

# 공간 다중화 MIMO-OFDM 시스템을 위한 Hybrid 검출 기법

준회원 원 태 윤\*, 정회원 김 승 환\*\*, 이 진 용\*, 김 영 록\*

## Hybrid Detection Algorithm for Spatial Multiplexing MIMO-OFDM System

Taeyoon Won\* *Associate Member*,  
Seunghwan Kim\*\*, Jinyong Lee\*, Younglok Kim\* *Regular Members*

### 요 약

OFDM 기반의 차세대 이동통신 시스템에서는 제한된 주파수 대역폭에서 높은 전송률을 달성하기 위해 MIMO 기술을 채택 하였으며, MIMO 기법 중 하나인 공간 다중화 방식에서는 적은 연산량으로 좋은 성능을 갖는 신호의 검출 기법이 요구된다. 본 논문에서는 MIMO-OFDM 시스템에서 공간 다중화 신호를 검출하기 위해 연산량을 줄인 QRM-MLD 알고리즘을 제안하고 이를 이용한 하이브리드 기법을 제안한다. 제안된 하이브리드 기법은 MMSE와 QRM-MLD를 채널 상태에 따라 선택적으로 적용하는 기법으로서 무선통신 환경에 따라서 연산량과 검출 성능을 상충적으로 선택할 수 있는 이점이 있다. 3GPP LTE 시스템의 하향링크 환경에서 모의실험을 한 결과, 제안된 방식은 QRM-MLD에 비하여 0.1 dB 이하의 무시할 정도의 성능 열화를 가져오는 대신에 약 59%의 연산량 절감 효과가 있다.

**Key Words** : MIMO-OFDM, Spatial Multiplexing, QR Decomposition, MMSE, 3GPP LTE

### ABSTRACT

In next generation wireless communication systems based on OFDM, multiple-input multiple-output (MIMO) technique is adopted in order to achieve high data throughput with limited bandwidth. As one of MIMO techniques, spatial multiplexing scheme needs high performance data detection algorithm that can be performed with low computational complexity. In this paper, we propose an algorithm that can compute QRM-MLD with reduced complexity. Also, hybrid detection technique is proposed, which can reduce the complexity by selecting between MMSE and QRM-MLD according to the channel condition. The proposed algorithm provides the trade-off between performance and complexity. The computer simulations for downlink transmission in 3GPP LTE system show that less than 0.1dB performance degradation can be achieved at 0.1% BER with 59% reduction on computational complexity compared with the conventional QRM-MLD algorithm.

※ 본 연구는 '서울시 산학연 협력사업(10560)', '3단계 BK21 사업' 및 2010년도 교육과학기술부 재원 한국연구재단 기초연구사업 (20100016662)의 지원을 받았으며, 설계 Tool은 IDEC의 지원을 받았음.

\* 서강대학교 전자공학과 바이오융합 프로그램(ty1215@sogang.ac.kr, jiny4509@sogang.ac.kr, ylkim@sogang.ac.kr)

\*\* 삼성전자 DMC

논문번호: KICS2010-01-014, 접수일자: 2010년 1월 11일, 최종논문접수일자: 2010년 5월 24일

## I. 서 론

최근 무선통신에서의 멀티미디어 서비스에 대한 폭발적인 수요는 많은 데이터를 더 빠른 속도와 더 좋은 품질로 전송할 것을 요구한다. 따라서 차세대 이동통신 시스템에서는 여러 개의 안테나를 이용하여 신호를 송수신 하는 multiple input multiple output (MIMO) 기술을 채택하였다. MIMO 송수신 기술은 각 안테나에서 독립적인 신호를 동시에 전송함으로써 시스템의 주파수 대역폭을 증가 시키지 않으면서 보다 고속의 데이터를 전송할 수 있는 공간 다중화 기술<sup>[1]</sup>과 복수의 송신 안테나에서 같은 신호를 인코딩 한 후 전송하여 수신 신호의 품질을 향상시키는 다이버시티 기술<sup>[2]</sup>로 구분된다. MIMO 기술을 이용하여 다중 경로 채널을 통과한 신호를 수신할 경우 단일 반송파 방식에서는 수신단에서 주파수 선택적 채널의 영향을 극복하기 위해 수신기의 복잡도가 크게 증가하는 반면 orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) 방식에서는 cyclic prefix (CP)를 이용하여 다중 경로 채널에 의한 영향을 효과적으로 극복할 수 있으므로, 이를 위한 추가적인 작업이 필요하지 않아 주파수 선택적 채널에서 효율적인 고속 전송이 가능하다. 따라서 MIMO와 OFDM 시스템을 결합하여 효율적으로 다중안테나 전송을 할 수 있다.

공간 다중화된 MIMO 신호를 검출하는 방법 중 maximum likelihood detection (MLD)는 최적의 검출 기법으로 알려져 있으나 송신 안테나 수와 변조 차수가 증가함에 따라 소요되는 연산량이 지수 함수적으로 증가하여 실제 시스템을 구현하는데 있어 비효율적이다<sup>[3]</sup>. 이에 비해 zero forcing (ZF)과 minimum mean square error (MMSE) 기법은 가장 기본적인 선형 검출 방법으로서 복잡도가 낮지만 MLD 보다는 성능이 좋지 못하다<sup>[4,5]</sup>. 이에 따라 선형 검출 기법을 기반으로, 한 심볼을 검출한 뒤 간섭을 제거하고 나머지 신호를 순차적으로 검출하는 successive interference cancellation (SIC) 기법과 선형 검출 뒤 다른 안테나에서 수신되는 간섭신호를 추정하고 각 안테나의 수신 신호로부터 다른 안테나의 간섭신호를 동시에 빼서 수신 신호를 검출하는 parallel interference cancellation (PIC) 기법 등 성능을 높이기 위한 여러 방법들이 제안되었다<sup>[6,7]</sup>. 그러나 이러한 방법은 여전히 MLD의 성능에는 미치지 못하여 MLD에 기반하고 MLD 보다는 복잡도를 줄인 QR decomposition M algorithm maximum likelihood detection (QRM-MLD)이 제안되었다<sup>[8]</sup>. QRM-MLD 기법은 채

널 행렬의 QR 분해 결과에 각 layer에서 유클리드 거리가 작은  $M$ 개의 후보 벡터만을 계산함으로써 MLD 방식에 비해 매트릭의 연산 횟수를 줄여 연산량을 낮출 수 있다. 그러나 이러한 QRM-MLD 기법은  $M$ 의 크기에 따라 여전히 높은 연산량을 가지기 때문에 실제 시스템에 적용하기 위해서는 연산량을 더 많이 줄여야 한다. 본 논문에서는 공간 다중화된 MIMO 신호를 검출하기 위한 방법으로 낮은 복잡도로 MLD에 가까운 성능을 얻기 위해 QRM-MLD의 연산량을 감소시키는 알고리즘을 제안하고 이를 QR 분해를 이용한 MMSE 기법과 결합한 하이브리드 검출 방식을 제안한다. 제안된 하이브리드 검출 기법은 채널의 상태에 따라 두 가지 방법을 선택적으로 적용하여 신호를 검출하기 때문에 적은 연산량으로 좋은 성능을 효과적으로 얻을 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 MIMO-OFDM 시스템의 구조에 대해 살펴보고 기존의 검출 기법에 대해 알아본다. 3장에서는 제안된 알고리즘에 대해 설명하고 4장에서는 3GPP LTE 시스템에서의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제안된 알고리즘의 성능과 연산량을 기존의 기법들과 비교하여 분석한다. 마지막으로 5장에서 결론을 내린다.

## II. 기존의 신호 검출 기법

송신 안테나와 수신 안테나의 개수가 각각  $N$ 과  $L$ 인 MIMO-OFDM 시스템의 수신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서,  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ 는 각 송신 안테나에서의 송신 신호를 벡터 형태로 표현한 것이고  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_L]^T$ 와  $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_L]^T$ 는 각 수신 안테나에서의 수신신호와 잡음을 나타낸다. 주파수 영역에서의 MIMO 채널 행렬  $\mathbf{H}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,N} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{L,1} & h_{L,2} & \dots & h_{L,N} \end{pmatrix} = [\mathbf{h}_1 \mathbf{h}_2 \dots \mathbf{h}_N] \quad (2)$$

이 때  $h_{i,j}$ 는  $j$ 번째 송신 안테나와  $i$ 번째 수신 안테

나 사이의 채널 계수이며, 행렬  $\mathbf{H}$ 의 크기는  $L \times N$ 이다. 다음은 기준에 제안된 신호 검출 기법과 연산량을 감소시키는 방법을 설명한다.

2.1 Minimum mean square error (MMSE)

MMSE 검출 방법은 수신단에서 잡음의 분산값을 고려하여 추정하는 신호의 평균제곱오차가 최소가 되도록 가중치 벡터를 곱하여 신호를 추정한다<sup>5)</sup>. 평균 추정 오차는 다음과 같이 주어지며

$$\begin{aligned} \epsilon^2 &= E[(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})^H(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})] \\ &= E[(\mathbf{x} - \mathbf{W}\mathbf{y})^H(\mathbf{x} - \mathbf{W}\mathbf{y})] \end{aligned} \quad (3)$$

이를 최소화 하는 가중치 벡터  $\mathbf{W}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{W}_{MMSE} = (\mathbf{H}^H\mathbf{H} + \sigma_n^2\mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{H}^H \quad (4)$$

MMSE 가중치 행렬은 간섭 신호를 완전히 제거하지 못하지만 간섭 잡음의 정보인  $\sigma_n^2$ 가 사용되어 간섭 신호와 잡음에 의한 평균제곱오차를 최소화 시켜 같은 선형검출 기법인 ZF 방식 보다 성능이 더 뛰어나다.

2.2 Maximum likelihood detection (MLD)

MLD 검출 방식은 성상도 내에서 송신 가능한 심볼 벡터들을 모두 고려하여 수식(5)와 같이 주어지는 유클리드 거리 값을 최소로 하는 송신 벡터를 송신 신호로 결정한다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}_i \in \{x_1, \dots, x_J\}} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}_i\|^2 \quad (5)$$

이 방법은 다른 기준 방식들과 비교하여 가장 좋은 성능을 보이지만 송신 안테나 수와 변조차수가 증가함에 따라 소요되는 연산량이 지수 함수적으로 증가하여 실제로 구현하기에는 어려움이 있다<sup>3)</sup>.

2.3 QR 분해를 이용한 신호 검출

MLD 검출 방식이 공간 다중화 MIMO 시스템에서 가장 좋은 성능의 검출 방법으로 알려져 있으나 변조차수나 송수신 안테나의 수에 따라 연산 복잡도가 매우 높으며, 상대적으로 연산량이 적은 선형 검출 알고리즘인 MMSE는 채널 행렬의 역행렬 계산에 많은 곱셈 연산이 필요하다. 이러한 연산 복잡도 문제를 해결하기 위해 QR 분해를 이용한다. QR 분해를 이용하여 행렬  $\mathbf{H}$ 를  $L \times N$ 크기의 유니테리 행렬  $\mathbf{Q}$ 와

$N \times N$  크기의 상삼각 행렬  $\mathbf{R}$ 로 분해하여 다음과 같이 등가적인 표현이 가능하다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \mathbf{Q}\mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (6)$$

양변에  $\mathbf{Q}^H$ 을 곱하면,  $\mathbf{Q}^H\mathbf{Q} = \mathbf{I}$ 이므로

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{Q}^H\mathbf{y} = \mathbf{Q}^H\mathbf{Q}\mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{Q}^H\mathbf{n} = \mathbf{R}\mathbf{x} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (7)$$

이때  $\mathbf{Q}^H$ 가 유니테리 행렬 이므로  $\tilde{\mathbf{n}}$ 의 통계적 특성은 변하지 않는다.

2.3.1 QR 분해를 적용한 MMSE

QR 분해를 MMSE에 적용하기 위해 다음과 같이 확장된 채널 행렬과 수신 벡터를 정의한다<sup>9)</sup>.

$$\underline{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \sigma_n \mathbf{I}_{N_r} \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ 0_{N_r,1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서  $N$ 는 송신 안테나 수를 나타내고  $\mathbf{0}_{N,1} = [0, 0, \dots, 0]^T$ 는 길이가  $N$ 인 영벡터이다. 확장된 채널행렬의 QR 분해는 다음과 같다.

$$\underline{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \sigma_n \mathbf{I}_N \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{Q}}\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \end{bmatrix} \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1\mathbf{R} \\ \mathbf{Q}_2\mathbf{R} \end{bmatrix} \quad (9)$$

위 식을 적용한 송수신 신호의 등가모델은 아래와 같다.

$$\tilde{\mathbf{y}} = \underline{\mathbf{Q}}^H \underline{\mathbf{y}} = \mathbf{Q}_1^H \mathbf{y} = \mathbf{R}\mathbf{x} - \sigma_n \mathbf{Q}_2^H \mathbf{x} + \mathbf{Q}_1^H \mathbf{n} \quad (10)$$

이를 송수신 안테나가 각각 네 개인 경우로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 &= L_{1,1} \cdot x_1 + L_{1,2} \cdot x_2 + L_{1,3} \cdot x_3 + L_{1,4} \cdot x_4 + \tilde{n}_1 \\ \tilde{y}_2 &= L_{2,2} \cdot x_2 + L_{2,3} \cdot x_3 + L_{2,4} \cdot x_4 + \tilde{n}_2 \\ \tilde{y}_3 &= L_{3,3} \cdot x_3 + L_{3,4} \cdot x_4 + \tilde{n}_3 \\ \tilde{y}_4 &= L_{4,4} \cdot x_4 + \tilde{n}_4 \end{aligned} \quad (11)$$

수식(10)의 수신 신호  $\tilde{\mathbf{y}}$ 는 수식(7)과 같이  $\mathbf{R}$ 의 대각행렬 성분과 비대각 행렬 성분의 합으로 표현할 수 있으므로 MMSE 검출을 위해 역행렬의 계산 없이 수

식(11)에서 보는 바와 같이 확장된 채널 행렬의 QR 분해를 이용한 역방향 치환 과정으로 수신 신호를 검출 할 수 있다.

2.3.2 QR 분해를 적용한 M-algorithm Maximum likelihood detection

QRM-MLD는 채널 행렬의 QR 분해 결과에 M 알 고리즘을 적용한 방법으로 각 layer에서 유클리드 거 리가 작은 M개의 후보 벡터만을 계산함으로써 가능한 모든 후보 벡터를 고려하는 MLD 방법보다 메트릭의 연산 횟수를 줄일 수 있다<sup>8)</sup>. QRM-MLD 검출을 위해 먼저 채널 행렬 H를 QR 분해 하여 다음과 같이 ML 메트릭을 등가적으로 표현한다.

$$\|y - Hx\| = \|y - QRx\| = \|Q^H [y - QRx]\| = \|\tilde{y} - Rx\| \quad (12)$$

$$\hat{x} = \arg \min_{x_i \in \{x_1, \dots, x_N\}} \left\{ \sum_{i=1}^N \left| \tilde{y}_i - \sum_{j=1}^i r_{i,j} x_j \right|^2 \right\} \quad (13)$$

첫 번째 단계에서는 메트릭의 크기를 가장 작게 하 는 후보를 |C|개 중 M개를 선택한다. 여기서 |C|는 성상도의 크기로 정의한다. 다음으로 누적 메트릭의 크기를 가장 작게 하는 벡터  $[x_1, x_2]^T$ 를  $M \times |C|$ 개 중에서 M개를 선택한다. 이와 같은 방법으로  $[x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ 의 송신 벡터를 결정하면  $|C|^N$  회의 메트릭 연산 횟수가 필요한 MLD에 비해 연산 횟수를  $|C| + M \times |C| + M \times |C| + M$  회로 줄 일 수 있다. QRM-MLD의 성능은 M에 의해 결정되며 QPSK의 경우  $M=4$ 이면 MLD의 성능과 동일하며 16-QAM의 경우  $M=16$ 일 때 MLD의 성능과 동일하다. 작은 M값 을 사용하면 성능의 열화 있지만 복잡도는 줄어드는 상충 관계에 있다.

III. 제안된 하이브리드 신호 검출 기법

선형 검출 기법인 MMSE 방식은 연산량이 적지만 성능은 MLD에 비해 떨어진다. MLD의 큰 연산량을 개선하기 위한 QRM-MLD 방법 역시 MLD에 가까운 성능을 달성하기 위해서는 성상도의 크기와 같은 M을 선택하여야 한다. 하지만 이는 여전히 높은 연산량을 가지는 단점이 있다. 따라서 여기에서는 낮은 연산량 으로 MLD에 가까운 성능을 갖기 위해 MMSE 기법 에 연산량을 줄인 QRM-MLD를 결합한 하이브리드

방식을 제안한다.

3.1 연산량을 줄인 QRM-MLD

기존의 QRM-MLD는 M에 따라 연산량이 고정되 어 신뢰도가 높은 M개의 경로만을 고려하므로 채널 상태나 잡음의 크기와 관계없이 M에 포함되는 후보 벡터의 불필요한 연산을 계속해야 하는 단점이 있다. 이에 따라 채널 상태나 잡음 전력의 크기에 따라 효율 적으로 M값을 조절하는 적응형 QRM-MLD 알고리 즘이 제안되었다<sup>10)</sup>.

본 논문에서는 하이브리드 검출방법과 결합하기 위 한 QRM-MLD 방법으로써 MMSE검출을 통해 얻어 진 후보벡터의 유클리드 거리 값을 상한으로 하여, QRM-MLD의 수행 중 상한 값을 초과하는 후보 벡터 의 경로를 제거하여 불필요한 계산을 줄이는 연산량 을 줄인 QRM-MLD 알고리즘을 제안한다. MLD 검 출 방식은 송신 가능한 심볼 벡터들을 모두 고려하여 유클리드 거리 값을 최소로 하는 벡터를 송신 신호로 결정하기 때문에 MLD로 검출된 심볼과 MMSE로 검 출된 심볼의 유클리드 거리는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\|y - H\hat{x}_{MMSE}\|^2 \geq \|y - H\hat{x}_{MLD}\|^2 \quad (14)$$

만약  $\|y - H\hat{x}_{MMSE}\|^2$ 을 상한으로 정하면 QRM-MLD의 수행 중 누적 메트릭의 값이 상한을 초과할 경우 해당 경로를 제거하여 메트릭의 연산 횟수를 줄 일 수 있다. 검출 과정은 다음과 같이 수행된다.

Step1: 수신 신호벡터에 MMSE 가중치 행렬을 곱 해 평균 제곱 오차를 최소화 하는 송신벡터 후보를 추 정한다. 이때  $Q(\cdot)$ 는 hard decision 함수이다.

$$\hat{x}_{MMSE} = Q(Wy) \quad (15)$$

Step2: MMSE로 추정된 송신벡터의 유클리드 거 리를 계산하여 최대 거리로 정한다.

$$MaxDist = \|y - R\hat{x}_{MMSE}\|^2 \quad (16)$$

Step3: QRM-MLD의 각 단계마다 누적 메트릭의 값을 계산하여 최소의 거리를 가지는 M개의 경로 중 최대 거리보다 누적 거리가 큰 경로를 제거한다.

이와 같이  $\hat{x}_{MMSE}$ 의 유클리드 거리가 상한으로 설

정되면 각 단계마다  $M$ 개의 경로에서 추가로 몇 개의 가지를 더 제거 할 수 있다. 예를 들어 제안된 방법을 사용하여 각 단계 마다  $D_i$ 개의 경로를 제거 할 경우 매트릭의 연산횟수는 결과 적으로  $|C|+(M-D_1) \times |C|+(M-D_2) \times |C|+(M-D_3)$ 회 줄어든다.

그림 1에서는 16-QAM인 경우  $M=9$  일 때 연산량을 줄인 QRM-MLD 알고리즘의 장점을 예를 들어 나타내었다. 기존의 QRM-MLD 방식에서는 수신 신호와 유클리드 거리가 작은 아홉 개의 후보벡터가 고려되어야 하나 연산량을 줄인 QRM-MLD검출 에서 MMSE로 검출된 심볼의 유클리드 거리를 상한으로 제한하면 후보벡터가 세 개로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 방법으로 후보벡터의 수를 최대  $M$ 개에서 최소 한 개까지 줄임으로써 경로 매트릭의 연산 횟수를 줄일 수 있다.

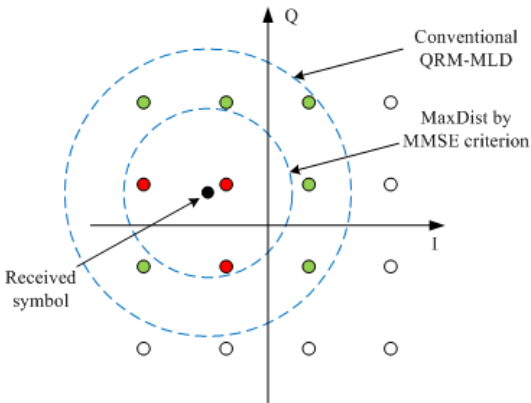


그림 1. 연산량을 줄인 QRM-MLD 검출 방식의 예시 (16-QAM,  $M=9$ )

### 3.2 하이브리드 검출 방식

여기서는 MMSE 검출과 MLD 검출이 모두 QR 분해를 이용하여 수행될 수 있음을 이용하여 채널 상태에 따라 MMSE 검출과 연산량을 줄인QRM-MLD 검출을 선택적으로 적용하는 하이브리드 방식을 제안한다. 제안된 방식에서는 QR 분해된 채널 행렬을 이용하여 역방향 치환 과정을 수행하면서 각 layer 마다 채널 상태를 판별하는 지표를 구한다. 구한 값과 미리 정한 문턱값을 비교하면서 두 가지 방법을 선택적으로 적용하여 신호를 검출한다. 이때  $i$ 번째 layer의 채널 지표는 다음과 같다. 여기서  $E_x$ 는 송신신호의 에너지를 나타낸다.

$$\gamma_i = \frac{E_x \times |r_{i,i}|^2}{E \left[ \sum_{k=i+1}^N |r_{i,k}|^2 \right] + \sigma_n^2} \quad (17)$$

수식(17)은 채널에서 간섭신호와 잡음의 크기를 모두 고려한 것으로 미리 정한 문턱값과 비교하여 검출 방식을 결정하게 된다. 검출과정은 다음과 같다.

Step1: 확장된 채널을 QR 분해하여 Q와 R 행렬을 얻고  $Q^H$ 을 곱해 등가 송수신 모델을 구한다.

Step2: 첫 번째 layer 부터 수식(18)과 같이 역방향 치환 과정을 수행하여 MMSE 추정된 송신벡터를 구하고 수식(16)을 이용하여 유클리드 거리를 계산하여 최대 거리로 정한다.

$$\hat{x}_i = Q \left( \left( \tilde{y}_i - \sum_{k=i+1}^N r_{i,k} x_k \right) / r_{i,i} \right) \quad (18)$$

Step3: 수식(17)을 이용하여 각 layer의  $\gamma_i$ 을 구하고 첫 번째 layer부터 순서대로 문턱값과 비교하여 문턱값을 넘는 layer를 group A, 넘지 못하는 layer를 group B로 분류한다.

Step4: Group A는 MMSE를 적용하고 Group B는 연산량을 줄인 QRM-MLD를 수행하여 송신벡터를 찾는다.

Group A는 간섭이 적은 신뢰도가 큰 심볼이기 때문에 QRM-MLD 방식에 비해 상대적으로 복잡도가 낮은 MMSE를 이용 하여 검출을 수행하고 Group B는 간섭이 많은 신뢰도가 낮은 심볼로 연산량을 줄인 QRM-MLD 방법으로 검출을 수행한다. 하이브리드 방식에서 QR 분해, 역방향 치환은 기존의 MMSE 방식과 동일하며 각 단계 마다  $\gamma_i$ 을 계산하고 문턱값과 비교하는 과정이 포함된다. 만약 모든 단계에서  $\gamma_i$ 가 문턱값을 넘으면 MMSE만으로 검출이 종료되며  $\gamma_i$ 가 문턱값을 넘지 못할 경우 연산량을 줄인 QRM-MLD 방식 만으로 검출을 수행한다.

## IV. 성능 비교 및 분석

### 4.1 모의실험 환경

본 논문은 3GPP LTE 시스템을 기반으로 모의실험

표 1. 모의실험 파라미터

Parameters	Value
Transmission BW	10 MHz
Sampling frequency	15.36 MHz
FFT size	1,024
Subcarrier spacing	15 KHz
Modulation	16 QAM
Number of Tx antennas	$N = 4$
Number of Rx antennas	$L = 4$
Channel environment	Typical Urban6
Channel estimation	Perfect

을 하여 검출 알고리즘에 따라 BER 성능과 연산량을 비교 분석 하였다. 모의실험을 위한 무선통신채널의 다중 경로에 의한 페이딩과 도플러 특성은 여섯 개의 다중 경로를 갖는 Typical Urban 모델과 Jakes 도플러 확산 모델을 통해 발생시켰으며 배경 잡음은 AWGN을 사용한다. 또한 채널 상태 정보는 피드백을 받지 않는 open loop MIMO를 가정하였다. 채널 추정은 완벽하다고 가정하였고 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 페이딩은 상호 독립임을 가정하였다.

4.2 제안된 방식의 성능 비교

여기서는 제안된 하이브리드 방식의 BER 성능과 연산량을 비교 분석한다. 그림 2에서는 문턱값의 크기에 따른 BER 성능을 보여준다. 일정구간 동안 채널

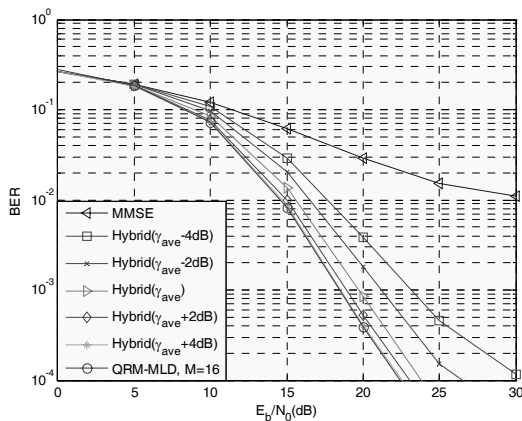


그림 2. 제안된 하이브리드 검출 방식의 문턱값 변화에 따른 BER 비교 ( $E_b/N_0=20$  dB,  $M=16$ )

지표 평균값인  $\gamma_{ave}$  를 기준으로 -4 dB, -2 dB, +2 dB, +4 dB 으로 문턱값을 변화 시키면서 하이브리드 검출 방식의 BER 성능을 측정하였다. 모의실험 결과인 그림2를 살펴보면  $\gamma_{ave}+4dB$ 을 문턱값으로 정할 경우 하이브리드 기법은 기존의 검출 기법인 QRM-MLD와 비교하여 0.1% BER 기준으로 약 0.1 dB의 성능 열화가 있음을 확인 할 수 있다.

제안된 하이브리드 기법은 문턱값을 기준으로 하여 MMSE와 연산량을 줄인 QRM-MLD를 선택적으로 적용하여 신호를 검출하기 때문에 그림 3에서 보는 바와 같이 문턱값이 낮을수록 MMSE 성능에 가까워지고 높을수록 QRM-MLD의 성능에 가까워진다. 그림 3에서는 각 수신 안테나의 SNR이 20 dB로 고정되어 있을 때 문턱값의 변화에 따른 BER을 나타낸다. 문턱값이  $\gamma_{ave}$  보다 약 4.0 dB 높을 경우 QRM-MLD의 성능과 비슷하며  $\gamma_{ave}$  보다 12 dB 이상 낮을 경우 MMSE 성능에 가까운 것을 확인할 수 있다.

다음으로 연산량 비교를 위해 본 논문에서는 표 2와 같이 복소수 연산에 따른 실수 곱셈 연산을 정의 하였고 이것을 통해 검출 방식에 따른 연산량을 계산 하였다.

표 3에서는 본 논문에서 제안한 연산량을 줄인 QRM-MLD와 하이브리드 기법에 대하여 SNR의 변

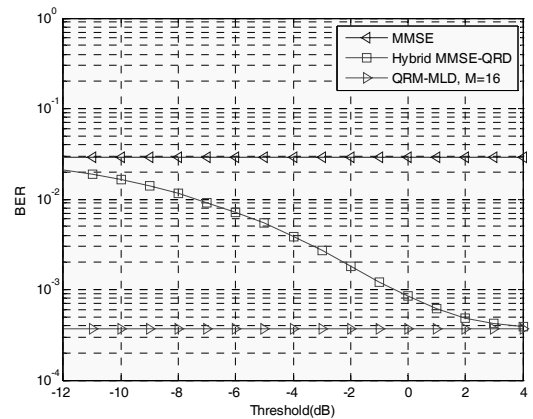


그림 3. 제안된 하이브리드 검출 방식과 기존 기법의 BER 성능 비교

표 2. 복소수 연산에 따른 실수 곱셈 연산

복소수 연산	실수 곱셈 연산
복소수 곱셈	4 ROP
복소수 나눗셈	10 ROP

표 3. 제안된 기법의 상대적인 연산량

SNR(Eb/No) Type	15 dB	20 dB	Performance degradation at 0.1% BER
QRM-MLD (M=16)	100%	100%	-
연산량을 줄인 QRM-MLD	61%	44%	-
MMSE + 연산량을 줄인 QRM-MLD ( $\gamma_{ave}$ )	50%	39%	1.0 dB
MMSE + 연산량을 줄인 QRM-MLD ( $\gamma_{ave} + 2\text{ dB}$ )	53%	40%	0.3 dB
MMSE + 연산량을 줄인 QRM-MLD ( $\gamma_{ave} + 4\text{ dB}$ )	54%	41%	0.1 dB

화에 따른 연산량을 기존의 QRM-MLD와 비교하여 나타내었다. 표 2에서 정의한 실수 곱셈 연산을 기본 단위로 하여 기존의 QRM-MLD의 연산량을 100%라 할 때 각 방식에 따른 상대적인 연산량을 나타내었다. 제안된 방식은 기존의 검출 방식보다 모든 SNR 영역에 대하여 연산량이 감소함을 확인 할 수 있다. 기존 QRM-MLD와 비교하여 연산량을 줄인 QRM-MLD는 SNR이 20 dB일 때 성능의 열화 없이 44%의 연산량으로 신호 검출이 가능하며 하이브리드 기법의 경우 SNR이 20 dB이고 문턱값이  $\gamma_{ave} + 4\text{dB}$ 일 때 기존 QRM-MLD 대비 41%의 연산량으로 신호 검출이 가능함을 확인 하였다. 이때의 성능 열화는 0.1% BER 기준 약 0.1 dB로 성능 열화를 거의 무시 할 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 공간 다중화된 MIMO 신호를 검출하기 위해 연산량을 줄인 QRM-MLD 기법과 하이브리드 기법을 각각 제안하였고 3GPP LTE 하향링크 환경에서 그 성능을 분석하였다. 연산량을 줄인 QRM-MLD는 MMSE검출을 통해 얻어진 후보벡터의 유클리드 거리 값을 상한으로 하여, QRM-MLD의 수행 중 상한 값을 초과하는 후보 벡터의 경로를 제거함으로써 불필요한 연산을 줄일 수 있다. 하이브리드 기법은 연산량을 줄인 QRM-MLD와 MMSE 검출 기법을 결합하여 각 layer의 채널 상태를 판별하는 지표를 미리 정한 문턱값과 비교하면서 두 가지 방법을 선

택적으로 적용하여 신호를 검출한다. 제안된 하이브리드 기법은 문턱값에 따라 연산량과 성능이 상충 관계에 있음을 확인 할 수 있다. 이것은 문턱값이 낮아질수록 MMSE 만으로 검출할 확률이 높아지고 반대로 문턱값이 높아 질수록 QRM-MLD를 이용하여 검출할 확률이 높아지기 때문이다. 이 같은 특성으로 하이브리드 방식 역시 연산량을 줄일 수 있다. 모의실험 결과 연산량을 줄인 QRM-MLD는 SNR이 20dB 일 때, 기존의 QRM-MLD와 동일한 성능을 유지하면서 기존 대비 44%의 연산량 으로 구현 가능함을 확인 하였다. 하이브리드 기법은 문턱값  $\gamma_{ave} + 4\text{dB}$ 을 이용하여 기존의 QRM-MLD와 연산량을 비교할 경우 SNR이 20dB 일 때 기존 대비 41%의 연산량으로 구현 할 수 있고 성능 열화는 0.1% BER 기준으로 약 0.1 dB로 거의 무시 할 수 있는 수치이다. 제안된 방법들은 성능 열화 없이 연산량에 이득을 얻을 수 있기 때문에 하드웨어 크기와 전력소모에 제약이 있는 3GPP LTE 하향링크 단말기의 실제 구현에 있어 장점이 될 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] G.J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas", *Bell laboratories Technical Journal*, Vol.1, No.2, pp.41-59, Oct. 1996
- [2] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 16, No.10, pp.1451-1458, Oct. 1998
- [3] Hozun Sung, Kwang Bok Ed Lee, Jee Woong Kang, "A simplified maximum likelihood detection scheme for MIMO systems", *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th*, Vol.1, 6-9 Oct. 2003 pp.419-423 Vol.1
- [4] 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. of the URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics (ISSSE) 1998*, Pisa, pp.295-300
- [5] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*,

*Principles and Practice*, Prentice-Hall, New Jersey, 1996

- [6] Jiming Chen, Shan Jin, Yonggang Wang, "Reduced Complexity MMSE-SIC Detector in V-BLAST Systems", *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2007. *PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on*, 3-7 Sept. 2007 pp.1-5
- [7] Chin, W.H., Constantinides, A.G., Ward, D.B., "Parallel multistage detection for multiple antenna wireless systems", *Electronics Letters*, Vol.38, Issue12, 6 June 2002 pp. 597-599.
- [8] Jiang Yue, Kyeong Jin Kim, Gibson, J.D., Iltis, R.A., "Channel estimation and data detection for MIMO-OFDM systems", *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE*, Vol.2, 1-5 Dec. 2003 pp.581-585 Vol.2.
- [9] Wubben, D. Bohnke, R. Kuhn, V. Kammeyer, K.-D., "MMSE extension of V-BLAST based on sorted QR decomposition,"  *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th*, Vol.1, 6-9 Oct. 2003 pp.508-512, Vol.1.
- [10] Kawai, H., Higuchi, K., Maeda, N., Sawahashi, M., "Adaptive Control of Surviving Symbol Replica Candidates in QRM-MLD for OFDM MIMO Multiplexing", *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, Vol.24, Issue 6, June 2006 pp.1130-1140

원태윤 (Taeyoon Won)

준회원



2009년 2월 서강대학교 전자공학  
학과  
2009년 3월~현재 서강대학교  
전자공학과 석사과정  
<관심분야> 무선통신 신호처  
리, VLSI 설계

김승환 (Seunghwan Kim)

정회원



2008년 2월 서강대학교 전자공  
학과  
2010년 2월 서강대학교 전자공  
학과 석사  
2010년 3월~현재 삼성전자  
DMC  
<관심분야> 무선통신 신호처  
리, VLSI 설계

이진용 (Jinyong Lee)

정회원



1999년 2월 서강대학교 물리  
학과  
2005년~2007년 서강대학교 전  
자공학과 석사  
2007년 9월 현재 서강대학교  
전자공학과 박사과정  
<관심분야> VLSI 설계를 위한  
DSP알고리즘, 무선통신 신  
호처리

김영록 (Younglok Kim)

정회원



1991년 2월 서강대학교 전자공  
학과 학사  
1991년~1998년 Polytechnic  
Univ., NY, USA  
1999년~2003년 Inter Digital  
Comm. Corp., NY, USA 연  
구원  
2003년~현재 서강대학교 전자  
공학과 부교수

<관심분야> VLSI 설계를 위한 DSP 알고리즘,  
레이다 및 무선통신 신호처리