

# 단일표본관측을 이용한 직교진폭변조 신호의 최우 변조분류 성능

강 석 근\*

요 약

본 논문에서는 다중레벨 직교진폭변조 신호를 위한 최우 변조분류기법의 성능을 분석한다. 기존의 연구와는 달리 여기서는 가용 변조방식에 대한 상대적인 분류성능과 단일표본관측을 적용할 경우 최우 분류기의 성능한계 등을 제시하였다. 이를 위하여 본 논문에서는 가용 성상도에서 심볼간 최소 유클리드 거리를 동일하게 하여 심볼의 수가 작은 성상도가 보다 큰 성상도의 부분집합이 되도록 하였다. 그리고 다중가설시험을 위한 표본의 수는 하나로 정하였다. 그 결과 모든 실험에서 신호대잡음비의 증가에 따라 분류성능이 향상됨을 볼 수 있다. 특히, 참인 성상도가 4진 직교진폭변조인 경우 추가적인 정보나 관측표본 없이도 송신기에서 사용된 변조방식을 거의 완벽하게 분류함을 확인할 수 있다. 또한 16진과 64진 신호의 경우 그 부분집합이 되는 성상도에 의하여 공유된 심볼들의 영향으로 오분류 가능성이 상존하지만 단일표본관측만으로도 약 80%의 정분류 성능을 얻을 수 있다.

## Performance of an ML Modulation Classification of QAM Signals with Single-Sample Observation

Seog Geun Kang\*

ABSTRACT

In this paper, performance of a maximum-likelihood modulation classification for quadrature amplitude modulation (QAM) is studied. Unlike previous works, the relative classification performance with respect to the available modulations and performance limit with single-sample observation are presented. For those purposes, all constellations are set to have the same minimum Euclidean distance between symbols so that a smaller constellation is a subset of the larger ones. And only one sample of received waveform is used for multiple hypothesis test. As a result, classification performance is improved with increase in signal-to-noise ratio in all the experiments. Especially, when the true modulation format used in the transmitter is 4 QAM, almost perfect classification can be achieved without any additional information or observation samples. Though the possibility of false classification due to the symbols shared by subset constellations always exists, correct classification ratio of 80% can be obtained with the single-sample observation when the true modulation formats are 16 and 64 QAM.

**키워드** : 변조분류(Modulation Classification), 직교진폭변조(Quadrature Amplitude Modulation), 성상도(Constellation), 다중가설시험(Multiple Hypothesis Test), 가능성함수(Likelihood Function)

### 1. 서 론

자동변조분류(automatic modulation classification : MC)는 군용통신이나 자동 감시시스템(automatic surveillance system)과 같은 비협력 통신(non-cooperative communication)에서 주로 정보획득의 목적으로 수신된 신호의 특징들을 이용하여 신호전송에 사용된 변조방식을 자동적으로 추정·확인해내는 기법이다. 이는 각종 전자·정보전(electronic and informational warfare)과 같은 전통적인 군사용 목적뿐만 아니라 주파수 자원의 관리, 방송형 범용모뎀의 감시, 간섭확인 등의 분야에서 매우 중요한 역할을 차지하고 있다[1, 2].

최근 다양한 형태의 변조방식이 적용된 고속 통신시스템의 비약적인 발전과 함께 자동변조분류기술의 중요성과 활용범위가 더욱 확대되면서 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이들은 대개 형상인식(pattern recognition) 알고리즘에 근거한 준최적 분류기법(suboptimal MC)[2-11]과 결정론(decision theory)에 근거한 최우 분류기법(maximum-likelihood MC : MLMC)[12-15]으로 나누어진다. 전자는 다양한 신호처리 기법을 이용하여 수신신호에 내재된 특징을 추출(feature extraction)하는 부분과 이러한 특징들에 근거하여 신호전송에 사용된 변조방식을 추정하는 형상인식부로 구성된다. 여기서는 영교차율(zero-crossing rate)[3], 계층누적(hierarchical cumulant)[4, 5], 고차상관(higher-order correlation)[6, 7], 통계적 모멘트(statistical moment)[8], 전력추정(power estimation)[9, 10], 웨이브릿변환(wavelet trans-

\* 정 회 원 : 경상대학교 전기전자공학부  
논문접수 : 2004년 5월 22일, 심사완료 : 2004년 12월 20일

form)[11] 등 비교적 단순한 알고리즘이 이용되므로 실제 구현 가능성 측면에서 유리한 장점이 있다. 이에 비하여 후자의 경우, 변조방식을 제외한 대부분의 전송파라미터가 이미 알려진 것으로 가정하는 등 이상적인 환경에서 제한된 수의 변조방식에 대한 다중가설시험(multiple hypothesis test)[9, 15, 16]을 통하여 그 가능성이 가장 크거나 선택에 따른 위험도(risk)가 가장 적은 변조방식이 선택된다. 따라서 최우 변조분류기법은 분류의 정확도 측면에서 준최적 분류기법에 비하여 우수한 성능을 보인다. 하지만 여기서서는 절대적인 분류성능을 구하기 위하여 요구되는 신호표본의 수가 충분히 커야 되므로 가용 변조방식의 수나 각각의 변조방식에서 신호점의 수가 증가됨에 따라 수신기에서의 연산량이 비현실적으로 크게 증가될 수 있으므로 고속 데이터 전송시스템에의 적용이 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 다중레벨 직교진폭변조(quadrature amplitude modulation : QAM) 신호의 최우 변조분류를 위하여 단일표본관측을 사용할 경우의 결정임계치(decision threshold)를 이론적으로 구하고 가용 변조방식들 간의 상대적인 성능을 분석하고자 한다. 이를 위하여 직교진폭변조의 평균전력을 동일한 값으로 정규화하는 기존의 방법들[13-15]과는 달리 성상도상의 심볼간 최소 유클리드 거리(minimum Euclidean distance : MED)를 동일하게 하였다. 따라서 여기서 심볼의 수가 작은 성상도(constellation)는 보다 큰 성상도의 한 부분집합이 되므로 동일한 심볼이 다수의 성상도에 공유될 수 있다. 따라서 기존의 최우 분류알고리즘이 관측표본의 수나 그에 따른 수신기에서의 연산복잡도 등에 대한 고려 없이 각각의 가용 변조방식에 대한 절대적인 성능만을 제공하는 반면 본 논문에서 제시되는 알고리즘은 가용 변조방식들 간의 상대적인 분류성능을 파악하는데 있어 유리하다. 뿐만 아니라 이러한 조건은 최근 광범위하게 다루어지고 있는 적응 직교 주파수분할다중화(adaptive orthogonal frequency division multiplexing : AOFDM)[17]나 이산 다중톤(discrete multitone : DMT)[18] 등 고속 병렬전송시스템(parallel transmission system)의 데이터전송 파라미터와도 일치한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 서론에 이은 2장에서는 가용 직교진폭변조 성상도의 가능성함수(likelihood function)가 수식적으로 유도된다. 단일표본관측에 따른 최우 변조분류를 위한 가능성비율시험(likelihood ratio test :

LRT)과 충분통계치(sufficient statistic)를 3장에 그리고 컴퓨터 모의실험 결과와 분석을 4장에 각각 제시하였다. 끝으로 5장에 결론을 정리하여 나타내었다.

## 2. 변조분류를 위한 가능성함수

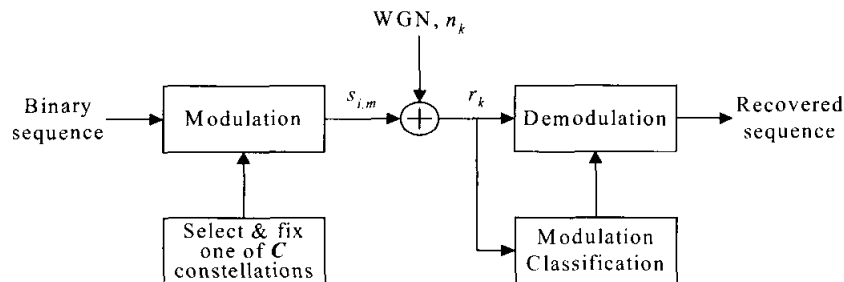
감시시스템 등과 같은 비협력 통신시스템에서 정보는  $C$ 개의 가용 성상도 가운데 하나의 형식으로 변조되고, 수신기는 표본화된 수신신호 파형으로부터 전송에 사용된 성상도를 확인해낸다. 이와 같은 변조분류시스템을 (그림 1)에 개념적으로 나타내었다. 여기서  $n_k$ 는 평균이 0이고 분산이 차원당  $\sigma^2/2$ 인 2차원 가산성 백색 가우시안잡음을 나타내는 랜덤변수이다.

만일 가용 변조방식중  $l$ 번째 성상도상의  $\dim(M_l)$ 개의 심볼 가운데 임의의  $m$ 번째 심볼  $s_{i,m,l} = (A_{i,m,l}, A_{i,m,Q})$ 이 전송된 경우  $k$ 번째 표본화된 수신신호 파형의 동위상(in-phase)과 이위상성분(quadrature component)은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\dim(M_l)$ 는 전체  $C$ 개의 가용 변조방식 집합  $M = M_0, M_1, \dots, M_{C-1}$ 의 부분집합인  $M_l$ 상의 심볼의 수를 나타낸다.

$$\begin{aligned} r_{k,I} &= A_{i,m,I} + n_{k,I} \\ r_{k,Q} &= A_{i,m,Q} + n_{k,Q} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $r_{k,I}$ 와  $r_{k,Q}$ 는 수신된 복소신호  $r_k$ 의 동위상과 이위상성분을 각각 나타내고,  $j = \sqrt{-1}$ 이다. 첨자  $(i, m, l)$ 는  $l$ 번째 성상도상의  $m$ 번째 심볼의 동위상성분이다. 그리고  $n_{k,I}$ 와  $n_{k,Q}$ 는 가우시안 잡음변수의 동위상과 이위상성분을 각각 나타내며, 통계적으로 독립이며 동일한 분포(independent and identically distributed : i.i.d.)를 가지는 것으로 가정한다. 따라서 이러한 경우 수신신호 표본  $r_k$ 의  $s_{i,m}$ 에 대한 조건부 확률밀도함수(probability density function : PDF)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p(r_k | s_{i,m}) &= \frac{1}{2\pi\sigma_i^2} \exp \left[ -\frac{(r_{k,I} - A_{i,m,I})^2 + (r_{k,Q} - A_{i,m,Q})^2}{2\sigma_i^2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$



(그림 1) 변조분류시스템의 개념적인 블록도

여기서  $\sigma_i^2$ 는  $i$ 번째 정방형 직교진폭변조(square QAM) 성상도의 잡음분산을 나타내며 신호대잡음비(signal-to-noise ratio : SNR)와는 다음과 같은 관계에 있다.

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left( \frac{E_{s,i}}{\sigma_i^2} \right) \text{ for } 0 \leq i \leq C-1, \quad (3)$$

여기서  $E_{s,i} = d^2_E (2^{q_i} - 1)/6$ 는  $i$ 번째 성상도의 평균전력이고  $q_i = \log_2 \dim(M_i)$ 는 성상도  $M_i$ 에 대한 비트수를 나타내며 짝수인 것으로 가정한다. 따라서  $M_i$ 가 실제 데이터 전송에 사용된 성상도라면 표본신호  $r_k$ 의 가능성함수는 다음과 같이 주어진다.

$$p(r_k | M_i) = \sum_{m=0}^{\dim(M_i)-1} p(r_k | s_{i,m}) \cdot p(s_{i,m}), \quad (4)$$

여기서  $p(s_{i,m})$ 는  $s_{i,m}$ 의 사전확률(a priori probability)이다. 만일 성상도  $M_i$ 상의 모든 심볼들이 동일한 발생확률을 가지는 것으로 가정하면 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(r_k | M_i) = \frac{1}{\dim(M_i)} \sum_{m=0}^{\dim(M_i)-1} p(r_k | s_{i,m}). \quad (5)$$

따라서 각 변조방식의 가능성함수는 성상도상의 모든 심볼에 대한 표본신호의 조건부확률의 산술평균(arithmetic mean)으로 계산된다.

### 3. 다중레벨 직교진폭변조 신호의 최우 변조분류

수신신호 파형으로부터 표본신호  $r_k$ 에 대한 다중가설시험(multiple hypothesis test)을 위하여  $i$ 번째 가설  $H_i$ ,  $0 \leq i \leq C-1$ ,을 다음과 같이 정의한다[15, 16].

$$\text{가설} : H_i : r_k = s_{i,m} + n_k, \quad s_{i,m} \in M_i,$$

이 때 서로 다른 성상도  $M_i$ 와  $M_l$ 의 가능성함수를 비교하여 다음의 식(6)의 조건이 성립되면 성상도  $M_i$ 를 참인 가설로, 즉 송신기에서 전송된 신호는 가용 변조방식들 가운데  $M_i$ 상의 한 심볼인 것으로 판정한다.

$$p(r_k | M_i) > p(r_k | M_l), \quad 0 \leq i, l \leq C-1, \quad i \neq l. \quad (6)$$

이 경우 최우 변조분류를 위한 가능성비율시험은 다음과 같다.

$$\lambda_{ii}(r_k) = \frac{\sum_{m=0}^{\dim(M_i)-1} \exp(-d_{k,m}^2/2\sigma_i^2)}{\sum_{m=0}^{\dim(M_l)-1} \exp(-d_{k,m}^2/2\sigma_l^2)} \frac{\sigma_l^2 H_l \lim(M_l)}{\sigma_i^2 H_i \lim(M_i)}, \quad (7)$$

여기서  $d_{k,m} = \sqrt{(r_{k,I} - s_{i,m,I})^2 + (r_{k,Q} - s_{i,m,Q})^2}$ 는 표본신호  $r_k$ 와 성상도  $M_i$ 상의  $m_i$ 번째 심볼과의 유클리드 거리이다. 만일 가용 변조방식이 다중레벨 정방형 직교진폭변조로만 구성되어 있고 신호대잡음비가  $R$  dB인 것으로 가정하면, 각각의 성상도에 대한 잡음분산은 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_i^2 = d^2_E \frac{(2^{q_i} - 1) \cdot 10^{-R/10}}{6}. \quad (8)$$

따라서 식 (7)의 가능성비율시험은 아래와 같이 변환될 수 있다.

$$\lambda_{ii}(r_k) = \frac{\sum_{m=0}^{\dim(M_i)-1} \exp(-L_i \cdot \mathcal{D}_{k,m}^2)}{\sum_{m=0}^{\dim(M_l)-1} \exp(-L_l \cdot \mathcal{D}_{k,m}^2)} \frac{2^{q_i} \cdot (2^{q_i} - 1)}{2^{q_l} \cdot (2^{q_l} - 1)} = \eta_{il} \quad (9)$$

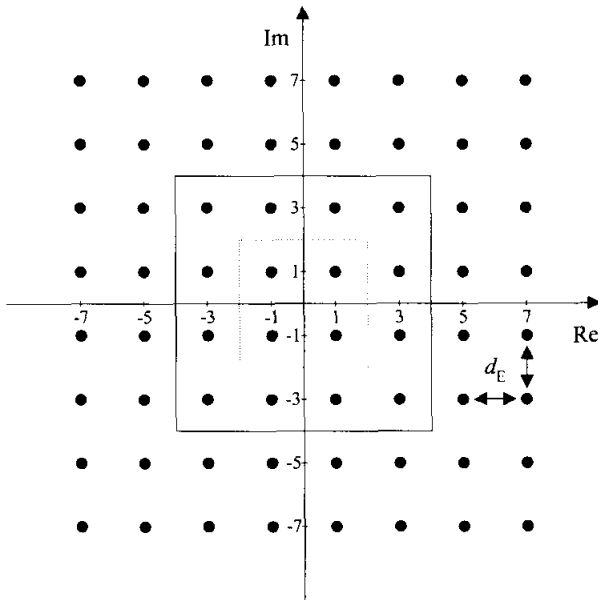
여기서  $L_i = (2^{q_i} - 1)/3 \cdot 10^{-R/10}$ 이고  $\mathcal{D}_{k,m}^2 = (d_{k,m}/d_E)^2$ 는 표본신호와 성상도상의 심볼간 유클리드 거리를 최소 유클리드 거리로 정규화시킨 값이다. 그리고  $\eta_{il}$ 은 결정임계치가 된다. 따라서 직교진폭변조 신호의 분류는 표본신호와 성상도상의 심볼들 간의 유클리드 거리에 대한 지수함수의 합에 의존적임을 알 수 있다. 그리고 이 경우 정규화된 유클리드 거리  $\mathcal{D}_{k,m}$ 는 최우 변조분류를 위한 충분통계치가 된다. 또한, 성상도의 크기가 충분히 클 경우, 즉  $2^{q_i} \gg 1$ 이면 결정임계치는 각각의 변조방식에 요구되는 비트수의 차에 의하여 다음과 같이 근사적으로 결정되어진다.

$$\eta_{il} \approx 2^{2(q_i - q_l)}. \quad (10)$$

### 4. 모의실험 및 성능분석

제시된 최우 변조분류기법의 성능 평가를 위하여 Wei 알고리즘[15]에서와 같이 변조방식을 제외한 모든 신호전송 파라미터가 알려진 것으로 가정하는 이상적인 환경에서 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. [15]에서는 전송경로상의 잡음분산이 알려진 것으로 가정하였으나 본 실험에서는 신호대잡음비가 알려진 것으로 변경하였다. 또한 전자의 경우에는 모든 성상도가 동일한 평균전력을 가지도록 정규화하여 관측표본의 수나 그에 따른 수신기에서의 연산복잡도를 고려하지 않고 절대적인 분류성능만을 제시하였다. 그러나 본 논문에서는 다중가설시험에서 단지 하나의 관측표본만을 사용함으로써 실제 단일표본으로 얻을

수 있는 분류성능의 한계를 신호대잡음비에 따라 제시하였다. 그리고 모든 가용 변조방식이 동일한 최소 유클리드 거리를 가지도록 정하여 다수의 성상도가 동일한 심볼을 공유하도록 정함으로써 성상도에 따른 상대적인 분류성능을 구하였다. 이러한 조건은 최근 광범위하게 다루어지고 있는 고속 병렬전송시스템[17,18]의 데이터전송 파라미터와 일치한다.



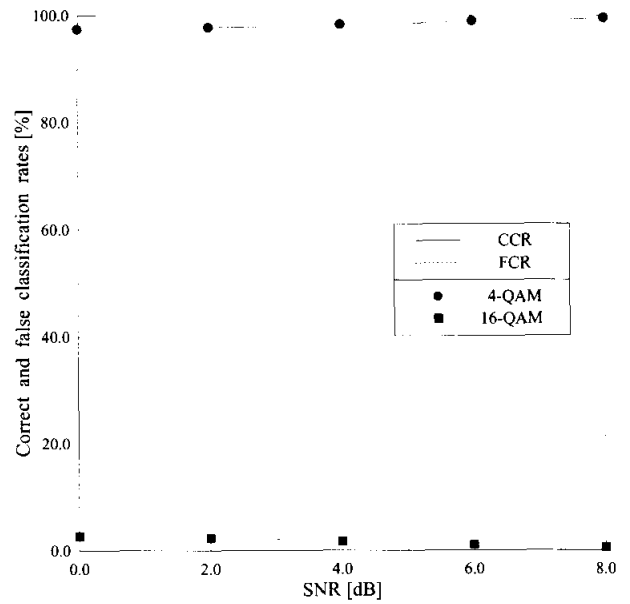
(그림 2) 다중레벨 정방형 직교진폭변조의 성상도

모의실험을 위한 신호성상도로는 그림 2에 나타난 4진, 16진, 그리고 64진 직교진폭변조가 사용되었다. 여기서 Re와 Im은 2차원 성상도의 실수축과 허수축을 각각 나타낸다. 그림에서 4진 직교진폭변조 성상도는 점선으로 둘러싸인 4개의 심볼로 구성되며, 16진 신호는 실선으로 둘러싸인 16개의 심볼로 구성된다. 그리고 전체 64개의 심볼은 64진 신호 성상도를 나타낸다. 전송채널은 2차원 가산성 백색 가우시안 잡음환경으로 하고, 전송에 사용된 전체 복소심볼의 수는  $N_T = 2^{20}$ 으로 하였다.

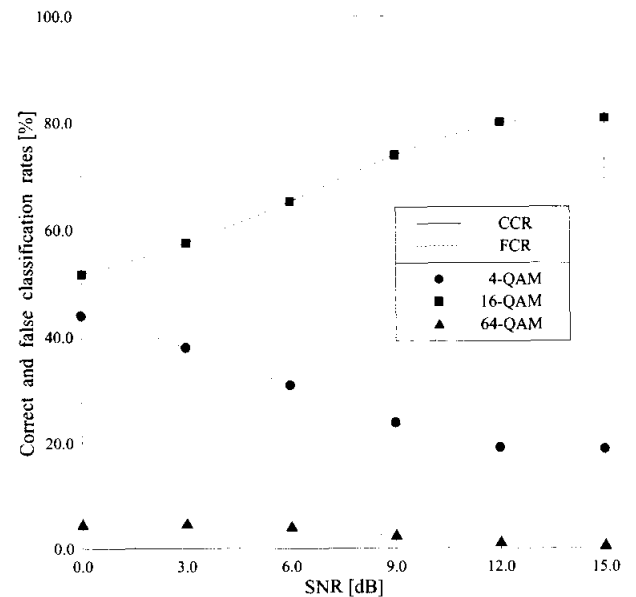
실제 송신기에서 신호전송에 사용된 변조방식이 4진, 16진, 64진 직교진폭변조인 경우의 정분류율(correct classification ratio : CCR)과 오분류율(false classification ratio : FCR)을 (그림 3), (그림 4), (그림 5)에 각각 나타내었다. 정분류율과 오분류율은 다음과 같이 각각 정의된다.

$$CCR, \% = \frac{N_c}{N_T} \times 100, \quad FCR, \% = 100 - CCR, \quad (11)$$

여기서  $N_c$ 는 다중가설시험에 따라 실제 신호전송에 사용된 변조방식을 정확하게 분류한 표본신호의 수를 나타낸다.



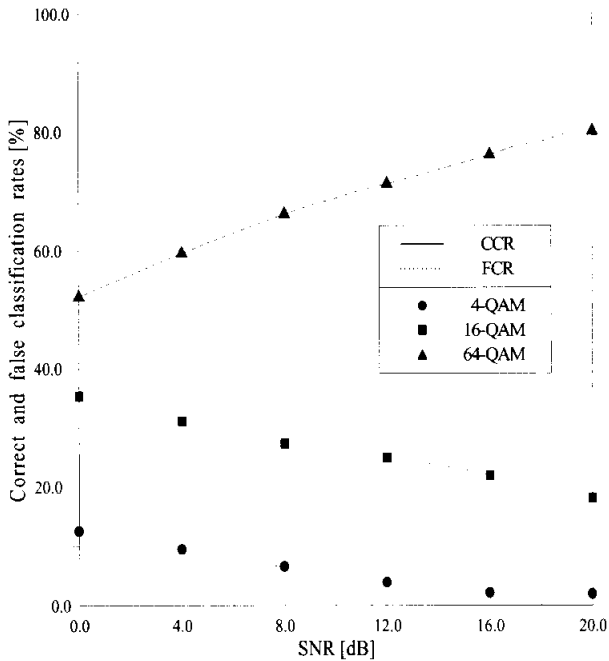
(그림 3) 참인 성상도가 4진 직교진폭변조일 때의 정분류율과 오분류율



(그림 4) 참인 성상도가 16진 직교진폭변조일 때의 정분류율과 오분류율

(그림 3)으로부터 실제 전송에 사용된 성상도가 4진 직교진폭변조인 경우 모든 신호대잡음비 영역에서 정분류율이 96% 이상으로 높게 나타나며, 신호대잡음비가 증가되어 8dB 가량 되면 추가적인 정보나 관측표본이 없어도 거의 완벽한 변조분류가 이루어진다. 그러나 4진 직교진폭변조 성상도가 16진 성상도의 한 부분집합이므로 낮은 신호대잡음비 영역에서는 비록 4% 이하이지만 16진 직교진폭변조로 오분류될 수도 있다. 이에 비하여 64진 성상도 역시 4진 직교진폭변조 성상도를 하나의 부분집합으로 가지지만 그 경우의 수가 매우 작으므로

64진 성상도로 오분류되는 경우는 거의 없을 정도로 미미하다.



(그림 5) 참인 성상도가 64진 직교진폭변조일 때의 정분류율과 오분류율

참인 성상도가 16진 직교진폭변조인 경우를 나타내는 그림 4에서 수신기가 관측표본을 64진 성상도로 오분류하는 비율은 모든 신호대잡음비 영역에서 5%이하로 나타난다. 이에 비하여 4진 직교진폭변조 성상도로 오분류하는 비율은 신호대잡음비가 매우 낮은 영역에서는 40%를 상회할 수도 있음을 알 수 있다. 이러한 오분류율은 신호대잡음비가 증가되면서 감소되어 64진 신호로 오분류하는 비율은 1% 이하로 매우 미미해진다. 하지만 4진 직교진폭변조 신호로 오분류되는 비율은 신호대잡음비의 증가에 따라 감소되지만 SNR ≥ 12dB 이상에서는 거의 20%로 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 이에 따라 참인 성상도에 대한 정분류율은 신호대잡음비에 따라 약 80%까지 증가되지만 12dB 이상에서는 분류성능이 더 이상 향상되지 않는다. 이는 64진 성상도상의 신호들은 16진 신호의 부분집합이 아니지만 4진 성상도상의 모든 심볼은 16진 성상도의 부분집합이므로 수신신호 표본이 4진 직교진폭변조 신호로 오분류될 가능성이 상존함을 나타내며, 그 비율도 정분류율의 1/4정도로 나타난다. 따라서 이와 같이 부분집합의 요소로 공유된 심볼들에 의하여 단일표본관측의 경우 분류성능에 한계가 있는 것으로 분석된다.

신호대잡음비에 따른 단일표본관측의 분류성능의 이러한 특징들은 참인 성상도가 64진 직교진폭변조인 경우를 나타내는 (그림 5)에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 여기서도 SNR이 증가됨에 따라 정분류율이 오분류율에 비하여 훨씬 크게 나타남을 볼 수 있다. 하지만 이 경우에서도 정분류율은

SNR ≥ 18dB에서 거의 80%정도로 포화되는 현상을 보이며, 64진 성상도의 부분집합인 4진과 16진 직교진폭변조 신호로 오분류될 가능성이 각각 2%와 18%정도씩 나타난다. 또한 앞에서 예견되는 바와 같이 두 개의 부분집합 중에서도 참인 성상도와 더 많은 심볼을 공유하고 있는 16진 성상도에 대한 오분류율이 4진 성상도에 비하여 훨씬 크게 나타나는 것도 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 가산성 백색 가우시안잡음 환경에서 다중레벨 직교진폭변조 신호를 위한 최우 변조분류기법의 성능을 제시하고 분석하였다. 절대적인 분류성능의 제시를 목적으로 하는 Wei[15]에 의한 기존의 최우 변조분류기법과는 달리 여기서는 가용 변조방식들에 대한 상대적인 분류성능과 단일표본관측을 적용할 경우 최우 분류기의 성능한계 등을 제시하였다. 이를 위하여 본 논문에서는 가용 변조방식의 성상도에서 심볼간 최소 유클리드 거리를 동일하게 함으로써 심볼의 수가 작은 성상도가 보다 큰 성상도의 부분집합이 되도록 정하였다. 이러한 조건은 최근 광범위하게 다루어지고 있는 고속 병렬전송시스템의 데이터전송 파라미터와 일치한다.

모의실험 결과, 다중가설시험을 위한 표본의 수를 단일표본으로 하더라도 모든 실험에서 신호대잡음비의 증가에 따라 분류성능이 향상됨을 볼 수 있다. 특히, 참인 성상도가 4진 직교진폭변조인 경우 추가적인 정보나 관측표본 수의 증가 없이도 송신기에서 사용된 변조방식을 거의 완벽하게 구별해 낼 수 있다. 또한 16진과 64진 신호의 경우 그 부분집합이 되는 성상도에 의하여 공유된 심볼들의 영향에도 불구하고 단일표본관측만으로도 최대 80%의 정분류 성능을 얻을 수 있다.

하지만 단일 관측표본을 이용한 다중가설시험의 경우 성상도의 크기가 커지면 분류성능에 한계가 있으며, 이는 주로 가용 변조방식들에서 공유되는 심볼에 대한 오판정 가능성에 의하여 비롯되는 것으로 분석된다. 따라서 앞으로 가용 성상도의 구조와 관측표본의 수에 따른 최우 변조분류기의 성능에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 이를 근거로 거의 완벽한 분류를 위한 최소 관측심볼의 수에 대한 분석도 요구된다. 이는 적응 직교 주파수분할다중화와 같이 다수 성상도에 의하여 복합적으로 신호가 구성되는 경우 각 부대역에 사용된 변조방식의 분류를 위한 최적 시스템의 구성방법에 대한 근거자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

[1] A. Swami and B. M. Sadler, "Issues in military communications," *IEEE Signal Process. Mag.*, Vol.16, No.2, pp.31-33, Mar, 1999.

[2] K. Assaleh, K. Farrell, and R. J. Mammone, "A new method of modulation classification for digitally modulated signals," *Proc. IEEE MILCOM'92*, San Diego, CA, Vol.2, pp.712-716, Dec., 1992.

[3] S.-Z. Hsue and S. S. Soliman, "Automatic modulation classification using zero crossing," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, Vol.137, No.6, pp.459-464, Dec., 1990.

[4] P. Marchand, C. Le Martret, and J.-L. Lacoume, "Classification of linear modulations by a combination of different orders cyclic cumulants," *Proc. IEEE Signal Process. Workshop Higher-Order Statistics*, Banff, Alberta, Canada, Vol.1, pp.47-51, July, 1997.

[5] A. Swami and B. M. Sadler, "Hierarchical digital modulation classification using cumulants," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.COM-48, No.3, pp.416-429, Mar, 2000.

[6] B. F. Beidas and C. L. Weber, "Higher-order-correlation-based approach to modulation classification of digitally frequency-modulated signals," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.SAC-13, No.1, pp.89-101, Jan., 1995.

[7] B. F. Beidas and C. L. Weber, "Modulation classification of MFSK signals using the higher-order correlation domain," *Proc. IEEE MILCOM'95*, San Diego, CA, Vol.1, pp.186-191, Nov., 1995.

[8] S. S. Soliman and S.-Z. Hsue, "Signal classification using statistical moments," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.40, No.5, pp.908-916, May, 1992.

[9] K. M. Chugg, C.-S. Long, and A. Polydoros, "Combined likelihood power estimation and multiple hypothesis modulation classification," *Proc. IEEE ASILOMAR'95*, Pacific Grove, CA, Vol.2, pp.1137-1141, Nov., 1995.

[10] A. O. Hero and H. Hadinejad-Mahram, "Digital modulation classification using power moment matrices," *Proc. IEEE ICASSP'98*, Seattle, WA, Vol.6, pp.3285-3288, May, 1998.

[11] K. C. Ho, W. Prokopiw, and Y. T. Chan, "Modulation identification by the wavelet transform," *Proc. IEEE MILCOM'95*, San Diego, CA, Vol.2, pp.886-890, Nov., 1995.

[12] C. S. Long, K. M. Chugg, and A. Polydoros, "Further

results in likelihood classification of QAM signals," *Proc. IEEE MILCOM'95*, Fort Monmouth, NJ, Vol.1, pp.57-61, Dec., 1994.

[13] C.-Y. Huang and A. Polydoros, "Likelihood methods for MPSK modulation classification," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.43, No.2/3/4, pp.1493-1504, Feb./Mar./Apr., 1995.

[14] J. A. Sills, "Maximum-likelihood modulation classification for PSK/QAM," *Proc. IEEE MILCOM'99*, Atlantic City, NJ, Vol.1, pp.217-220, Oct., 1999.

[15] W. Wei and J. M. Mendel, "Maximum-likelihood classification for digital amplitude-phase modulations," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.COM-48, No.2, pp.189-193, Feb., 2000.

[16] H. L. Van Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I*, Wiley, New York, NY, 1967.

[17] T. Keller and L. Hanzo, "Adaptive multicarrier modulation: A convenient framework for time-frequency processing in wireless communications," *IEEE Proc.*, Vol.88, No.5, pp.611-640, May, 2000.

[18] P. S. Chow, J. M. Cioffi, and J. A. C. Bingham, "A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.43, No.2/3/4, pp.773-775, Feb./Mar./Apr., 1995.



강석근

e-mail : sgkang@gsnu.ac.kr

1988년 경북대학교 전자공학과(공학사)

1993년 경북대학교 대학원 전자공학과  
(공학석사)

1999년 경북대학교 대학원 전자공학과  
(공학박사)

1993년~1994년 국방과학연구소 연구원

2000년~2003년 National University of Singapore, Research Fellow

2003년~현재 경상대학교 전기전자공학부 조교수, 경상대학교  
공학연구원 책임연구원

관심분야 : 통신이론, 디지털통신, 이동통신, 통신신호처리, 통계  
적신호처리 등