

GSM을 위한 우선순위 기반 저복잡도 ML 검출 기법

이 만 희*, 신 수 용°

A Low-Complexity ML Detector for Generalized Spatial Modulation Based on Priority

Man Hee Lee*, Soo Young Shin°

요 약

본 논문은 Multiple-input Multiple-output (MIMO) 기법 중에 하나인 Generalized Spatial Modulation (GSM)을 위해 변형된 ML 검출 기법을 제안한다. 기존의 일반적인 ML 검출 기법은 활성 안테나의 수가 증가함에 따라 채널 정보의 크기가 커지기 때문에 높은 복잡도를 가지는 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 송수신 안테나의 수로 고정되는 채널 정보를 이용하고 우선순위를 정하여 그에 따라 활성 안테나 인덱스를 하나씩 검출함으로써 낮은 복잡도를 가지는 기법을 제안한다. 본 논문에서는 모의실험을 통해서 기존의 ML 검출 기법과 제안하는 기법의 복잡도와 Bit Error Rate (BER)을 통해 성능을 평가하고 비교하였다. 복잡도 계산을 위한 모의실험에서 제안하는 검출기법으로 송신 안테나의 수가 10개일 때, 복잡도가 약 45% 감소하는 것을 확인하였다.

Key Words : Generalized Spatial Modulation (GSM), MIMO, ML detector, Priority, Channel Statement Information (CSI)

ABSTRACT

In this paper, we proposed a modified ML detector for generalized spatial modulation which is a method among Multiple-input Multiple-output. This proposed method detects signal applying modified channel statement information based on priority. Complexity in conventional methods increases as increasing the number of active antennas. To solve this problem, we proposed a new ML method using static channel information decided by the number of transmit antennas and the number of receive antennas. This method detects active antennas one by one through priority. The proposed method has proved benefit on complexity compared with conventional method through simulations. When the number of transmit antennas is equal to 10, there is approximately 45% complexity reduction.

I. 서 론

최근 인터넷 인구의 폭발적인 증가와 Internet of Things (IoT)의 도입으로 데이터 트래픽에 대한 수요량이 급격하게 증가하고 있고, 수백 대의 장비들이 동시에 접속할 수 있는 대규모 통신 용량을 위한 통신

시스템에 대한 수요도 증가하고 있다.^[1] 이러한 통신 용량에 대한 요구를 충족시키기 위해 이동 통신 산업에서는 Long Term Evolution (LTE), Long Term Evolution-Advanced (LTE-A)와 같은 소위 4세대 (4th Generation, 4G) 이동 통신 기술들을 이용한다. 이러한 4G를 가능하게 해준 두 가지 핵심 기술로는 송

* 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1D1A1A01061075)

• First Author : Department of IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology, lmh910420@gmail.com, 학생회원

° Corresponding Author : Kumoh National Institute of Technology, wdragon@kumoh.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2016-12-385, Received December 14, 2016; Revised January 11, 2017; Accepted January 24, 2017

수신단에 여러 개의 안테나를 사용하는 Multiple-input Multiple-output (MIMO)와 주파수대역을 여러 개의 작은 sub-channel로 분할해서 전송하는 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)이 있다. 이에 대한 지속적인 연구가 다양한 방면에서 진행되고 있다.^[2] 부가적인 주파수 증대나 전력 증강 없이 안테나 개수만을 이용하는 것이 MIMO 기술의 핵심이다. 특히 MIMO에 대한 연구는 통신용량 증대와 Bit Error Rate (BER) 감소라는 큰 두 가지 흐름으로 정리되는데, 송신 안테나의 수의 증가를 통해서 통신 용량을 쉽게 높일 수 있고 수신 안테나의 수를 늘려 수신 이득을 얻음으로써 BER을 줄이는 것이 가능하다.^[3] 그러나 복수 개의 안테나를 사용함으로써 인한 시스템의 복잡도 증가와 에너지 효율 감소 문제가 발생한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 Spatial Modulation (SM)이 제안되었다.^[4]

SM은 안테나 인덱스를 이용하여 추가적인 정보를 전송 가능한 시스템으로, 안테나를 통해서 송신하는 심볼 정보뿐만 아니라 심볼을 전송하고 있는 활성화된 안테나가 어떤 것인지를 이용하여 추가적인 정보를 제공할 수 있는 방식이다. [4]에서는 한 개의 활성화된 안테나를 사용하기 때문에 하나의 Radio Frequency (RF) 체인으로 심볼을 전송하는 것이 가능하다. 이를 통해 주파수 효율 (Spectral Efficiency, SE) 증가와 동시에 낮은 구현 복잡도와 에너지 효율 (Energy Efficiency, EE)을 얻을 수 있다. SM의 경우 n 비트의 부가정보 전송을 위해 2^n 개 이상의 송신 안테나가 필요하다. 이로 인해 시스템을 구성할 때 송신 안테나의 수를 2의 배수로 지정해야하는 문제가 발생하므로, 이러한 문제를 복수 개의 송신 안테나를 활성화시켜 만든 조합 안테나 인덱스를 통해 보완하고 주파수 효율을 향상시키는 Generalized Spatial Modulation (GSM)가 제안되었다.^[5]

GSM에서는 활성화 안테나를 통해 만들어진 조합 안테나 인덱스 및 심볼 검출이 동시에 수행되어야 하기 때문에 검출기 성능이 전체 시스템에 중요한 영향을 준다.^[6] 이를 위해 Zero Forcing (ZF), Minimum Mean Square Error (MMSE), Maximum Likelihood (ML) 등과 같이 조합 안테나 인덱스 및 심볼을 보다 효율적으로 검출하는 방법들이 연구되고 있다.^[7] ZF 기법은 채널 정보를 이용하여 Intersymbol Interference (ISI)를 줄이는 것을 목적으로 채널 정보를 이용한다는 점에서 ML 기법과 유사하지만 이로 인해 잡음 또한 함께 증폭시키기 때문에 ML에 비해 상대적으로

성능이 좋지 않다. MMSE 기법은 정확한 채널 정보를 이용하는 것이 아니라 예상되는 심볼과 수신한 심볼 사이의 조건부 평균값을 이용하기 때문에 성능은 상대적으로 낮으나, 낮은 복잡도를 가지고 비선형적인 시스템에 적용이 가능하다. 이러한 검출 기법들 중 성능이 가장 우수한 것이 ML 검출기이다.^[8] GSM에서의 ML 검출 기법은 우선 활성 안테나의 조합을 통해서 만들어지는 복수 개의 안테나 인덱스를 찾고, 다음으로 수신한 심볼을 모든 가능한 심볼과 비교하여 검출하기 때문에 우수한 성능을 가지나 복잡도가 높다는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 GSM에서의 ML 신호 검출 기법의 복잡도를 낮추는 기법에 대하여 제안한다. 기존 ML 검출 기법에서는 MIMO 시스템의 수신 단에서 조합 안테나 인덱스를 통해서 만들어지는 채널 정보를 이용하는데, 제안하는 기법에서는 송수신 안테나의 수로 결정되는 채널 정보를 이용한다. 이 채널 정보는 기존 GSM의 ML 검출을 위한 채널 정보의 크기보다 작다. 이를 이용하여 수신 안테나에서 받은 신호 중 가장 높은 채널 계수부터 우선순위를 두고 각각의 활성 안테나를 하나씩 검출한다. 이를 통해 검출 방식의 효율성을 증대시키고 계산량을 줄이는 효과를 가진다. 모의실험 결과를 통해 제안한 방식과 기존의 ML 검출 방식의 복잡도를 계산하여 비교한다. 또한 BER을 비교함으로써 검출 성능을 비교할 수 있다. 제안된 ML 신호 검출기는 기존 방식 대비 낮은 복잡도를 가지므로 GSM의 실제 구현 가능성을 제고할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문의 II장에서는 제안하는 기법이 적용되는 GSM 시스템과 ML 검출기에 대해 설명하고 III장에서는 GSM를 위한 우선순위를 기반으로 하는 ML 검출기법을 설명한다. 마지막으로 IV장에서는 모의실험 결과를 분석하고 V장에서는 결론을 서술한다.

II. 관련 연구

2.1 Generalized Spatial Modulation (GSM)

GSM는 SM의 일반화된 형태로써 최근 제안된 MIMO 기술이다.^[9] 동일한 수의 송신 안테나를 사용했을 때, GSM은 전송시 복수 개의 활성 안테나를 조합을 활용하여 정보를 송신하기 때문에 SM 보다 뛰어난 주파수 효율을 가진다. 다시 말해, GSM에서는 신호를 전송하는데 있어 다수의 송신 안테나 중 몇 개의 활성 안테나를 이용하여 신호를 전송하는가에 따라 부가적인 정보를 전송할 수 있다. 즉 전송 시 조합

안테나 인덱스를 만들고 이를 매칭한 복수 개의 활성 안테나를 이용하여 각각의 안테나를 통해 심볼을 전송한다.

GSM에서 전송할 수 있는 정보 비트를 식 (1)에서 다음과 같이 표현한다.

$$m_{GSM} = m_t + m_s = \lfloor \log_2(N_t C_{N_t}) \rfloor + \log_2 M \quad (1)$$

여기서 $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 버림 연산을 의미하고 N_t 는 송신 안테나의 수, N_a 는 활성 송신 안테나의 수 그리고 M 은 변조 차수이다. 송신 안테나와 활성 안테나의 조합으로 만들어지는 조합 안테나 인덱스는 식 (1)에서의 m_t 의 값으로 나타낼 수 있다. 각 활성화 되는 송신 안테나를 통해 변조된 심볼을 송신하기 때문에 식 (1)에서의 m_s 만큼 더 많은 정보를 송신하는 것이 가능하다. 예를 들어 $N_t = 7, N_a = 3, M = 4$ 이라고 가정하면, 식 (1)을 이용한 조합의 수를 통해서 만들어지는 정보 비트는 $\lfloor \log_2(N_t C_{N_t}) \rfloor = \lfloor \log_2 \binom{7}{3} \rfloor = 5$ 이고 심볼 비트는 $\log_2(4) = 2$ 이므로 전송 가능한 총 비트는 7개이다. 예제를 통해 GSM을 이용해 전송할 수 있는 정보 비트의 수가 SM보다 많음을 확인할 수 있다.

2.2 Maximum Likelihood (ML) 검출 기법

ML 검출 기법은 선형 MIMO 채널에서 수신된 신호를 전체 송신 가능한 신호와 비교하여 검출하는 기법으로 일반적으로 그림 1과 같은 시스템에서 적용이 가능하다.

여기서 송신 안테나는 m 개 그리고 수신 안테나는 n 개라고 가정한다. 그리고 수신된 신호를 $y = Hs + v$ 로 표현하고 $y \in \mathcal{C}^n$ 는 수신된 벡터 심볼, $H \in \mathcal{C}^{n \times m}$ 는 채널 정보, $s \in \mathcal{S}^m$ 는 송신하는 벡터

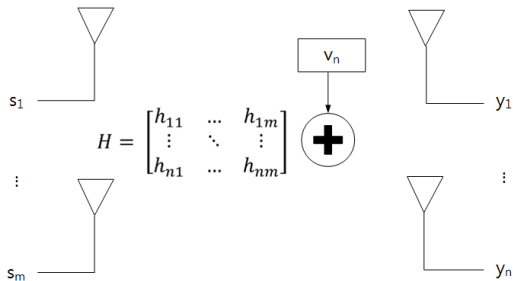


그림 1. MIMO 시스템
Fig. 1. MIMO System

심볼, $v \in \mathcal{C}^n$ 는 Additive White Gaussian Noise (AWGN)을 나타낸다. 주어진 시스템을 수식적으로 해석하면, 에러가 발생할 확률을 줄이는 것이 결국 정확하게 검출할 확률을 높이는 것을 의미하므로 식 (2)를 이용하여 문제를 해석할 수 있다.^[10]

$$P(s = \hat{s} | y, H) = \frac{P(s = \hat{s}) f_{y|s, H}(y | s = \hat{s}, H)}{f_{y|H}(y | H)} \quad (2)$$

여기서 $f_{y|H}$ 는 H 가 주어졌을 때 y 에 대한 조건부 확률밀도함수이고 $f_{y|s, H}$ 는 (s, H) 가 주어졌을 때의 y 에 대한 조건부 확률밀도함수이다. 이 함수를 시스템 모델에 적용하면 식 (3)과 같이 유도할 수 있다.

$$f_{y|s, H}(y | s = \hat{s}, H) = f_v(y - H\hat{s}) \quad (3)$$

$$f_v(v) = \frac{1}{(\pi\sigma^2)^n} e^{-\frac{1}{\sigma^2} \|v\|^2} \quad (4)$$

이 때 식 (4)의 v 는 가우시안 잡음 확률밀도를 말한다. 위의 함수들을 이용하여 그림 1에서 주어진 문제를 수신 단에서 채널 정보 H 와 모든 심볼 \hat{s} 를 완벽하게 알고 있다고 가정하고, 식 (5)를 이용하여 해석한다.

$$\hat{s}_{ML} = \underset{s \in \mathcal{S}^m}{\operatorname{argmin}} \|y - Hs\|^2 \quad (5)$$

수신한 신호 y 와 Hs 값의 차이를 비교함으로써 가장 낮은 값을 가지는 것이 가장 유사도가 높다고 판정하고 이를 이용하는 것이 ML 검출 방법이다.

III. GSM을 위한 저복잡도 ML 검출 기법

본 논문에서는 GSM에 최적화된 저복잡도 ML 검출 기법을 제안한다. 시각적으로 기존의 방식과 제안하는 방식의 차이를 그림 2에서 알 수 있다. 기존 GSM의 ML 검출 기법에서는 채널 정보를 2차원에서의 xy 축으로 표현하는데, x 축은 수신 안테나의 수, y 축은 조합 안테나의 인덱스로 구성한다. 제안하는 방식에서는 수신 안테나의 수와 송신 안테나의 수로 고정된 채널 정보를 2차원의 xy 축으로 표현하고 활성 안테나의 수를 z 축으로 나타낸다. 이렇게 활성 안테나의 수만큼 나누고 채널 계수가 큰 활성 안테나부터 우선순위를 부여한 후 하나씩 검출한다. 그림에서 검

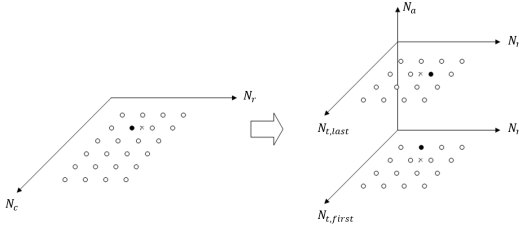


그림 2. CSI의 적용 형태
Fig. 2. Application format for CSI

은색 점은 송신한 심볼을 나타내고 x표시는 수신한 심볼을 의미한다.

3.1 시스템 모델

시스템 모델은 MIMO에서의 무선 통신 환경을 기준으로 하여 그림 3과 같이 \$N_t\$개의 송신 안테나, \$N_a\$개의 활성 안테나, \$N_r\$개의 수신 안테나, 변조 차수 \$M\$을 이용하도록 구성한다. GSM에서 송신 안테나와 활성 안테나의 조합으로 만든 \$N_c = \lfloor \log_2 \left(\frac{N_t}{N_a} \right) \rfloor\$를 이용하여 조합 안테나 인덱스를 만들고 각각 활성화된 안테나에서 M-ary Phase Shift Keying (MPSK)의 심볼을 전송한다. 송신 단계에서는 심볼의 정보가 \$b = [b_1 b_2 \dots b_k]\$ 비트의 형태로 입력으로 들어가서, 스위치를 통해 \$N_t\$개의 송신 안테나 중에서 \$N_a\$개의 활성 안테나가 Mapper를 통해 동작한다.

그림에서와 같이 채널 \$H\$는 크기가 \$N_r \times N_t\$이고 잡음 \$w = [w_1 w_2 \dots w_k]\$로 표현한다. 수신 단계에서 수신하는 신호는 식 (6)과 같이 표현이 가능하며, 여기서 \$\rho\$는 각 송신 안테나의 평균 SNR을 의미하며 \$H\$와 \$w\$는 독립동일분포에 따라 평균이 0, 분산은 1인 분포를 가진다.

$$y = \sqrt{\rho} H w + w = \sqrt{\rho} \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r1} & \dots & h_{N_rN_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_{N_r} \end{bmatrix} \quad (6)$$

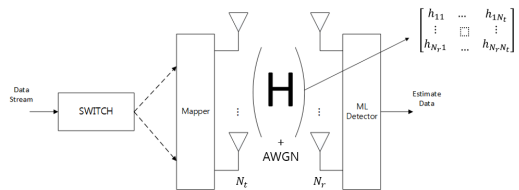


그림 3. GSM 시스템 모델
Fig. 3. Entire GSM system model

3.2 우선순위를 이용한 ML 검출 기법

일반적인 ML 검출 기법의 채널 정보는 활성 안테나를 기준으로 만들어지는데 그 크기는 \$N_r \times N_c\$와 같다. 이렇게 채널 정보를 구성할 경우에 조합 안테나 인덱스에 따라 고려해야할 채널 정보의 크기가 커지는데 이로 인해 ML 수신기법의 복잡도를 증가시킨다.^[11] 제안한 ML 수신 기법은 식 (7)을 이용하여 수신한 신호를 검출하게 되는데, 이 때 \$p_y\$는 수신된 신호 \$y\$와 송신 신호 벡터 \$x\$, 안테나 인덱스 \$l\$에 대한 수신된 신호 벡터 \$y\$의 조건부 확률 밀도 함수는 수식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} [\hat{l}_{ML} \hat{s}_{ML}] &= \underset{l,s}{\operatorname{argmax}} p_Y(y|x,H) \\ &= \underset{l,s}{\operatorname{argmin}} \| y_i - \sqrt{\rho} H_{l,s} s \|^2_F \end{aligned} \quad (7)$$

위 수식에서 \$\| \cdot \|_F\$은 Frobenius Norm 이고 채널 정보 \$H\$를 완벽하게 알고 있다고 가정한다. ML 수신 기법에서는 Euclidean Distance (ED)를 최소화 하는 심볼을 선택하는 신호 검출과정을 이용한다.^[12] 전체적인 시스템의 모델이 기존의 방식과 유사하나 제안하는 ML 수신 기법에서는 검출 방법과 채널 정보의 크기가 바뀐다. 전체적인 시스템의 흐름을 그림 4의 알고리즘을 통해서 요약 정리한다.

크기가 \$N_r \times N_c\$인 채널 정보 \$H\$ 대신에 \$N_r \times N_t\$ 크기의 \$H_{mod}\$를 이용하는데, 채널 정보를 완벽하게 알고

Algorithm 1 Modified ML decoding

- 1: $ant_idx(n)$ = the index of active antenna
- 2: H_{mod} = the modified channel information
- 3: r = the total set of active antenna
- 4: \hat{r} = estimated index of active antenna
- 5: $d(x, y)$ = the Euclidean distance between x and y
- 6: **for** $k = 1 : N_r$ **do**
- 7: $[\hat{l} \hat{s}] = \underset{l,s}{\operatorname{argmin}} \| y_k - \sqrt{\rho} H_{mod,(l,k)} s \|^2_F$
- 8: **do ascending** \hat{l} values
- 9: $d(y_k, \sqrt{\rho} H_{mod,(1,k)}) > \dots > d(y_k, \sqrt{\rho} H_{mod,(l,k)})$
- 10: **for** $j = 1 : N_a$ **do**
- 11: $\hat{r} = [ant_idx(1) \dots ant_idx(N_a)]$
- 12: **end for**
- 13: **if** $\hat{r} == r$ **then**
- 14: **do nothing**
- 15: **else**
- 16: $\hat{r} = mean(r)$
- 17: **end if**
- 18: **end for**

그림 4. 우선순위를 기반 ML 검출 알고리즘
Fig. 4. ML decoding algorithm based on priority

있다고 가정하기 때문에 우선순위를 기반으로 활성 안테나를 하나씩 검출하는 것이 가능하다. 이렇게 검출한 안테나 인덱스를 순차적으로 내림차순로 정렬한다. 검출한 신호에서 매칭되는 안테나 인덱스가 없을 경우에는 전체 안테나 인덱스들의 평균값으로 대체한다.

SM과 비교하여 $N_t > 4, N_a \geq 2$ 때부터 안테나 조합을 통해서 만들어지는 조합 안테나 인덱스가 송신 안테나의 수보다 크다. 이와 동시에 식 (9)을 통해서 계산할 수 있듯이, 기존의 채널정보의 크기가 $N_t > 4, N_a \geq 2$ 부터 제안하는 채널 정보의 크기보다 크다.

$$N_r C_{N_c} = \frac{P(N_t, N_a)}{N_a!} = \frac{N_t!}{N_a!(N_t - N_a)!} \quad (9)$$

3.3 복잡도 계산

GSM의 안테나 조합의 수가 전체 송신 안테나의 수보다 크게 되는 시점부터, 제안하는 ML 수신 기법이 이용하는 채널 정보의 크기가 기존 방식에 비해 $\frac{N_t}{N_c} = \frac{N_a!(N_t - N_a)!}{(N_t - 1)!}$ 배만큼 크기가 작아지므로 이득이 발생한다. 이 때 기존의 채널 크기는 $N_r \times N_c$ 이고 제안하는 방법에서의 채널 크기는 $N_r \times N_t$ 이다. N_t 가 늘어날수록 제안하는 채널 정보의 크기가 선형적으로 감소한다. 그림 5를 통해 $N_t = 8, N_r = 4, M = 4$ 일 경우를 기준으로 N_a 값의 변화에 따른 채널 정보 크기의 변화를 확인하였다. 또한 활성 안테나의 수가 많아질수록 기존의 방법에 비해 제안하는 채널 정보의 크기가 상대적으로 작아짐을 확인할 수 있다. 활성 안테나의 수가 송신 안테나의 수의 반이 되었을 때가 조합

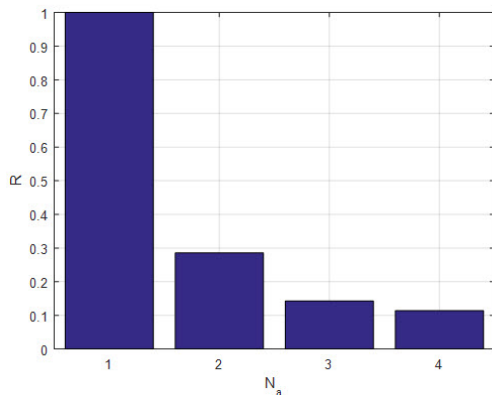


그림 5. N_a 의 변화에 따른 복잡도 비교
Fig. 5. Comparison of complexity according to variation of N_a

의 최대치가 만들어지는데, 이 때 채널 정보의 크기가 약 11% 감소한다.

위에서 계산한 채널 정보의 크기는 GSM의 복잡도의 영향을 미치는 변수이다. 이 변수와 심볼의 변조 차수를 통해 기존의 GSM을 위한 ML 수신 기법의 복잡도를 식 (10)을 통해 계산할 수 있다.^[4]

$$R_{conv} = N_r N_c M (N_a + 2) \quad (10)$$

GSM을 위한 기존의 ML 수신 기법의 복잡도인 R_{conv} 은 ED, $|y - \sqrt{\rho} h_j|^2$ 를 구하는 $N_a + 2$ 의 연산과 채널 정보와 변조 차수의 연산인 $N_r N_c M$ 로 구성된다. 제안하는 기법에서는 H_{mod} 와 같은 고정된 채널 정보를 활성 안테나 수만큼 나누어 계산하기 때문에 이를 위해 N_a 만큼의 계산이 추가적으로 수행되어야하므로 제안하는 ML 검출기의 복잡도는 식 (11)와 같다.

$$R_{proposed} = N_r N_t N_a M (N_a + 2) \quad (11)$$

여기서 심볼 간의 거리를 위한 계산은 같지만 N_a 만큼 반복된 계산과 적용되는 채널 정보의 크기를 이용하여 $N_r N_t N_a M$ 만큼 수행한다. 기존 방식의 복잡도는 N_a 값의 증가에 따라 크게 변화하지만 본 논문에서 제안하는 기법의 경우 채널 정보가 N_a 값의 영향을 상대적으로 덜 받기 때문에 낮은 복잡도를 가진다.

IV. 모의실험 결과

본 장에서는 제안한 ML 수신 기법의 성능을 평가하기 위하여 모의실험을 하였다. 이를 통해 시스템의 각 변수에 따른 복잡도 계산 및 BER 성능 비교를 하였다. 이때 시스템 모델은 GSM에서 Rayleigh Fading 채널과 AWGN 잡음을 가정하고 제안한 ML 검출기를 이용하여 신호를 추출하였다. 주어진 시스템 모델의 환경에 따른 복잡도 변화를 확인하기 위해 N_t, N_r, N_a 값을 변화시켜 기존의 방법과 비교하는 모의실험을 하였다. 그리고 검출 성능을 확인하기 위하여 BER 모의실험을 통해 성능 테스트를 하였다. 이 시스템에서는 N_t, N_r, N_a 는 각각 송신 안테나의 수, 수신 안테나의 수, 활성 안테나의 수를 말하고 m 은 bit per channel use (BPCU)를 의미한다. M 은 변조 차수이며 변조방식으로는 Phase Shift Keying (PSK)를 선정하였다.

그림 6에서 $N_t = 16, N_r = 4, M = 4$ 를 가진 GSM 시스템 모델을 가정하고 활성 안테나의 수를 변화시킴으로써 복잡도를 분석하였다. $N_t = 16$ 로 가정하였기 때문에 최대 조합 안테나 인덱스를 구성하도록 N_a 값을 1에서 8까지만 변화시켜 비교하였고, 이때 기존 방법의 복잡도가 지수함수적으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

두 번째 실험은 그림 7과 같이 $N_a = 2, N_r = 4, M = 4$ 를 가정하고 활성 안테나 수를 2개로 고정시켰기 때문에 송신 안테나 조합의 수가 이득을 볼 수 있는 N_t 을 4에서 16까지 변화시켰다. $N_t = 10$ 일 때 약 45% 복잡도 감소가 있었다.

그림 8의 세 번째 모의실험에서는 이 시스템에서도 최대 조합 안테나 인덱스를 구성하도록 $N_t = 16, N_a = 8, M = 4$ 을 가정하고 N_r 값의 변화에 따른 복잡도를 비교하였을 때 첫 번째 모의실험과 비슷하게 복잡도가 지수함수적으로 증가한다. 그림 6, 7, 8의 결과를 통해 분석하면 기존의 시스템에 제안하는 검출

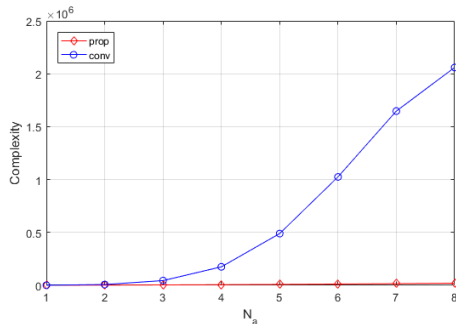


그림 6. 복잡도 비교 ($N_t = 16, N_r = 4$)
 Fig. 6. Complexity comparison ($N_t = 16, N_r = 4$)

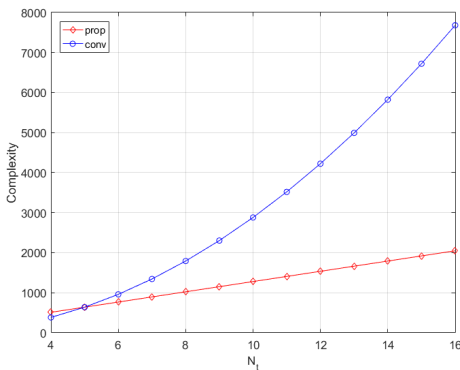


그림 7. 복잡도 비교 ($N_a = 2, N_r = 4$)
 Fig. 7. Complexity comparison ($N_a = 2, N_r = 4$)

기의 복잡도가 상대적으로 낮음을 알 수 있다.

그림 9에서는 $m = 6$ 로 고정하고 $N_t = 4, N_a = 2$ 이고 $N_t = 7, N_a = 2$ 인 두 개의 시스템으로 가정하고 $M = 2, 4$ 로 적용하여 기존의 GSM과 제안하는 기법에서의 성능을 비교하였다. 일반적인 ML 수신 기법에서는 전체 송신 안테나의 수가 적고 변조 차수가 높을 때 좋은 성능이 나온다. 이처럼 QPSK를 이용한 모의실험에서는 기존의 시스템과 1 dB의 성능 차이가 있고 BPSK를 이용한 모의실험에서는 2 dB의 차이가 있다. 이로 보아 심볼 검출 성능이 1 dB 정도 좋은 것을 확인하였다.

그림 10의 모의실험에서는 시스템 모델의 조건을 $M = 4, N_r = 4$ 로 지정하였고, $N_t = 4, N_a = 2, N_t = 7, N_a = 2, N_t = 8, N_a = 4$ 세 가지의 시스템을 통해서 조합 안테나 인덱스를 증가시켰다. 이 인덱스의 증가시키면 m 의 값이 4, 6, 7, 8로 점차적으로 변화하는

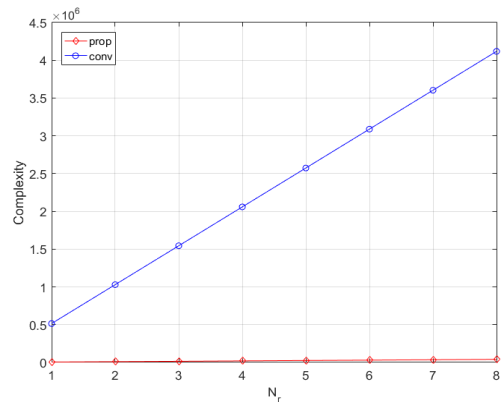


그림 8. 복잡도 비교 ($N_t = 16, N_a = 8$)
 Fig. 8. Complexity comparison ($N_t = 16, N_a = 8$)

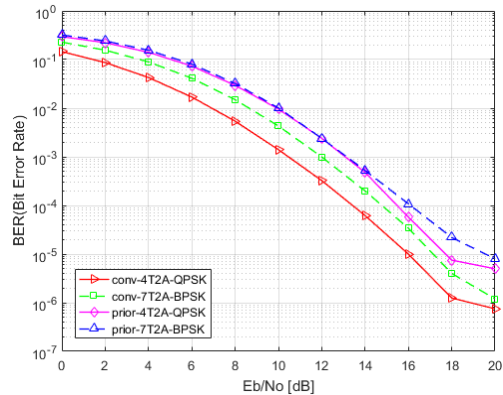


그림 9. BER 비교 ($m = 6, N_r = 4$)
 Fig. 9. BER comparison ($m = 6, N_r = 4$)

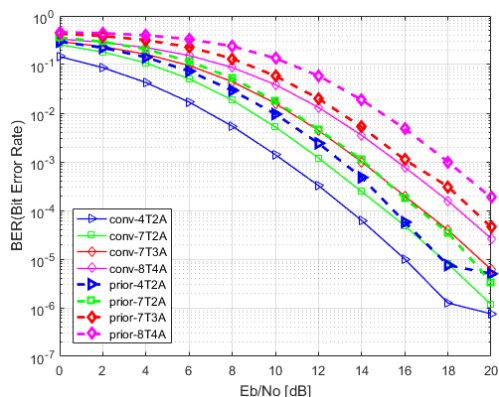


그림 10. BER 비교 ($N_r = 4, M = 4$)
 Fig. 10. BER comparison ($N_r = 4, M = 4$)

데 이것을 기준으로 BER를 비교하였다. 제안하는 ML 수신 기법을 이용하는 GSM이 기존의 방법에 비해 BER이 10^{-4} 일 때, 평균적으로 약 2.5 dB 손해를 보는 것을 보여준다. 그림 9와 그림 10을 비교하여 분석했을 때 제안하는 기법이 안테나 인덱스 복원율이 낮으나 심볼 검출 성능이 좋으므로, 심볼 변수의 차수를 증대시켜 적절한 BPCU값으로 고정시키면 전체적인 성능 감소를 줄일 수 있다. 이는 제안하는 기법이 안테나 인덱스를 검출할 때 적은 채널 정보를 이용하여 각각의 활성화되는 송신 안테나를 따로 검출한 후에 심볼을 검출하기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 GSM에서 변형한 채널정보를 이용하는 ML 수신 기법을 제안하였다. 기존의 ML 수신 기법은 활성 안테나의 수에 따라 채널 정보의 크기가 커지기 때문에 높은 복잡도를 가지는데, 이는 시스템을 구현할 때 큰 문제가 된다. 기존의 시스템과 달리 제안한 ML 수신기는 채널 정보의 크기가 시스템에서 정해진 송신 안테나의 수와 수신 안테나의 수에 의해 고정된다. 이 채널 정보를 이용하여 우선순위를 기반으로 각각의 활성 안테나를 따로 검출한 후에 심볼을 검출한다. 이러한 검출 방식 때문에 안테나 인덱스를 수신하는 경우 기존의 방식과 비교하여 BER이 10^{-4} 일 때, 약 2 dB 정도 부족한 성능을 가진다. 그러나 심볼의 복원율이 높으므로 변조 차수를 증대시켜 BPCU값을 적절하게 조정하면 전체적인 성능 감소를 줄일 수 있다.

시스템을 구성할 때 중요한 요소인 복잡도 계산을

모의실험에서 확인할 수 있다. 기존의 방식에서는 N_a, N_r 의 값이 변화하는 경우에는 복잡도가 지수함수적으로 증가하지만 제안하는 방식은 복잡도가 선형적으로 변화하기 때문에 상대적으로 변화가 없는 것처럼 보인다. 그리고 $N_r = 10$ 일 때에는 복잡도가 약 45% 감소하는 것을 분석하였다. 그러므로 활성 안테나의 수에 변화 따라 시스템의 복잡도의 변화가 거의 없기 때문에 기존의 ML 수신기보다 구현 가능성이 높다. 이를 통해 Software Defined Radio (SDR)을 활용하여 주파수 효율 이득을 가지는 GSM을 실제로 구현하는 것이 가능하다. 향후 SDR을 통하여 제안하는 기법을 구현하여 성능 테스트를 하는 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] M. B. Shahab, M. Irfan, M. F. Kader, and S. Y. Shin, "User pairing schemes for capacity maximization in non orthogonal multiple access systems," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 16, no. 17, pp. 2884-2894, Dec. 2016.
- [2] H. S. Kang, Y. B. Song, D. Kwon and D. K. Kim, "Key techniques and performance comparison of 5G new waveform technologies," *J. KICS*, vol. 41, no. 1, pp. 142-155, Jan. 2016.
- [3] B. Shim and B. Lee, "Evolution of MIMO technology," *J. KICS*, vol. 38, no. 8, pp. 712-723, Aug. 2013.
- [4] M. Irfan, J. W. Kim, and S. Y. Shin, "Spectral and energy efficient spatially modulated non-orthogonal multiple access (NOMA) for 5G," *J. KICS*, vol. 40, no. 8, pp. 1507-1514, Aug. 2015.
- [5] A. Younis, N. Serafimovski, R. Mesleh, and H. Haas, "Generalised spatial modulation," *2010 Conf. Record of the 44th Asilomar Conf. Sign., Syst. and Comput.*, pp. 1498-1502, Nov. 2010.
- [6] T. Handte, A. Muller, and J. Speidel, "BER analysis and optimization of generalized spatial modulation in correlated fading channels," *Veh. Technol. Conf. Fall 2009*, pp.

- 1-5, Sept. 2009.
- [7] M. Čirkić, *Efficient MIMO Detection Methods* (2014), Retrieved Dec., 12, 2016, <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A690022&dswid=1128>
- [8] E. T. Jeon, S. M. Yoon, J. S. Lee, D. W. Woo, and K. Lee, "A low-complexity sphere decoding algorithm for generalized spatial modulation," *J. KIICE*, vol. 20, no. 1, pp. 30-36, Jan. 2016.
- [9] Y. Xiao, Z. Yang, L. Dan, P. Yang, L. Yin, and W. Xiang, "Low-complexity signal detection for generalized spatial modulation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 403-406, Apr. 2014.
- [10] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, and L. Szczecinski, "Spatial modulation: optimal detection and performance analysis," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 8, pp. 545-547, Aug. 2008.
- [11] H. Men and M. Jin, "A low-complexity ML detection algorithm for spatial modulation systems with PSK constellation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 8, pp. 1375-1378, Jun. 2014.
- [12] P. E. Danielsson, "Euclidean distance mapping," *Computer Graphics and Image Process.*, vol. 14, no. 3, pp. 227-248, Nov. 1980.

이 만 희 (Man Hee Lee)



2015년 2월 : 국립금오공과대학교 전자공학부 졸업
2016년 3월~현재 : 국립금오공과대학교 IT융복합공학과 석사과정
<관심분야> Next Generation Network (5G), Future Radio Access

신 수 용 (Soo Young Shin)



1999년 2월 : 서울대학교 전기공학부 졸업
2001년 2월 : 서울대학교 전기공학부 석사
2006년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2010년~현재 : 국립금오공과대학교 전자공학부 교수

<관심분야> 5G and FRA, Wireless Communication/Network, Internet of Things, signal processing, etc.