

고속 무선 LAN 시스템을 위한 저복잡도 MIMO-OFDM 심볼 검출기 설계

*임준하, 김재석
연세대학교 전기전자공학부
e-mail : *adric@yonsei.ac.kr, jaekim@yonsei.ac.kr*

Design of Low-Complexity MIMO-OFDM Symbol Detector for High Speed WLAN Systems

*Junha Im, Jaeseok Kim
School of Electrical and Electronic Engineering
Yonsei University

Abstract

This paper presents a low-complexity design and implementation results of a multi-input multi-output (MIMO) orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) symbol detector for high speed wireless LAN (WLAN) systems. The proposed spatial division multiplexing (SDM) symbol detector is designed by HDL and synthesized to gate-level circuits using 0.18um CMOS library. The total gate count for the symbol detector is 238K.

I. 서론

무선 통신의 발달로 인하여 모바일 기기를 통한 멀티미디어 서비스 시장이 확대되는 가운데, 고속 무선 데이터 전송에 대한 요구를 충족시킬 수 있는 방안으로 무선랜(WLAN) 시스템이 주목을 받고 있다. 특히 송수신단에 여러 개의 안테나를 사용하는 MIMO 기법과 다중경로 페이딩 채널 환경에 적합한 OFDM 기법을 적용하면 보다 높은 전송률을 지원할 수 있다. 그러나 MIMO-OFDM 시스템은 하드웨어 부담이 크기 때문에 모바일 기기에 적용하려면 복잡도를 줄일 수

본 논문은 정보통신부 및 정보통신연구진흥원 대학 IT 연구센터 육성, 지원사업 및 2006년도 교육인적자원부 BK21 사업의 일환인 연세대학교 전기전자공학부 TMS 사업단의 지원을 받아 연구되었고, CAD Tool은 반도체설계교육센터 (IDEC)로부터 지원받았음.

있는 구조로 설계하는 것이 중요하다. 특히 MIMO 심볼 검출기는 하드웨어 면적 측면에서 매우 큰 비중을 차지하기 때문에 심볼 검출기의 복잡도를 낮추는 것은 전체 시스템의 저복잡도 설계에 큰 영향을 준다. 따라서 본 논문에서는 저복잡도의 MIMO 심볼 검출 알고리즘을 제안하고, 하드웨어로 구현한 결과를 제시한다.

II. 본론

2.1 시스템 모델

2개의 송신안테나와 2개의 수신안테나로 구성된 MIMO 시스템의 경우에 수신 신호 벡터 $\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2]^T$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{N} = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2] \cdot \mathbf{X} + \mathbf{N} \\ = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{X} 는 송신 신호 벡터이고, \mathbf{H} 의 성분 h_{ij} 는 j 번째 송신안테나와 i 번째 수신안테나 간의 채널 응답 함수이다. \mathbf{N} 은 평균 0, 분산 σ^2 인 AWGN 벡터이다.

2.2 제안 알고리즘

SDM 시스템을 위한 기존의 많은 심볼 검출 알고리즘 중에서 SQRD 기반의 검출 알고리즘 [1]은 비교적 적은 연산량으로 좋은 성능을 보이기 때문에 하드웨어 구현에 적합한 기법으로 평가되고 있다. 그러나 QR 분해 과정에서 나눗셈과 제곱근 연산을 필요로 하기 때문에 하드웨어로 구현하기에 여전히 큰 부담이 있다.

표 1. 제안된 심볼 검출 알고리즘

Step	Operation
1	Sorting $\hat{\mathbf{H}} = [\mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_1]$ & $\mathbf{p}=1$ (if $\ \mathbf{h}_1\ > \ \mathbf{h}_2\ $) $\hat{\mathbf{H}} = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2]$ & $\mathbf{p}=0$ (otherwise) where $\ \mathbf{h}_i\ \cong h_{1i} + h_{2i} $
2	Modified QR decomposition $\mathbf{B} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}$ $[\mathbf{b}_1 \ \mathbf{b}_2] = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & 0 \\ q_{21} & q_{22} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & 0 \\ 0 & \ \mathbf{h}_1\ ^2 \cdot r_{22} \end{bmatrix}$
3	$\mathbf{B}^H \cdot \mathbf{Y}$ $\tilde{\mathbf{z}} = \mathbf{B}^H \cdot \mathbf{Y} = \mathbf{A}^H \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{N}''$ $\begin{bmatrix} \tilde{z}_1 \\ \tilde{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}^2 & r_{11} \cdot r_{12} \\ 0 & \ \mathbf{h}_1\ ^2 \cdot r_{22}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1'' \\ n_2'' \end{bmatrix}$
4	x_2 Estimation $\hat{x}_2 = Q(\tilde{z}_2 / (\ \mathbf{h}_1\ ^2 \cdot r_{22}^2))$
5	SIC $\hat{z}_1 = \tilde{z}_1 - (r_{11} \cdot r_{12}) \cdot \hat{x}_2$
6	x_1 Estimation $\hat{x}_1 = Q(\hat{z}_1 / r_{11}^2)$
7	Permutation Rearrange $\hat{\mathbf{x}}$ according to the \mathbf{p} .

이에 반해서, 본 논문에서 제안하는 심볼 검출 알고리즘은 나눗셈 연산과 제곱근 연산을 완전히 제거함으로써 저복잡도의 심볼 검출기 구현을 가능하게 한다. 표 1은 제안하는 알고리즘을 정리한 것이다.

새로운 2x2 벡터 \mathbf{A} 를 다음과 같이 정의하면,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 \\ 0 & \|\mathbf{h}_1\|^2 \cdot r_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2x2 벡터 $\mathbf{B} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{B} = [\mathbf{b}_1 \ \mathbf{b}_2] &= [\mathbf{q}_1 \cdot r_{11} \quad \mathbf{q}_2 \cdot \|\mathbf{h}_1\|^2 \cdot r_{22}] \\ &= [\mathbf{h}_1 \quad \|\mathbf{h}_1\|^2 \cdot \mathbf{h}_2 - \mathbf{h}_1^H \cdot \mathbf{h}_2 \cdot \mathbf{h}_1] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{q}_1 과 \mathbf{q}_2 는 \mathbf{Q} 의 열벡터이다. \mathbf{B}^H 를 식 (1)에 곱하면, 수신 벡터는 표 1의 과정 3과 같이 표현되고, 여기서 각 성분들은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{11}^2 &= \|\mathbf{h}_1\|^2 \\ r_{11} \cdot r_{12} &= \mathbf{h}_1^H \cdot \mathbf{h}_2 \\ \|\mathbf{h}_1\|^2 \cdot r_{22}^2 &= \|\mathbf{h}_1\|^2 \cdot \|\mathbf{h}_2\|^2 - |\mathbf{h}_1^H \cdot \mathbf{h}_2|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)로부터 나눗셈과 제곱근 연산 없이 QR 분해 과정이 수행되는 것을 확인할 수 있다.

심볼 검출 후, LLR 기반의 soft demapping을 수행하면 검출 신호의 신뢰도를 향상시킬 수 있다 [2]. 특히 유클리디안 거리를 구하는 과정에서 필요한 norm을 식 (5)와 같이 근사화하면 복잡한 곱셈 연산을 줄일 수 있고, 성능 열화도 거의 없기 때문에 저복잡도 설계에 매우 적합하다 [3].

$$\|y_n\| \cong \frac{3}{8} (|\Re\{y_n\}| + |\Im\{y_n\}|) + \frac{5}{8} \max(|\Re\{y_n\}|, |\Im\{y_n\}|) \quad (5)$$

표 2는 제안된 심볼 검출 과정과 기존의 SQRD 기반 심볼 검출 과정의 연산 복잡도를 비교한 결과이다. 근사화된 LLR 기반의 soft demapping 과정까지 고려

표 2. 연산 복잡도 비교

Step	[1]			Proposed		
	mul.	div.	sqrt.	mul.	div.	sqrt.
Sorting	4	-	-	-	-	-
QR decomposition	32	8	2	38	-	-
LLR weighting	4	-	-	2	-	-
Total	40	8	2	40	-	-

하면, 추가적인 곱셈 연산 없이 나눗셈과 제곱근 연산이 모두 제거되는 것을 볼 수 있다.

III. 구현

제안된 알고리즘을 적용한 심볼 검출기는 HDL로 설계한 후 0.18um 공정을 이용하여 게이트 수준으로 합성하였다. 구현 결과, LLR demapper를 포함한 MIMO 심볼 검출기는 총 238K의 게이트로 합성되었다.

IV. 결론

본 논문에서는 MIMO-OFDM WLAN 시스템을 위한 저복잡도의 심볼 검출 알고리즘을 제안하고, 구현 결과를 제시하였다. QR 분해 과정의 수식 변형을 통해서 높은 연산량을 갖는 나눗셈과 제곱근 연산을 제거하고, 추가적인 근사화 과정을 통해서 저복잡도의 심볼 검출기를 설계하였다. 구현 결과, 총 게이트 수는 238K이었다. 제안된 심볼 검출기는 하드웨어 부담이 중요한 문제로 부각되는 모바일 기기용 무선랜 시스템에서 사용가능한 효율적인 구조로 판단된다.

참고문헌

[1] D. Wubben, R. Bohnke, J. Rinas, V. Kuhn, and K. D. Kammeyer, "Efficient algorithm for decoding layered space-time codes," *IEE Electron. Lett.*, vol.37, no.22, pp.1348-1350, Oct. 2001.

[2] F. Tosato, and P. Bisaglia, "Simplified soft-output demapper for binary interleaved COFDM with application to HIPERLAN/2," *ICC'02*, vol. 2, pp. 664-668, May 2002.

[3] A. Adjoudani, *et al*, "Prototype experiance for MIMO BLAST over third-generation wireless system," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 21, no. 3, pp. 440-451, Apr. 2003.