

다중안테나 통신시스템을 위한 저복잡도 연판정 MIMO 심볼검출기법 연구

Efficient Low-Complexity Soft MIMO Symbol Detector for MIMO Systems

장수현* · 신대교*** · 윤상훈*** · 정한균*** · 진성근*** · 임기택**

* 주저자 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 연구원
** 교신저자 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 센터장
*** 공저자 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 연구원

Soo-Hyun Jang* · Dae-Kyo Shin*** · Sang-Hun Yoon*** · Han-Gyun Jung*** ·
Seong-Keun Jin*** · Ki-Taeg Lim**

Mobility Platform Center, Korea Electronics Technology Institute

† Corresponding author : Ki-Taeg Lim, ktlim@keti.re.kr

Vol.16 No.2(2017)

April, 2017

pp.153~160

ISSN 1738-0774(Print)

ISSN 2384-1729(On-line)

[https://doi.org/10.12815/kits.](https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.2.153)

2017.16.2.153

Received 29 November 2016

Revised 22 December 2016

Accepted 26 December 2016

© 2017. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요약

최근 모바일 환경에서 고화질 멀티미디어 서비스 수요가 늘어감에 따라, 다중안테나 (MIMO, Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최신 무선 통신 시스템에 적용되고 있다. 이와 함께, 휴대폰, 태블릿 등 모바일 디바이스용 MIMO 시스템은 물리적 크기의 한계로 인하여 최대 2개의 송수신 안테나(2×2)를 고려하고 있으며, 따라서 본 논문에서도 2×2 MIMO 시스템을 고려하여 모바일 디바이스용 다중안테나 시스템을 위한 저복잡도 특성을 갖는 심볼 검출 알고리즘을 제안한다. 제안된 심볼 검출 기법은 비록 Modified-SQRD 알고리즘을 통해 검출된 1차원 상의 신호를 제안된 심볼 확장 기법을 통해 2차원 신호로 확장한 다음 연판정을 위한 LLR 연산이 가능하도록 제안하였다.

핵심어 : 다중안테나 시스템, 모바일 디바이스, 심볼 검출기, 연판정

ABSTRACT

Recently, the demand has continued to increase for higher data rates and improved multimedia services through wireless internet access. In order to increase the data rate and link reliability, 3GPP LTE/A and IEEE 802.16e/m WiMAX systems incorporate MIMO transmission schemes. Since the hardware complexity increases with the number of transmit data streams and mobile devices have limited physical dimensions, an multiple input multiple output (MIMO) system with two antennas at both the transmitter and the receiver (2×2) is considered to be a possible solution for mobile devices. In this paper, a low-complexity soft output MIMO symbol detector based on Modified-SQRD is proposed for mobile devices with two transmit and two receive antennas.

Key words : MIMO, mobile devices, symbol detector, soft-output, SQRD

I. 서 론

1. 개 요

최근 모바일 환경에서 고화질 멀티미디어 서비스 수요가 늘어감에 따라, 초고속 데이터 전송을 충족시킬 수 있는 다중안테나 (MIMO, Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Li et al., 2010). MIMO 전송 기술은 송신 안테나 수에 비례하여 시스템의 용량을 증가시킬 수 있으므로 IEEE 802.11n/ac WLAN(IEEE Standard, 2013), IEEE 802.16e/m Mobile WiMAX, 그리고 3GPP LTE/LTE-Advanced (3GPP Standard, 2011) 등과 같은 최신 무선 통신 시스템에 적용되고 있다. 이와 함께, 휴대폰, 테블릿 등 모바일 디바이스의 MIMO 시스템은 물리적 크기의 한계로 인하여 최대 2개의 송수신 안테나(2×2)를 고려하고 있으며, 따라서 본 논문에서도 2×2 MIMO 시스템을 고려하고자 한다(Im et al., 2012).

MIMO 시스템은 송/수신단에 여러 개의 안테나를 이용하여 동시에 서로 다른 데이터를 전송함으로써 시스템의 대역폭 증가 없이 고속의 데이터를 전송할 수 있는 공간 다중화(SM, Spatial Multiplexing) 기술(Paulraj et al., 2004)과 송신 단에서 별도의 코딩을 거친 후 수신단에서 선형연산을 통해 다이버시티 이득을 얻고자 하는 공간 다이버시티(SD, Spatial Diversity) 기술(Alamouti, 1998)로 구분된다. 특히, 전송 신뢰도를 향상시키는 공간 다이버시티 기술은 수신단에서 선형 연산을 통해 최적 수신 성능을 보이는 ML 심볼 검출이 간단히 이루어지는데 비해, 전송률을 향상시키는 공간 다중화 기술은 수신단에서 다중화된 데이터들을 분리해야 하는 어려움이 있다. 이 간섭을 제거하기 위해서는 매우 복잡한 연산과정을 필요로 하므로 우수한 성능을 보이는 알고리즘의 경우 심볼 검출기의 복잡도가 매우 커지게 되며, 따라서 빠르고 복잡도를 줄인 알고리즘들이 많이 제안되었다. 그 중에서 SQRD (Sorted QR Decomposition) 기반의 알고리즘(Wubben et al., 2003)이 비교적 높은 성능을 보이면서도, 역행렬을 계산하는 연산이 필요하지 않아서 복잡도가 낮은 알고리즘이므로 하드웨어 구현 시에 많이 이용되고 있다. 그러나 여전히 심볼 검출과정에서 나눗셈 및 제곱근 등 복잡한 연산을 수행하므로 그대로 하드웨어로 구현할 경우 큰 복잡도를 지니게 된다. 이러한 복잡도를 줄이기 위해 논문(Noh et al., 2006)에서는 Modified SQRD 알고리즘이 제안되었으며 성능열화 없이 복잡도를 감소시켰지만, 여전히 심볼 간섭 등으로 심각한 성능열화의 단점이 있다. 또한, 논문(Kim, 2007)에서는 ML 검출 기법과 동일한 성능을 보이면서 필요한 ML metric 계산 횟수를 신호 성상도의 배수만큼 줄일 수 있는 MML(Modified Maximum Likelihood) 검출 기법이 제안되었다. 하지만, MML 검출 기법은 ML 검출 기법에 비해 복잡도를 크게 낮추었으나, 특히 64QAM을 지원하는 경우 다수의 곱셈기가 필요하게 되어 여전히 실시간 구현에 어려운 문제점이 있다.

한편, 최근 제안된 이동통신 표준에서는 열악한 채널환경에서도 우수한 성능의 보장을 위해 Turbo Code, LDPC 등의 채널부호화를 적용하고 있으며, 채널부호화가 적용된 심볼의 오류정정능력을 최대화하기 위해 심볼 검출기의 출력은 연관정 값인 LLR(Log-Likelihood Ratio) 형태로 출력되고 있다. 그러나 Modified-SQRD 알고리즘은 1차원 심볼 레벨의 경관정 기반 심볼 검출 알고리즘으로 정확한 LLR 값의 생성을 통한 심볼검출 성능향상에 어려움을 가지고 있다(Jang et al., 2015).

따라서 본 논문에서는 복잡도가 낮으면서도 심볼검출 성능향상을 위해 제안된 2차원 심볼 확장 기법을 통해 LLR 값 생성이 가능한 Modified-SQRD 기반 2×2 MIMO 심볼 검출 알고리즘에 대한 연구 결과를 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 MIMO-SM 심볼 검출기법 중 하나인 SQRD 심볼 검출 알고리즘에 대해 설명하고, 하드웨어 설계에 적합한 Modified SQRD 알고리즘과 성능을 비교 분석한다. III장에서는 제안된 알고리즘에 대한 설명 및 성능평가 결과를 제시하고, 마지막으로 IV장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 제안된 MIMO 심볼 검출 기법

SQRD 심볼 검출 알고리즘의 하드웨어 복잡도 감소를 위해 Modified SQRD 알고리즘이 제안되었으며 성능열화 없이 복잡도를 감소시켰지만 여전히 심볼 간섭 등으로 심각한 성능열화의 단점이 있다. 한편, 제안된 심볼 검출 알고리즘은 Modified-SQRD 기반 2차원 심볼 확장 기법을 통한 LLR 값 생성을 바탕으로 심볼 검출 성능을 개선시킨다.

1. 기존 심볼 검출 기법

1) QRD 알고리즘

채널 행렬을 H 라고 했을 때 QRD 알고리즘은 수식 (1)과 같이 정의된다.

$$H = QR = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ 0 & r_{22} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, Q 는 $Q^H Q = I$ 인 유니터리 행렬이고, R 은 상삼각 행렬이다. 채널행렬을 QR 분해한 후 수신된 신호에 Q^H 를 곱하면 식 (2)와 같은 신호를 검출할 수 있으며, 여기서 Q 와 R 의 각 원소는 식 (3)과 같이 연산된다.

$$z = Q^H(Hx + n) = Rx + n \quad (2)$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= \|h_1\| = \sqrt{(h_{11})^2 + (h_{21})^2} \\ q_1 &= h_1 / r_{11}, \quad q_2 = z_2 / r_{22}, \quad z_2 = h_2 - r_{12}q_1 \\ r_{12} &= q_1^H \cdot h_2, \quad r_{22} = \|z_2\| \end{aligned} \quad (3)$$

2) Modified SQRD 알고리즘

위에서 설명한 QRD 기반 SQRD 검출 알고리즘은 식 (3)과 같이 QR 분해과정과 심볼 추정과정에서 나눗셈 연산을 필요로 하고, 놴(norm) 값을 구하는 과정에서는 제곱근 연산을 필요로 한다. 나눗셈 회로의 경우, 논리 지연 시간이 클 뿐만 아니라 하드웨어 복잡도도 크기 때문에 나눗셈 회로를 포함한 심볼 검출기를 설계하는 것은 쉽지 않은 일이다.

우선 수신 신호 y 는 수식 (4)와 같이 정의된다. H 는 채널 행렬, n 은 AWGN을 의미한다. 또한, 수식 (5)와 같이 기존의 Q, R 외에 아래와 같이 보조 벡터 A, B 를 아래와 같이 정의한다.

$$y = Hx + n \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix} r_{11} & 0 \\ 0 & \|h_1\|^2 \cdot r_{22} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$B = QA = \begin{pmatrix} q_1 \cdot r_{11} & q_2 \cdot \|h_1\|^2 \cdot r_{22} \end{pmatrix}$$

심볼 검출을 위해 B^H 을 수신 신호 y 에 곱하면 수식 (6)을 얻는다.

$$B^H y = B^H H x + n = A^H R x + n \tag{6}$$

여기서, $A^H R = R'$ 이라고 하면, $R'x$ 는 식 (7)과 같이 전개된다.

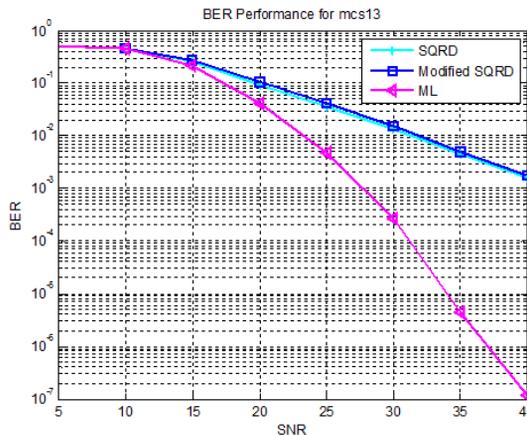
$$\begin{aligned} R'x &= \begin{pmatrix} r_{11} & 0 \\ 0 & \|h_1\|^2 \cdot r_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ 0 & r_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} (r_{11})^2 \cdot x_1 + r_{11} \cdot r_{12} \cdot x_2 \\ \|h_1\|^2 \cdot (r_{22})^2 \cdot x_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{7}$$

수식 (7)에서 얻은 결과는 기존 SQRD 알고리즘과 유사하며, 수식 (8)과 같이 Slicer(quantization) 함수 Q(-)를 통해 x_2 를 추정하고 추정된 값을 이용하여 간섭을 제거한 후 다시 Slicer 함수 Q(-)를 통해 x_1 을 추정한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}'_2 &= Q(\tilde{x}_2, \|h_1\|^2 \cdot (r_{22})^2) \\ \hat{x}_1 &= \tilde{x}_1 - r_{11} \cdot r_{12} \cdot \hat{x}_2 \\ \hat{x}'_1 &= Q(\hat{x}_1, (r_{11})^2) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, Q(-) 함수는 일단 특정값이 입력되면, 별도의 search 과정 없이 정해진 출력 값으로 매핑 시켜주는 기능을 수행한다.

따라서 Modified SQRD 기반 심볼 검출기법은 보조벡터 A, B 를 이용하여 계산하는 과정에서 발생하는 나눗셈과 제곱근 연산이 모두 제거되는 효과를 얻을 수 있다. 또한, 수정된 정상도 상에서 심볼을 추정함으로써 나눗셈 연산을 제거할 수 있었으며, 이를 통해 기존 SQRD 기반 심볼 검출 기법보다 적은 연산량을 가지면서 동일한 성능을 보여준다. 하지만 <Fig. 1>에서 보듯이 여전히 ML 대비 성능 열화가 심한 것을 확인할 수 있다.



<Fig. 1> The performance of SQRD algorithm

2. 제안된 심볼 검출 기법

MIMO 시스템에서 심볼 검출기의 출력은 연관성 값인 LLR을 기반으로 하는 기법이 가장 좋은 성능을 보여 준다[10]. 모든 전송심볼 벡터의 확률이 동일하다고 가정하고 지수함수의 특징을 이용한 max-log approximation 을 적용하면 2x2 MIMO 심볼 검출기의 LLR metric은 아래와 같이 수식 (1), (2)로 정의된다(Tosato and Bisaglia, 2002).

$$LLR(b_{1,i}) = \log \left(\frac{\sum_{c \in C_i^+} \sum_{x_2 \in C} \exp \left[-\frac{|\mathbf{y} - \mathbf{h}_1 c - \mathbf{h}_2 x_2|^2}{2\sigma^2} \right]}{\sum_{c \in C_i^-} \sum_{x_2 \in C} \exp \left[-\frac{|\mathbf{y} - \mathbf{h}_1 c - \mathbf{h}_2 x_2|^2}{2\sigma^2} \right]} \right) \quad (9)$$

$$LLR(b_{2,i}) = \log \left(\frac{\sum_{c \in C_i^+} \sum_{x_1 \in C} \exp \left[-\frac{|\mathbf{y} - \mathbf{h}_1 x_1 - \mathbf{h}_2 c|^2}{2\sigma^2} \right]}{\sum_{c \in C_i^-} \sum_{x_1 \in C} \exp \left[-\frac{|\mathbf{y} - \mathbf{h}_1 x_1 - \mathbf{h}_2 c|^2}{2\sigma^2} \right]} \right) \quad (10)$$

여기서, $b_{j,i}$ 는 j 번째 송신 안테나 전송 심볼의 i 번째 비트를 의미하며, C_i^- , C_i^+ 는 i 번째 비트가 각각 -1(1그룹), +1(0그룹)인 x_i 들의 집합을 의미한다. 결국, LLR 값은 수신된 심볼과 성상도 상의 모든 좌표와의 최소 유클리디언 거리의 차를 의미한다.

한편, ML 성능을 보장하기 위해서는 x_1, x_2 의 jointly ML search에 의해 구해야만 한다. 하지만, SQRD 기반의 심볼 검출 기법은 경관정 된 1차원 신호로 두 전송 심볼을 검출하므로 성능이 크게 저하된다. 제안된 심볼 검출 기법은 비록 SQRD 기반으로 검출된 1차원 레벨의 신호이지만 수식 (9), (10)의 LLR 연산 결과를 이용하여 심볼 확장 기법을 적용하여 유클리디언 거리를 2차원 레벨에서 구한 후 LLR 계산식에 적용하여 성능향상을 지원한다. 이는 만약 경관정 된 x_1, x_2 가 ML search를 통해 구한 것과 같은 경우가 존재할 때, ML 성능을 지원하게 되며, 특히 높은 SNR에서 경관정 된 x_1, x_2 두 심볼이 ML search를 통해 구한 것과 같아질 확률이 커지므로 성능개선 효과가 크다. 제안된 알고리즘의 검출 과정은 아래의 절차를 따른다.

1) 경관정(Hard-decision)으로 x_1, x_2 결정

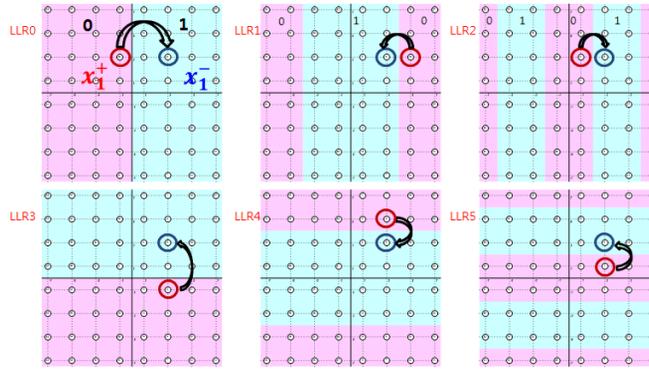
우선, Modified-SQRD 알고리즘을 이용하여 수식 (8)과 같이 경관정 된 x_1, x_2 값을 결정한다.

2) 제안된 심볼 확장 기법: x_1 의 bit metric별 symbol extension(64QAM 예시)

<Fig. 2>에서와 같이 제안된 심볼 확장 기법을 통한 bit 그룹 별 LLR 연산을 아래와 같이 수행한다.

- LLR 연산을 위해 필요한 x_1 의 bit metric별로 0그룹과 1그룹의 심볼을 먼저 구한다.
- 다음으로 경관정 된 x_1 이 먼저 0그룹 심볼인지, 1그룹 심볼인지 판단 후, 0그룹(1그룹)이면 x_1^+ 기준으로 심볼 확장을 통하여 가장 가까운 1그룹(0그룹)에 해당하는 x_1^- 심볼을 구한다.

- 여기서, 심볼 확장은 유클리디언 거리의 차가 최소가 될 수 있는 지점으로 확장하여 지정하며, 가장 가까운 decision boundary를 중심으로 좌우 대칭되는 심볼 위치로 확장한다.



〈Fig. 2〉 Symbol Extension Technique(64QAM)

3) x_1 의 extension symbol 기반 LLR 계산

2) 단계에서 구한 0그룹(x_1^+)과 1그룹(x_1^-)의 심볼 값을 각각 아래의 수식 (11)의 LLR 계산식 x^+ , x^- 에 대입한 다음, x_2 는 경판정 된 값을 이용한다. 원래 ML search를 위해서는 x_2 는 정상도 상의 모든 점이 후보군이 될 수 있으나 이럴 경우, 하드웨어 복잡도가 상당히 커지게 되는 단점이 있다.

$$LLR(b_{1,i}) = \log \left(\frac{\sum_{x_1 \in C_1^+} \exp \left[-\frac{|\mathbf{y} - \mathbf{h}_1 x_1^+ - \mathbf{h}_2 x_2|^2}{2\sigma^2} \right]}{\sum_{x_1 \in C_1^-} \exp \left[-\frac{|\mathbf{y} - \mathbf{h}_1 x_1^- - \mathbf{h}_2 x_2|^2}{2\sigma^2} \right]} \right) \quad (11)$$

$LLR(b_{1,i})$ 연산과 병렬적으로 $LLR(b_{2,i})$ 계산은 수행되며 $LLR(b_{1,i})$ 연산과정 1) ~ 3)와 같이 동일한 과정을 거쳐 구해진다. 수식 (12)를 보면 수식 (11)과 반대로 x_2 에 대한 심볼 확장을 수행해야 하는 것을 알 수 있다.

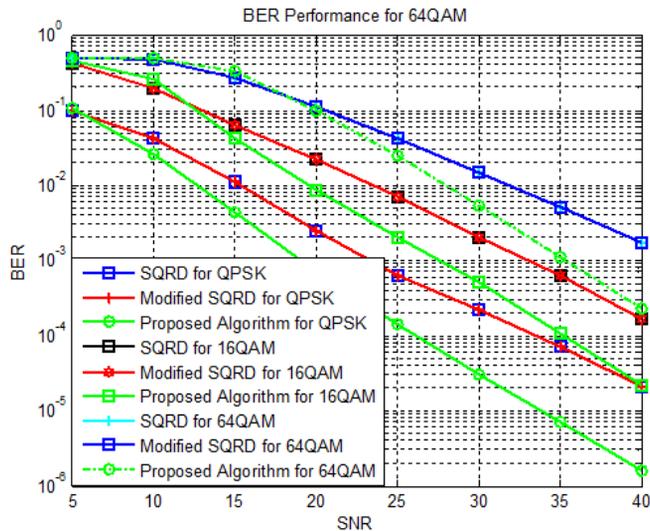
$$LLR(b_{2,i}) = \log \left(\frac{\sum_{x_2 \in C_2^+} \exp \left[-\frac{|\mathbf{y} - \mathbf{h}_1 x_1 - \mathbf{h}_2 x_2^+|^2}{2\sigma^2} \right]}{\sum_{x_2 \in C_2^-} \exp \left[-\frac{|\mathbf{y} - \mathbf{h}_1 x_1 - \mathbf{h}_2 x_2^-|^2}{2\sigma^2} \right]} \right) \quad (12)$$

Ⅲ. 성능 분석

제안된 심볼 검출 알고리즘에 대한 성능 평가는 <Fig. 3>에서 확인할 수 있다. 성능평가를 수행하기 위한 채널 환경은 IEEE 802.11n 무선 LAN 채널 모델 D (typical office environment, NLOS)를 적용하였다. 성능평가 결과는 본 논문에서 제안하는 모든 MIMO 모드에 대해 수행하였으며 BER (Bit Error Rate)을 도시하였다. <Fig. 3>에서 확인할 수 있듯이, QPSK, 16QAM, 64QAM 등 모든 변조 방식에 대해 성능이 개선된 것을 확인할 수 있다. 앞서 제안된 심볼검출 기법 설명에서 언급했듯이, SNR이 높을수록 경관정 된 심볼이 ML search를 통해 구한 것과 같을 가능성이 높아져 최대 8 dB 이상의 성능 개선 효과가 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이, 제안된 심볼 검출 알고리즘은 심볼 확장 기법을 바탕으로 수식 (11)을 구현하기 위한 연산 증가만으로도 기존 SQRD 심볼 검출 알고리즘 대비 높은 성능향상을 보였다.

<Table 1> Simulation Environment

	Environment
SNR	5 : 5 : 40 dB
# of OFDM Packet	1000
Channel Model	IEEE 802.11n WLAN Channel Model D
# of Tx/Rx Antenna	2X2
MIMO Mode	SM
Modulation	QPSK, 16QAM, 64QAM
Pre-condition	Perfect Sync & Channel Estimation



<Fig. 3> Performance Evaluation

V. 결 론

본 논문에서는 모바일 디바이스용 다중안테나 시스템을 위한 저복잡도 특성을 갖는 심볼 검출 알고리즘을 제안하였다. 제안된 심볼 검출 기법은 비록 Modified-SQRD 알고리즘을 통해 검출된 1차원 상의 신호를 제안된 심볼 확장 기법을 통해 2차원 신호로 확장한 다음 LLR 연산이 가능하도록 제안하였다. 그 결과, 하드웨어 복잡도를 최소화하면서도 Modified-SQRD 알고리즘 기반 LLR 연산을 통해 성능 향상을 유도하였다. 이에, 물리적 크기의 제약이 있는 모바일 디바이스를 위한 MIMO 통신시스템의 심볼 검출기법으로 활용될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 산업통산자원부 전자부품산업핵심기술개발사업(1415149648)인 "OTP기반의 HSM을 활용한 차량용 인증 보안 예지보전 플랫폼 기술개발" 과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- 3GPP(2011), "Evolved universal terrestrial radio access (EUTRA, physical channels and modulation (Release 10)," TS 36.211, V10.2.0.
- Alamouti S. M.(1998), "A simple transmitter diversity scheme for wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp.1451-1458.
- IEEE Std. 802.11ac(2013), "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications".
- Im J. et al.(2012), "A Low-power and Low-complexity Baseband Processor for MIMO-OFDM WLAN Systems," *Signal Processing Systems, Springer Journal of*, vol. 68, no. 1, pp.19-30.
- Jang S. et al.(2015), "Low-complexity and low-power MIMO symbol detector for mobile devices with two TX/RX antennas," *Journal of Semiconductor Technology and Science*, vol. 15, no. 2, pp.255-266.
- Kim J. et al.(2007), "Computationally efficient signal detection method for next generation mobile communications using multiple antennas," *SK Telecommun. Review*, vol. 17, no. 1C, pp.183-191.
- Li Q. et al.(2010), "MIMO techniques in WiMAX and LTE: A feature overview," *Communications, IEEE Magazine*, vol. 48, no. 5, pp.86-92.
- Noh S. et al.(2006), "Low complexity symbol detector for MIMO-OFDM-based wireless LANs," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 53, no. 12, pp.1403-1407.
- Paulraj A. J. et al.(2004), "An overview of MIMO communications-A key to gigabit wireless," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 2, pp.198-218.
- Tosato F. and Bisaglia P.(2002), "Simplified soft-output demapper for binary interleaved COFDM with application to HIPERLAN/2," *in Proc. ICC*, vol. 2, pp.664-668.
- Wubben D. et al.(2003), "MMSE extension of V-BLAST based on sorted QR decomposition," *in Proc. IEEE VTC 2003*, vol. 1, pp.508-512.