

MIMO 시스템에서 낮은 복잡도를 지니는 QRD-M

서성일*

Reduced Complexity QRD-M in MIMO System

Sung-Il Seo*

요약

본 논문은 최근 이동통신 시스템에서 핵심 기술중에 하나인 Multiple Input Multiple Output (MIMO) 시스템에서 기존의 매우 높은 복잡도를 지니는 QR Decomposition-M Algorithm (QRD-M)의 복잡도를 낮추기 위한 신호 검출 기법을 제안한다. 제안된 QRD-M은 계산된 threshold보다 큰 누적 Euclidean 거리를 지니는 후보군을 제거한다. 또한, threshold 계산과 후보군 제거시 시스템에 사용된 변조 차수와 송신 안테나의 개수를 고려함으로써 기존의 QRD-M 대비 오류 성능의 손실을 최소화한다. 제안된 QRD-M은 기존의 QRD-M 대비 매우 낮은 복잡도를 지니며, 오류 성능 또한 동일하다.

Key Words : MIMO, QRD-M

ABSTRACT

This letter proposes a reduced complexity QR Decomposition-M Algorithm (QRD-M) scheme for signal detection in MIMO systems which are core technology in recent mobile communication systems. To reduce the complexity, the proposed QRD-M eliminates symbols of the candidate which are larger than the calculated threshold. Also, the proposed QRD-M considers the used modulation order and the number of transmit antennas when it calculates the threshold and removes the symbols of the candidate and these algorithms minimize any loss of the error performance compared to a conventional QRD-M.

The simulation results show that the complexity of the proposed QRD-M is very low compared to the conventional QRD-M and the error performance of the proposed QRD-M is the same as the conventional QRD-M.

I. 서론

Multiple Input Multiple Output (MIMO) 시스템은 기존의 Single Input Single Output (SISO) 시스템에 비해 추가적인 대역폭과 전력이 없이도 더욱 고속의 통신 시스템을 구축할 수 있다. 그러나 MIMO 시스템의 단점 중에 하나는 송수신 안테나의 개수가 많을 때, 수신기에서 정확한 신호 검출을 위해 알고리즘의 복잡도가 매우 높아 고급 신호 처리 기술이 요구된다는 것이다. MIMO 시스템에서 여러 신호 검출 기법 중, QR Decomposition-M Algorithm (QRD-M) 검출 기법은 Maximum Likelihood (ML) 검출 기법과 유사한 성능을 지니면서 매우 낮은 복잡도를 지닌다^[1]. QRD-M은 각 layer에서 누적 Euclidean 거리를 계산함으로써 M 개의 심볼을 후보군으로 선정하고, 최하위 단에서 가장 작은 누적 Euclidean 거리에 해당하는 후보군 경로를 최종적인 송신 신호로 추정한다^[2]. 그러나 QRD-M은 송수신 안테나의 개수, 변조 차수 그리고 각 layer에서의 후보군 개수 M 이 높을수록 그 복잡도가 지수적으로 증가한다. 특히 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) 이상의 변조가 사용될 경우, 더욱 그러하다. 따라서 본 논문에서는 낮은 복잡도의 QRD-M을 제안하는데, 이는 기존의 QRD-M과 달리 각 layer에서 임시적으로 선정된 M 개의 후보군 중에서 계산된 threshold보다 큰 누적 Euclidean 거리를 지니는 후보군을 제거함으로써 복잡도를 낮춘다. 또한, 송신 안테나의 개수가 많고 변조 차수가 높을 때에는 오류 성능의 손실을 최소화하기 않기 위해 threshold 계산과 후보군 제거시 송신 안테나 개수와 변조 차수를 고려한 방법을 이용한다.

II. MIMO 시스템 모델

본 논문에서는 무선 채널 환경에서 N_t 개의 송신 안테나와 N_r 개의 수신 안테나로 구성된 MIMO 시스템을 고려한다. 비선형적 페이딩 채널 환경을 가정하면,

* First Author : Honam University Department of Electrical Engineering, siseo88@naver.com, 정회원
논문번호 : KICS2017-05-159, Received May 30, 2017; Revised August 25, 2017; Accepted August 25, 2017

MIMO 수신 심볼 벡터 \mathbf{Y} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{Z}. \quad (1)$$

여기서 \mathbf{X} 는 $N_t \times 1$ 의 송신 심볼 벡터, \mathbf{H} 는 $N_r \times N_t$ 의 채널 행렬, \mathbf{Z} 는 $N_r \times 1$ 의 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 Additive White Gaussian Noise (AWGN) 벡터를 나타낸다.

III. 제안된 QRD-M 검출 기법

제안된 QRD-M은 기존의 QRD-M과 마찬가지로 채널 행렬 \mathbf{H} 를 QR 분해 함으로써 시작한다.

$$\mathbf{H} = \mathbf{Q}\mathbf{R}. \quad (2)$$

여기서 \mathbf{Q} 는 $N_r \times N_r$ 크기의 정규 직교행렬, \mathbf{R} 은 $N_r \times N_t$ 크기의 상삼각행렬을 나타낸다. 정규 직교행렬의 영향력을 제거하기 위해 식 (1)의 양변 좌측에 \mathbf{Q}^H 을 곱하면, 다음과 같다.

$$\mathbf{V} = \mathbf{Q}^H \mathbf{Y} = \mathbf{Q}^H (\mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{Z}) = \mathbf{R}\mathbf{X} + \bar{\mathbf{Z}}. \quad (3)$$

여기서 $(\cdot)^H$ 는 켈레 전치 연산자를 나타내고, $\bar{\mathbf{Z}} = \mathbf{Q}^H \mathbf{Z}$ 로써 \mathbf{Z} 와 통계적 특성이 동일한 새로운 잡음 벡터를 나타낸다. 표현의 편의를 위해 송수신 안테나의 개수가 같다고 가정하고 이를 N 이라 표현하면, \mathbf{R} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1N} \\ 0 & r_{22} & \cdots & r_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_{NN} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

신호 검출을 위해 N 번째 layer에서 v_N 과 k 번째 reference 심볼 c_k 와의 Euclidean 거리 $e_{N,k}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$e_{N,k} = |v_N - r_{Nk}c_k|^2. \quad (5)$$

디지털 변조의 성상도 크기를 L 이라 하고, 식 (6)의 모든 k 에 대한 결과를 $\mathbf{e}_N = [e_{N,1} \ e_{N,2} \ \cdots \ e_{N,L}]$ 이라 할 때, \mathbf{e}_N 에서 크기가 가장 작은 원소 $e_{N,\min}$ 을

구하면 다음과 같다.

$$e_{N,\min} = \min\{\mathbf{e}_N\}. \quad (6)$$

그리고 식 (7)에 해당하는 후보군에 대해 L 개의 reference 심볼을 확장하여, $N-1$ 번째 layer에서 c_k 와의 Euclidean 거리를 구한다. 이와 같은 연산을 지속하였을 때, $p+1$ 번째 layer에서 $e_{p+1,\min}$ 에 해당하는 m_{p+1} 번째 후보군을 고려하였을 때, p 번째 layer에서 누적 Euclidean 거리 $e_{p,k}^{m_{p+1}}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$e_{p,k}^{m_{p+1}} = \left| v_p - \left(r_{pp}c_k + \sum_{i=p+1}^N r_{pi} \hat{x}_i^{m_i} \right) \right|^2 + e_{p+1,\min}. \quad (7)$$

여기서 $\hat{x}_i^{m_i}$ 는 i 번째 layer에서 임시적으로 추정된 성상도 내의 m_i 번째 reference 심볼이다.

이와 같은 방법으로 최하위단에서 누적 Euclidean 거리 벡터 \mathbf{e}_1 을 구한 후, \mathbf{e}_1 에서 크기가 $\log_2 L$ 번째로 작은 값을 threshold λ_1 이라 하고 가장 작은 값을 threshold λ_2 로 결정한다. 이와 같이 변조 차수에 따라 threshold를 결정하는 이유는 시스템에 사용되는 송신 안테나의 개수가 많고 변조 차수가 높을 때, 후보군을 제거함으로써 발생할 수 있는 오류 성능의 손실을 최소화하기 위함이다.

다시 최상위 layer로 돌아와 기존의 QRD-M과 마찬가지로 각 layer에서 각 후보군에 대한 누적 Euclidean 거리를 구한다. 이 때, N 번째 layer부터 $\lfloor N - \log_2(N-1) \rfloor$ 번째 layer 전까지 구한 후보군의 누적 Euclidean 거리를 λ_1 과 비교하여, 그 값이 λ_1 보다 크면 후보군에서 제외한다. 또한, 그 이후 layer부터 최하위 layer까지는 λ_2 와 비교하여, 그 값이 λ_1 보다 크면 후보군에서 제외하는 방법을 통해 최종적으로 최하위단에서 가장 작은 누적 Euclidean 거리에 해당하는 경로를 송신 신호로 추정한다. 여기서 $\lfloor \cdot \rfloor$ 은 버림 연산자를 나타낸다. 또한, 상위 layer에서 λ_2 대신 λ_1 을 사용하는 이유는 정확한 후보군을 선정하기 위해 상위 layer에서의 정확한 선정이 중요하기 때문이다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션 결과에서는 64-QAM 변조를 사용하

는 8×8 MIMO 시스템에서 제안된 QRD-M의 Bit Error Rate (BER) 성능과 복잡도를 보인다. 그림 1은 기존의 QRD-M ($M=64$)과 제안된 QRD-M의 BER 성능을 보인다. 제안된 QRD-M은 8개의 송신 안테나와 높은 변조 차수를 사용하고 있음에도 불구하고 기존의 QRD-M의 BER과 동일한데, 이는 송신 안테나의 수가 많고 높은 변조 차수가 사용되어도 검출 알고리즘에서 오류 성능의 손실을 최소화하기 위해 안테나의 개수와 변조 차수를 고려하였기 때문이다.

그림 2는 기존의 QRD-M ($M=1,16,32,64$)과 제안된 QRD-M의 복잡도를 나타낸다. 본 시뮬레이션에서

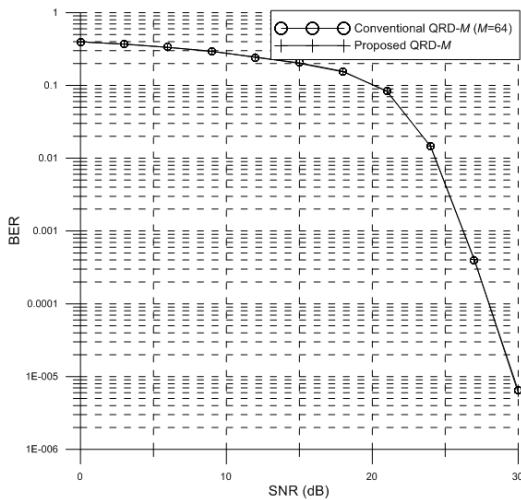


그림 1. 제안된 QRD-M의 BER 성능
Fig. 1. The BER performance of proposed QRD-M

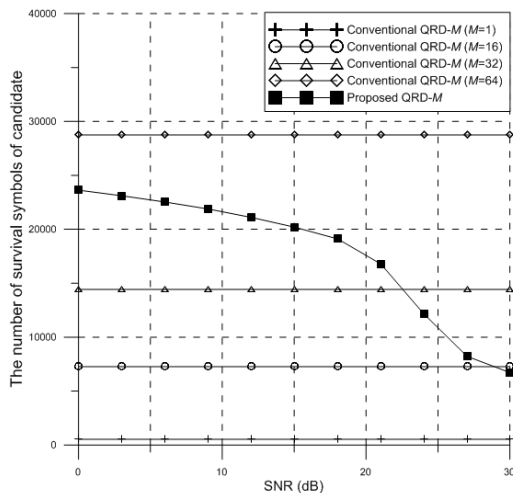


그림 2. 제안된 QRD-M의 복잡도
Fig. 2. The complexity of proposed QRD-M

는 SNR에 따른 전체 layer에서의 생존 후보군 개수를 복잡도로 표현하였다. 제안된 QRD-M의 복잡도는 기존의 QRD-M ($M=64$)의 복잡도보다 낮으며, SNR이 증가할수록 점점 기존의 QRD-M ($M=16$)의 복잡도에 근사화하고 있는데, 이는 SNR이 증가할수록 수신기 입장에서 선정된 여러 후보군 심볼 내에서 불필요한 후보군에 대한 식별이 점차적으로 뚜렷해지기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 낮은 복잡도를 지니는 QRD-M 검출 기법을 제안한다. QRD-M 검출 기법의 복잡도가 높은 이유는 각 layer마다 불필요한 후보군이 선정되기 때문이다. 제안된 QRD-M 검출 기법에서는 누적 Euclidean 거리와 계산된 threshold와의 크기 비교를 통해 이러한 불필요한 후보군을 제거하였다. 또한, 송신 안테나의 개수와 변조 차수가 높을 때, 후보군을 잘못 제거하면, 오류 성능의 열화가 심하므로 이를 방지하기 위해 threshold 계산시 변조 차수를 고려하였고, 이후에 후보군 제거시 오류 성능의 손실을 최소화하기 위해 송신 안테나의 개수를 고려한 검출 기법을 이용하였다.

References

- [1] J. Cortez, R. Palacio, J. C. Ramírez-Pacheco, and E. Ruiz-Ibarra, "A very low complexity near ML detector based on QRD-M algorithm for STBC-VBLAST architecture," *LATINCOM*, pp. 1-5, Arequipa, Peru, Mar. 2015.
- [2] M. Mohaisen, H. An, and K. Chang, "Reduced complexity QRD-M algorithm for spatial multiplexing MIMO-OFDM systems," *J. KICS*, vol. 34, no. 4, pp. 460-468, Apr. 2009.