다중 입출력 시스템을 위한 효율적인 최대 우도 검출

박기홍*¹, 임형용*², 윤동원**

Efficient Maximum Likelihood Detection for the MIMO System

Gihong Park*¹, Hyeongyong Lim*², and Dongweon Yoon**

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(NRF-2014R1A2A1A11052701).

요 약

다중 입출력(MIMO, Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에서 최대 우도(ML, Maximum Likelihood) 검출은 최적 검출 방식이지만, 다중 입출력 시스템의 차원이나 변조 차수가 커질수록 계산 복잡도가 지수적으로 증가하여 실제 구현이 불가능한 문제점이 있다. 메트릭 궤환 검출(MFD, Metric Feedback Detection)은 적응적 임계값을 이용하여 낮은 계산 복잡도로 ML 검출이 가능한 알고리즘이다. 만일, MFD의 임계값 계산 레이어를 채널 송수신 환경에 따라 가변하면 알고리즘의 효율성을 더 높일 수 있다. 본 논문에서는 MFD에 후보군 클리핑과 레이어 가변 기법 두 가지 방식을 적용하여, ML 검출에 준하는 비트 오류율(BER, Bit Error Rate) 성능을 유지하면서 계산 복잡도는 감소시키는 효율적인 방법을 제안하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증한다.

Abstract

In multiple-input multiple-output (MIMO) systems, maximum likelihood (ML) detection is an optimal detection method. However, there is a problem for actual implementation since the computational complexity increases exponentially as the dimension of the MIMO systems or the modulation order becomes large. Metric Feedback Detection (MFD) is a detection algorithm which can perform ML detection with the low computational complexity through using the adaptive threshold. If the threshold calculation layer in MFD is changed according to the channel environment, the efficiency of the algorithm can be more increased. In this paper, we propose an efficient algorithm, which has the similar error performance to the ML detection, by applying clipping and adaptive layer techniques into the MFD in order to reduce the computational complexity. We verify the algorithm via computer simulation.

Keywords

adaptive layer, metric feedback detection, ML detection, MIMO systems, QRD-M detection

* 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과
- ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0003-2139-4099>
- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0002-4920-1837>
** 한양대학교 융합전자공학부 교수(교신저자)
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9631-3500>

· Received: Sep. 21, 2017, Revised: Oct. 16, 2017, Accepted: Oct. 19, 2017
· Corresponding Author: Dongweon Yoon
Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro,
Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea
Tel.: +82-2-2220-0362, Email: dwyoon@hanyang.ac.kr

I. 서 론

다중 입출력 시스템(MIMO, Multiple-Input Multiple-Output)은 송신 전력과 대역폭의 손실 없이 대용량의 데이터를 고속으로 전송할 수 있는 특성 때문에 현대 사용되는 많은 고속 무선통신 시스템에 표준(Mobile WIMAX, 3GPP Long Term Evolution, Wi-Fi, and IMT-Advanced)으로 채택되어 있으며, 특히 Massive-MIMO 기술은 5G 이동 통신의 핵심 기술로 자리매김하고 있다[1]-[7].

MIMO 시스템에서는 최대 우도(ML, Maximum Likelihood) 검출이 비트 오류율(BER, Bit Error Rate)을 최소화하는 최적 검출 방법으로 알려져 있지만, 송수신 안테나의 사이즈 및 변조차수가 높아짐에 따라, 계산 복잡도가 지수적으로 증가해 실제 구현이 불가능한 단점이 있다[8]. 따라서 QR 분해를 이용한 Depth-First 탐색 기반 SD(Sphere Decoding)와 근사 ML 검출 알고리즘인 Breadth-First 탐색 기반 QRD(QR Decomposition)-M 검출 알고리즘이 활발히 연구가 되어 왔다[9]-[25].

SD는 수신 신호벡터를 중심으로 반경 r 의 구체 안에 위치한 후보 심볼 벡터만 고려하는 검출 기법으로, 가장 가까운 위치의 후보 심볼 벡터를 검출함에 따라 ML 검출과 같은 BER 성능을 보인다[9]. 하지만 초기 반경 r 의 설정 기준이 정해지지 않아, 수신 신호 대비 잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)에 따른 통계적인 특성 또는 경험적인 방법으로 r 을 설정하는 것이 보통이다. 따라서 후보 심볼 벡터가 하나도 찾아지지 않거나, 너무 많은 후보 심볼 벡터가 탐색되는 경우가 발생한다[10]-[15]. 전자는 r 을 키워 SD 알고리즘을 처음부터 다시 수행해야 하며, 후자는 필요이상으로 탐색된 후보 심볼 벡터로 인해 효율성이 떨어지는 단점이 있다[10]-[15].

그에 반해 QRD-M 검출 기법은 각 검출 레이어마다 M 개의 후보 심볼을 선택하는 알고리즘으로서 항상 후보 심볼이 선택되기 때문에 재탐색을 수행해야 할 필요가 없으며, M 이 증가할수록 ML 검출의 BER 성능에 근접하는 특징을 가진다[17]. 하지만, 매 검출 레이어마다 ML 검출의 해가 보장되지 않기 때문에 준 최적 검출 알고리즘으로 불리며, 각 검출 레이어마다 고정적으로 M 개의 후보

심볼을 선택하기 때문에 채널 환경이나 SNR이 좋은 상황일 때는 필요 이상의 후보 심볼들을 탐색하게 되어 효율성이 떨어지는 단점도 가지고 있다.

메트릭 궤환 검출(MFD, Metric Feedback Detection)은 각 검출 레이어마다 채널 환경에 따른 임계값을 계산하여 생존 후보 심볼의 개수를 가변적으로 설정하는 알고리즘으로서, 위에서 설명한 QRD-M의 단점을 보완하면서 최소 계산 복잡도로 ML 검출과 같은 BER 성능을 가진다[23].

본 논문에서는 각 검출 레이어마다 최대 심볼 수를 제한하여 불필요한 계산을 줄이는 후보군 클리핑[24]을 적용하며, 또한 Breadth-First 알고리즘 기반 MFD에 Depth-First 알고리즘인 SD를 접목시켜 MFD의 임계값 계산 레이어를 가변적으로 선택하는 레이어 가변을 적용하여 MFD 알고리즘의 BER 성능을 유지하면서 계산 복잡도를 더욱 낮추는 방안을 제시하고 컴퓨터 모의실험을 통해 검증한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 기존 QRD-M 검출 기법과 MFD 알고리즘을 설명하고, 3장에서는 후보군 클리핑 및 제안하는 레이어 가변 기법을 설명하고 적용한다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 BER 성능과 계산 복잡도를 분석하며 마지막 5장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

일반적으로 MIMO 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (1)에서 N_t 개의 송신 안테나와 N_r 개의 수신 안테나로 이루어져 있다고 가정했을 때, $\mathbf{y}$ 는 $N_r \times 1$ 벡터가 되고, $\mathbf{H}$ 는 $N_r \times N_t$ 채널 행렬, $\mathbf{x}$ 는 $N_t \times 1$ 심볼벡터, $\mathbf{n}$ 는 $N_r \times 1$ 백색 가우시안 잡음 벡터가 되며 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 의 공분산 행렬을 가진다.

완벽한 채널 추정을 통해 $\mathbf{H}$ 에 대한 모든 정보를 알고 있다고 가정했을 때, MIMO 시스템의 ML 검출은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{x}}_{ML} = \arg \min_{\mathbf{x} \in \Phi} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 \quad (2)$$

여기서 Φ^{N_t} 는 N_t 개의 송신 안테나의 K 진 변조 심볼 벡터 집합이다. 수신단에서 ML 검출을 통해 가장 최적의 송신 벡터를 찾기 위해서는 변조 차수와 송신 안테나의 개수에 따른 K^{N_t} 개의 후보 벡터들을 모두 탐색해야한다. 따라서 송신 안테나와 변조 차수가 커질수록 계산 복잡도가 지수적으로 증가하여 실제 구현이 힘들어진다.

계산 복잡도를 줄이기 위해 제안된 QRD-M은 QR 분해 기반으로 계산 복잡도를 낮추어 줄 수 있는 근사 ML 알고리즘이다. QRD-M 알고리즘이 ML 검출에 근접하는 BER 성능을 내기 위해서는 M 값을 크게 설정해야 하는데 이는 계산복잡도의 증가를 야기한다. QRD-M 알고리즘의 원리는 다음과 같다. 우선 채널 행렬 $\mathbf{H}$ 를 QR 분해를 이용하여 $\mathbf{H}=\mathbf{Q}\mathbf{R}$ 로 분해한다. 이 때, $\mathbf{Q}$ 는 $\mathbf{Q}^H\mathbf{Q}=\mathbf{I}$ 를 만족하는 유니터리 행렬이고 $\mathbf{R}$ 은 $N_r \times N_t$ 상삼각행렬이 된다[26]. $\mathbf{Q}^H$ 를 식 (1)의 양변에 곱하여 정리하면 아래와 같이 식이 변형된다.

$$\mathbf{z}=\mathbf{Q}^H\mathbf{y}=\mathbf{R}\mathbf{x}+\mathbf{w} \quad (3)$$

$\mathbf{w}$ 는 변화된 백색 가우시안 잡음벡터이며 $\mathbf{Q}$ 가 유니터리 행렬이기 때문에, $\mathbf{w}$ 는 $\mathbf{n}$ 과 같은 통계적 특성을 가진다.

$N_r \geq N_t$ 일 때, (3)은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} z_1 &= n_1 + r_{1,N_t} \cdot x_{N_t} + \dots + r_{1,2} \cdot x_2 + r_{1,1} \cdot x_1 \\ z_2 &= n_2 + r_{2,N_t} \cdot x_{N_t} + \dots + r_{2,2} \cdot x_2 \\ &\vdots \\ z_{N_t} &= n_{N_t} + r_{N_t,N_t} \cdot x_{N_t} \end{aligned} \quad (4)$$

QRD-M 검출은 하나의 심볼로 이루어진 채널행렬의 N_t 번째 행, 즉 x_{N_t} 에 대해서 시작하여 x_{N_t} 까지 이루어지며, 누적 제곱 유클리드 거리(SED, Squared Euclidean Distance)를 검출 메트릭으로 사용한다. 첫 번째 검출 레이어에서 SED는 아래와 같다.

$$\{d_{k,1}^{(1)}\}^2 = |z_{N_t} - r_{N_t,N_t} \cdot s_k|^2 \quad (5)$$

이어서 확장된 i 번째 ($i \geq 2$) 검출 레이어에서

후보 심볼 s_k 의 누적 SED는 $(i-1)$ 번째의 생존 후보 심볼에 영향을 받게 되며, 그 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \{d_{k,m}^{(i)}\}^2 &= \sum_{p=1}^i |z_{N_t-p+1} - r_{N_t-p+1,N_t-p+1} \cdot s_k \\ &\quad - \sum_{q=N_t-p+2}^{N_t} r_{N_t-p+1,q} \cdot \hat{x}_{m|N_t-q+1}|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $k=1,2,\dots,K$, $m=1,2,\dots,M$, $i=1,2,\dots,N_t$ 이며, $\hat{x}_{m|t}$ 는 t 번째 검출 레이어에서 선택된 m 번째 후보 심볼이다.

QRD-M은 각각의 검출레이어마다 (5), (6)를 이용하여 누적 SED를 계산하고, 그 중 작은 M 개를 생존 후보 심볼로서 선택하고 나머지는 버리며, 다음 검출 레이어로 확장하는 과정을 반복하는 알고리즘이다. 결과적으로 N_t 번째 검출 레이어에서, 최소 메트릭을 가지는 심볼 벡터가 선택이 된다.

이에 반해, MFD는 채널 환경에 따라 가변적으로 후보 심볼을 선택하는 방법으로, 매 검출 레이어마다 고정적으로 M 개의 후보 심볼을 선택하는 QRD-M에 대해 계산 복잡도는 획기적으로 줄이고 BER 성능은 ML 검출 기법에 준하는 Breadth-First 기반 알고리즘이다.

MFD는 기존 QRD-M과 같이 QR 분해를 기초로 하며, 식 (3)까지는 동일한 과정을 수행한다. 그 다음 신호 검출 과정은, i 번째 검출 레이어에서 임계값을 계산하는 과정과 임계값을 이용하여 후보 심볼들을 선택하는 과정으로 정리된다. 이 때, 각 검출 레이어마다 후보 심볼을 가변적으로 선택하기 위해 새로운 변수 $D \in \{1,2,\dots,N_t-1\}$ 를 정의한다. D 는 임계값 계산을 위해 추가적으로 계산하는 레이어의 수를 의미한다. 임계값은 각 i 번째 검출 레이어에서 $(i+D)$ 번째 레이어의 SED 계산을 통해서 구해지며, 총 레이어의 수가 N_t 가 되므로 임계값 계산은 $\min\{N_t, i+D\}$ 번째 레이어에서 수행된다.

각 i 번째 검출 레이어에서 임계값은 다음 수식을 통해 계산된다.

$$T_{MFD}^{(i)} = \min_{k, m} \{d_{k, m}^{(i)}\}^2 \quad (7)$$

$$+ \sum_{d=i+1}^{\min(N_t, i+D)} \min_k |z_{N_t-d+1} - r_{N_t-d+1, N_t-d+1} \cdot s_k$$

$$- \sum_{q=N_t-d+2}^{N_t} r_{N_t-d+1, q} \cdot \hat{x}_{m|N_t-q+1}|^2$$

여기서 $m = 1, 2, \dots, M^{(i-1)}$, $i = 1, 2, \dots, N_t - 1$ 이며, $M^{(i-1)}$ 은 $(i-1)$ 번째 검출 레이어에서 생존 후보 심볼의 개수를 나타낸다. i 번째 레이어에서의 임계값은, i 번째 레이어에서의 최소 메트릭을 시작으로 추가적으로 고려되는 각 $\min\{D, N_t - i\}$ 개의 레이어에서 최소 메트릭을 가진 후보 심볼만 생존시키며 계산된 누적 SED로 정해진다.

$\min\{N_t, i+D\}$ 번째 레이어에서 임계값 계산을 마친 다음, i 번째 레이어로 다시 돌아와서 임계값보다 작은 후보 심볼들을 생존시키고 $(i+1)$ 번째 검출 레이어로 확장한다. 마지막 N_t 번째 검출 레이어에 도달했을 때에는 가장 누적 SED가 작은 후보 심볼 벡터를 최종 검출 신호로 결정한다. 임계값의 설정에 따라 선택되는 후보 심볼이 달라지기 때문에, 임계값은 BER 성능과 계산 복잡도를 결정하는 요소가 된다.

MFD는 D 를 최대로 설정했을 때, breadth-first 탐색 알고리즘의 최소 계산 복잡도를 가지면서 ML 신호 검출과 동일한 BER 성능을 보인다. 하지만 채널 환경이 좋지 않을 때, 계산되는 큰 임계값에 계산량이 과다해지는 경우가 발생한다. 이어지는 절에서는 MFD 알고리즘의 BER 성능을 최적으로 유지하며 계산 복잡도를 낮출 수 있는 클리핑 방법과 레이어 가변 기법을 설명하고 MFD에 적용한다.

III. 후보군 클리핑 및 레이어 가변 기법

3.1 i 번째 검출 레이어의 후보군 클리핑 방법

MFD 알고리즘은 좋은 채널 환경에서는 고신뢰도 후보군의 SED 값이 다른 후보군들의 SED에 비해 비교적 작기 때문에, QRD-M 검출 알고리즘의 $M=1$ 일 때의 계산 복잡도로 ML 검출과 동일한

BER 성능을 가진다. 하지만 채널 환경이 좋지 않은 상황에서는 불필요한 후보 심볼들이 기존 QRD-M 검출 알고리즘보다 많이 선택되어 계산 복잡도가 증가하게 된다.

따라서 불필요한 계산을 줄이기 위해 각 검출 레이어에서 후보 심볼의 개수를 클리핑하는 방법이 제안되었다[24]. MFD 알고리즘의 매 검출 레이어의 후보 심볼을 선택하는 과정에서 후보군 클리핑 수 C 를 QRD-M 검출 알고리즘에 각각 대응되는 M 으로 설정하면, 해당하는 QRD-M과 동일한 BER 성능을 유지하며 계산 복잡도를 큰 폭으로 낮출 수 있으며, 특히, 2×2 MIMO 시스템에서 $M=K$ 일 때는, ML 검출과 동일한 BER 성능을 가진다.

3.2 임계값 계산에서의 레이어 가변 기법

QR 분해를 기반으로 한 MFD 알고리즘은 임계값을 이용하여 후보 심볼을 선택하는 알고리즘이며 그 값에 따라서 BER 성능과 계산 복잡도가 결정된다. 임계값은 추가적으로 고려되는 레이어의 수 D 에 따라 결정되며, 레이어 가변 기법은 송수신 환경에 따라 MFD의 임계값을 선택하는데 있어 D 를 적응적으로 결정하는 알고리즘으로 BER 성능은 유지하면서 계산 복잡도를 더 낮출 수 있는 방법이다.

레이어 가변 기법에서 임계값 $T^{(i)}$ 는 다음과 같다.

$$R = 2\sigma^2 N_t - \mathbf{y}^* (\mathbf{I} - \mathbf{H}(\mathbf{H}^* \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^*) \mathbf{y} \quad (8)$$

$$T^{(i)} = \min \{T_{MFD}^{(i)}, R\} \quad (9)$$

위 식의 R 는 채널 환경의 통계적 특성을 기반으로 구해진 임계값이며, $T_{MFD}^{(i)}$ 는 MFD의 i 번째 검출 레이어 임계값이다. 식 (9)에 따라 결정되는 $T^{(i)}$ 로 인해 임계값이 변화되며, 이는 D 가 채널 환경에 따라 적응적으로 변하는 효과를 가져온다. 결과적으로 MFD알고리즘의 계산 복잡도에 이득을 취하며 BER 성능을 그대로 유지할 수 있다.

3.3 후보군 클리핑 및 레이어 가변 기법을 적용한 MFD 알고리즘

두 가지 방식을 적용한 MFD 알고리즘은 다음과 같다.

MFD algorithm with clipping and adaptive layer techniques

Step 1. Perform QR-decomposition on $\mathbf{H}$ and calculate $\mathbf{Z}$.

Step 2. Calculate $T^{(i)}$ using (6)-(9) in the i th layer.

Step 3. Calculate $\{d_{k,m}^{(i)}\}^2$ using (6) and select branches that satisfy $\{d_{k,m}^{(i)}\}^2 \leq T^{(i)}$. If there is no selected branch, four times R and go to "Step 2" and restart from the first layer.

Step 4. Select C branches with the smallest metrics.

Step 5. Repeat "Steps 2-5" in the next layer until the current layer is the last one.

Step 6. If the current layer is the last layer, choose the symbol whose metric is the minimum in the branches.

IV. BER 성능 및 계산 복잡도 분석

이 장에서는 MIMO 시스템에서 레이어 가변 및 후보군 클리핑 방법을 적용한 MFD 알고리즘의 BER 성능과 계산 복잡도를 기존 QRD-M 알고리즘과 비교하고 분석한다. 시뮬레이션 환경은 정방형 QAM 변조방식과 평탄 페이딩 채널 및 가산성 백색 가우시안 잡음을 가정했으며, 하나의 채널은 N_t 개의 송신 안테나와 N_r 개의 수신 안테나를 고려해 $N_r \times N_t$ 의 크기를 가진다. 계산 복잡도는 검출 수행 동안의 평균 SED 계산 횟수를 고려하며, 시뮬레이션은 최소 10^7 개의 비트에 대해 검출을 수행한다.

그림 1, 2 및 그림 3, 4는 4×4 MIMO 시스템에서 4-QAM 및 16-QAM에서 후보군 클리핑과 레이어 가변 기법을 적용한 MFD와 기존 QRD-M의 BER 성능과 계산 복잡도를 비교한 그래프이다. ML 검출 성능과 비교하기 위해 $D=3$ 으로 설정했으며 각 후보군 클리핑 수 C 에 대해 그래프를 도출하였다.

그림 1. 4×4 MIMO 시스템에서 4-QAM의 BER성능($D=3$)
Fig. 1. BER performances for 4×4 MIMO system with 4-QAM($D=3$)

그림 2. 4×4 MIMO 시스템에서 16-QAM의 BER성능($D=3$)
Fig. 2. BER performances for 4×4 MIMO system with 16-QAM($D=3$)

그림 3. 4×4 MIMO 시스템에서 4-QAM의 평균 SED계산 횟수($D=3$)

Fig. 3. Average number of SED calculations for a 4×4 MIMO system with 4-QAM($D=3$)

그림 4. 4×4 MIMO 시스템에서 16-QAM의 평균 SED 계산 횟수(D=3)

Fig. 4. Average number of SED calculations for a 4×4 MIMO system with 16-QAM(D=3)

그림 1과 그림 2를 통해 4×4 MIMO 시스템에서 두 가지 방식을 적용한 MFD는 $C=M$ 인 경우의 QRD-M과 비슷한 BER 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 특히, 그림 1에서 $C=4$ 및 그림 2에서 $C=16$ 일 때의 BER 성능은 ML 검출의 BER 성능과 거의 동등함을 보인다. 그림 3과 그림 4는 각 C 와 M 에 따른 각 알고리즘의 계산 복잡도를 나타내는 그래프이다.

그림 3과 그림 4에 ML 검출은 SED 계산 횟수가 4-QAM 일 때 $4^4 = 256$, 16-QAM 일 때 $16^4 = 65536$ 이므로 비교 대상인 MFD와 QRD-M의 계산 복잡도보다 월등히 큰 것이 명백하여 도식화하지 않았다. 두 가지 방식을 적용한 MFD의 계산 복잡도는 SNR이 증가 할수록 $M=1$ 인 QRD-M 계산 복잡도에 수렴하는 것을 알 수 있고, SNR이 좋지 않은 상황인 0dB 부분에서 각 대응되는 M 의 QRD-M과 큰 차이를 보이며 낮은 계산 복잡도를 가지는 것을 확인하였다.

또, 그림 3과 그림 4의 ML 검출에 준하는 BER 성능을 가지는 $C=4$ 일 때의 4-QAM과 $C=16$ 일 때의 16-QAM을 0dB에서 정량적으로 비교했을 때, QRD-M대비 4-QAM에서는 73.1%, 16-QAM에서는 53.8%의 계산 복잡도를 가졌다. 따라서 변조 차수가 증가할수록 후보군 클리핑 및 레이어 가변 기법을 적용한 MFD의 QRD-M에 대한 계산 복잡도의 이득이 커지는 것을 확인 할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 MIMO 시스템에서 MFD 알고리즘에 후보군 클리핑 및 레이어 가변 기법을 적용하여 BER 성능은 ML 검출에 준하며 계산 복잡도를 낮추는 방안을 제시하였다. 두 가지 방법이 적용된 MFD는 SNR이나 채널 환경이 좋은 상황일 때는 레이어 가변 기법이 적용된 MFD를 이용하여 효율적으로 후보 심볼을 탐색하며, 반대로 SNR이나 채널 환경이 좋지 않은 상황일 때에는 후보 심볼을 제한하여 신뢰도가 낮은 후보 심볼들을 제거한다. 결과적으로 기존 MFD에서 필요없는 계산을 최소화하여 보다 낮은 계산 복잡도로 ML 검출에 준하는 BER 성능을 가질 수 있었다.

특히, 제안하는 방식은 변조 차수가 높아질수록 계산 복잡도의 이득이 커지는 현상을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 이는 제안하는 방식이 적용된 MFD가 고차변조를 이용하는 MIMO 시스템에서 낮은 계산 복잡도로 최적 검출에 준하는 알고리즘으로 사용 될 수 있으며, 더 많은 계산을 요구하는 연판정 복조에도 적용 될 수 있음을 의미한다.

References

- [1] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels", European Trans. Telecommun., 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 Personal Commun., Vol. 6, No. 3, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [3] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications", IEEE Standard 802.11-2012, IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, 2012.
- [4] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Long Term Evolution (LTE) physical layer; General description (Release 8), 3GPP TS

36.201 V8.0.0 (2007-09), 2007.

- [5] "Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, IEEE Standard 802.16-2009", IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society LAN MAN Standards Committee, 2009.
- [6] S. Parkvall, A. Furuskar, and E. Dahlman, "Evolution of LTE toward IMT-advanced", IEEE Commun. Mag., Vol. 49, No. 2, pp. 84-91, Feb. 2011.
- [7] J. Kim, C. Mun, and C. Jung, "Analysis on the characteristics of rician fading in massive MIMO systems", Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 13, No. 5, pp. 43-48, May 2015.
- [8] G. D. Forney, "Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference", IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 18, No. 3, pp. 363-378, May 1972.
- [9] M. Pohst, "On the computation of lattice vectors of minimal length, successive minima and reduced bases with applications", ACM SIGSAM Bulletin, Vol. 15, No. 1, pp. 37-44, Feb. 1981.
- [10] U. Fincke and M. Pohst, "Improved methods for calculating vectors of short length in a lattice, including a complexity analysis", Math. of Comput., Vol. 44, No. 170, pp. 463-471, Apr. 1985.
- [11] B. Hassibi and H. Vikalo, "On the expected complexity of sphere decoding", in Proc. 35th Asilomar Conf. Signals, Syst., Comput., pp. 1051-1055, Pacific Grove, CA, Nov. 2001.
- [12] E. Agrell, T. Eriksson, A. Vardy, and K. Zeger, "Closest point search in lattices", IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 48, No. 8, pp. 2201-2214, Aug. 2002.
- [13] M. O. Damen, H. El Gamal, and G. Caire, "On maximum-likelihood detection and the search for the closest lattice point", IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 49, No. 10, pp. 2389-2402, Oct. 2003.
- [14] J. Koo, J. Kim, Y. Kim, and J. Kim, "A parallel sphere decoder algorithm for high-order MIMO system", Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 51, No. 5, pp. 11-19, May 2014.
- [15] T. Huynh, J. Cho, J. Kim, and W. Cho, "Sphere decoding algorithm and VLSI implementation using two-level search", The Institute of Electronics Engineers of Korea - Semiconductor and Devices, Vol. 45, No. 6, pp. 104-110, Jun. 2008.
- [16] K. J. Kim and R. A. Iltis, "Joint detection and channel estimation algorithms for QS-CDMA signals over time-varying channels", IEEE Trans. Commun., Vol. 50, No. 5, pp. 845-855, May 2002.
- [17] Y. Dai, S. Sun, and Z. Lei, "A comparative study of QRD-M detection and sphere decoding for MIMO-OFDM systems", in Proc. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC), Berlin, Germany, pp. 186-190, Sep. 2005.
- [18] K. J. Kim, J. Yue, R. A. Iltis, and J. D. Gibson, "A QRD-M/Kalman filter-based detection and channel estimation algorithm for MIMO-OFDM systems", IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 4, No. 2, pp. 710-721, Mar. 2005.
- [19] B. M. Hochwald and S. ten Brink, "Achieving near-capacity on a multiple antenna channel", IEEE Trans. Commun., Vol. 51, No. 3, pp. 389-399, Mar. 2003.
- [20] H. Vikalo, B. Hassibi, and T. Kailath, "Iterative decoding for MIMO channels via modified sphere decoding", IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 3, No. 6, pp. 2299-2311, Nov. 2004.
- [21] R. Wang and G. B. Giannakis, "Approaching MIMO channel capacity with soft detection based on hard sphere decoding", IEEE Trans. Commun., Vol. 54, No. 4, pp. 587-590, Apr. 2006.

- [22] H. Lim, Y. Jang, T. Li, and D. Yoon, "Improved QRD-M algorithm based on adaptive threshold for MIMO systems", in Proc. 6th Int. Conf. Communication Systems and Networks, Bangalore, India, pp. 1-4, Jan. 2014.
- [23] H. Lim, G. Park, and D. Yoon, "On the maximum likelihood detection for MIMO systems: Metric Feedback Detection", to appear in Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 54, No. 11, Nov. 2017.
- [24] H. Lim, G. Park, and D. Yoon, "Clipping method for adaptive QRD-M detection", to appear in Proc. 8th Int. Conf. ICT Convergence, Jeju, Korea, Oct. 2017.
- [25] J. Lee, H. Lim, and D. Yoon, "Soft-decision detection for iterative MIMO systems", Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 15, No. 6, pp. 45-51, Jun. 2017.
- [26] D. Kincaid and W. Cheney, "Numerical Analysis: Mathematics of Scientific Computing", 3rd ed. American Mathematical Society, 2002.

저자소개

박 기 홍 (Gihong Park)

2017년 2월 : 한양대학교
융합전자공학부(공학사)
2017년 3월 ~ 현재 : 한양대학교
전자컴퓨터통신공학과
(석박사통합과정)
관심분야 : 통신이론, 무선 및 이동
통신 시스템

임 형 용 (Hyeongyong Lim)

2012년 2월 : 한양대학교
전자통신컴퓨터공학부(공학사)
2012년 3월 ~ 현재 : 한양대학교
전자컴퓨터통신공학과
(석박사통합과정)
관심분야 : 디지털 및 무선 통신
이론, 통계 신호 처리

윤 동 원 (Dongweon Yoon)

1989년 2월 : 한양대학교
전자통신공학과(공학사)
1992년 2월 : 한양대학교
전자통신공학과(공학석사)
1995년 8월 : 한양대학교
전자통신공학과(공학박사)
2017년 10월 현재 : 한양대학교

융합전자공학부 교수
관심분야 : 무선통신, 위성 및 우주통신, 신호정보