Error Rate of 4 antennas and 64QAM situation

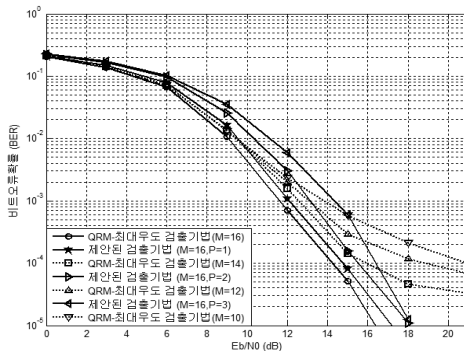


그림 3. 8개의 송수신 안테나, 16QAM 상황에서의 각각의 검출기법의 비트오류확률  
Figure3. Bit Error Rate of 8 antennas and 16QAM situation

<그림 2>는 4개의 송수신 안테나와 64QAM 환경에서, <그림 3>은 8개의 송수신 안테나와 16QAM 환경에서 각각 비트오류확률을 나타낸 그림이다. 더 높은 변복조기법을 적용하였을 때는 교차점이 2dB정도 오른 23dB에서 발생하였다. 반면에 더 많은 송수신 안테나를 적용하였을 때는 14dB정도에서 교차점이 발생하였다. 즉, 더 많은 안테나를 사용하는 massive MIMO와 같은 환경에서는 낮은 SNR에서부터 효율적으로 적용이 가능하다.

## 6. 결론

본 논문에서는 큰 복잡도를 갖는 massive MIMO와 같은 최근 기술에 대처하기 위해, 수정된 QRM-최대우도 검출기법 알고리즘이 제안되었다. 제안된 검출기법은 후보군과 변복조기법 차수가 동일한 기존 QRM-최대우도 검출기법에 비해서 복잡도를 대폭 감소시켰다. 또한 제안된 검출기법과 유사한 복잡도를 가지는 더 작은 후보군을 지닌 QRM-최대우도 검출기법과 비교하였을 때, 비트오류확률 성능이 포화상태에 이르지 않았으며, 높은 SNR에서 비트오류확률 성능의 이득을 얻었다. 그리고 더 많은 송수신 안테나 수를 요구하는 환경에서, 기존 QRM-최대우도 검출기법과 제안된 검출기법의 비트오류확률 성능 교차 발생지점이 더 낮은 SNR에서 발생하였기에, massive MIMO와 같은 상황에서 더욱 효율적이다. 이처럼 제안된 검출 기법은 복잡도와 BER성능의 상관관계를 고려하여 실제 다중 안테나 시스템에도 적용할 수 있으리라 기대된다.

## References

- [1] G. J. Foschini and M. J. Gans, *On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas*, Wireless Personal communication, Vol. 6, pp. 311-335, 1998.
- [2] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, *Capacity limits of MIMO channels*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 21, No. 5, pp. 684-702, 2003.
- [3] Q. H. Spencer, A.L. Swindlehurst, and M. Haardt, *Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels*, IEEE Transactions on Signal

- Processing, Vol. 52, No. 2, 2004.
- [4] M. Tuchler, A. C. Singer, and R. Koetter, *Minimum mean squared error equalization using a priori information*, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 50, No. 3, 2002.
- [5] Y. Jiang, M. K. Varanasi, and J. Li, *Performance analysis of ZF and MMSE equalizers for MIMO systems: An in-depth study of the high SNR regime*, IEEE Transaction on Information Theory, Vol. 57, No. 4, pp. 2008-2026, 2011.
- [6] M.O. Damen, H. E. Gamal, and G. Caire, *On maximum-likelihood detection and the search for the closest lattice point*, IEEE Transaction on Information Theory, Vol. 49, No. 10, pp. 2389-2402, 2003.
- [7] H. Yao, and G. W. Wornell, *Lattice-reduction-aided detectors for MIMO communication systems*, IEEE Global Telecommunication Conference, Vol. 1, pp. 424-428, 2002.
- [8] D. Wubben, R. Bohnke, V. Kuhn, and K. D. Kammeyer, *Near-maximum-likelihood detection of MIMO systems using MMSE-based lattice-reduction*, IEEE International Conference Communications., Vol. 2, pp. 798-802, 2004.
- [9] G. Ko, J. K. Kim, K. Hyun, and S. K. Park, *A QRM-MLD algorithm with low complexity by stage reduction*, IEEE Vehicular Technology Society Asia Pacific Wireless Communications Symposium, 2014.
- [10] T. H. Im, I. Park, H. J. Yoo, S. Yu, and Y. S. Cho, *An efficient soft-output MIMO detection method based on a multiple-channel-ordering technique*, ETRI Journal, Vol. 33, No. 5, pp. 661-669, 2011.

---

## 다중 안테나 시스템에서 단계감소 기법을 적용한 수정된 QRM-최대우도 검출기법

고건영<sup>1</sup>, 박상규<sup>1</sup>, 현광민<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 전자컴퓨터통신공학부

<sup>2</sup>국립강릉원주대학교 정보통신공학과

---

### 요 약

본 논문에서 다중 안테나(MIMO) 시스템의 QRM-최대우도(QRM-ML) 복잡도를 줄이기 위해, 수정된 QRM-최대우도 검출기법을 제안되었다. QRM-ML 검출 기법에 단계감소 알고리즘을 적용하여, 단계를 재배열하였으며 곱하기의 수로 구한 복잡도를 정리하였다. 제안된 검출기법은 최대 후보군을 지닌 QRM-ML 검출기법에 비해 적은 복잡도를 지니며, 성능이 포화되지 않으며, 비슷한 복잡도를 갖는 적은 후보군을 지닌 QRM-ML 검출기법에 비해 높은 SNR(Signal-to-Noise ratio) 에서 더 좋은 성능을 갖는다. 단계 감소되는 단의 수를 임의의 변수로 설정하여, 오류 성능과 복잡도의 상호관계를 고려하여 조절이 가능하다. 첫 단계에서 메트릭을 검출하며, 마지막 단계에서는 더 적은 후보군을 고려하여 추정하게 된다. 단계감소기법과 각각의 검출 기법을 다루며, 실험결과를 통해 BER(Bit Error rate)과 복잡도 측면에서 검출기법을 비교한다. 또한 실험과정에서 BER 성능 그래프상의 기존 QRM-ML 검출기법과 수정된 QRM-ML 검출기법의 교차발생지점을 다양한 환경에서 분석하며, 안테나 수와 변조기법차수에 따른 효율성을 비교한다.

---



**Gunyoung Ko** received the B.S. degree in electronics and communication engineering from Hanyang University, Ansan, Korea, in 2013. He is currently a master's student in electronic engineering at Hanyang University, Seoul, Korea. His research interests are in the areas of wireless communications systems and MIMO.

E-mail address: kgy9863@naver.com



**Sang Kyu Park** received the B.S. degree from Seoul National University, Korea, in 1974, the M.S. degree from Duke University, U.S.A. in 1980, and the Ph.D. degree

from the University of Michigan, U.S.A. in 1987, all in Electrical Engineering. From July 1976 to October 1978, he was a research Engineer at Agency for Defense Development, Korea. From August 1990 to August 1991, he was a visiting Scholar at the University of Southern California, U.S.A. Since March 1987, he has been with the Department of Electronics and Computer engineering at Hanyang University, Korea, where he is currently a Professor. His research interests are in the areas of communications theory, wireless communications, mobile communications, spread spectrum communications, and secure communications.

*E-mail address:* [skpark@hanyang.ac.kr](mailto:skpark@hanyang.ac.kr)



**Kwangmin Hyun** received the Ph.D. from the Division of Electrical and Computer Engineering at Hanyang University in 2004. Since March 2005, he has been with

the department of Information and Telecommunication Engineering at Gangneung-Wonju National University, Korea. His research interests are in the areas of communications theory, wireless communications, mobile communications, MIMO, and communication signal processing.

*E-mail address:* [kamihyun@gwnu.ac.kr](mailto:kamihyun@gwnu.ac.kr)