

아날로그 및 디지털 변조 신호의 자동 인식

준회원 서승한*, 윤여종**, 정회원 진영환*, 서영주*, 임선민**, 안재민*,
은창수**, 장원***, 나선필***

Automatic Recognition of Analog and Digital Modulation Signals

Seunghan Seo*, Yejong Yoon** *Associate Members* Younghwan Jin*, Youngju Seo*,
Sunmin Lim**, Jaemin Ahn*, Chang-Soo Eun**, Won Jang***, Sunphil Nah*** *Regular Members*

요약

본 논문에서는 미리 정의된 키 피쳐(key feature)를 수신된 변조 신호로부터 추출하여 동등 이득 조합(equal gain combining) 기법을 적용하는 자동 변조 인식 알고리즘을 제안하고, 의사 결정 이론(decision-theoretic) 알고리즘과 제안된 알고리즘의 성능을 비교, 분석하였다. 제안된 변조 인식 알고리즘은 키 피쳐 추출 단위인 세그먼트 별로 미리 정의된 5 가지 종류의 키 피쳐를 추출하고, 전체 프레임에 걸쳐 평균화된 각 키 피쳐값을 결정-순서도(decision flowchart)에 적용하여 수신 신호의 변조 형식을 구분한다. 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 아날로그 변조 신호인 AM, FM, SSB 신호와 디지털 변조 신호인 FSK2, FSK4, PSK2, PSK4 신호를 대상으로 SNR의 변화 및 신호 수집 시간의 변화에 따른 변조 인식 성공률을 측정하였다. 그 결과 제안된 알고리즘이 기존의 의사 결정 이론 알고리즘에 거의 근접하는 성능을 나타내면서 낮은 복잡도를 나타내었다.

Key Words : Automatic Modulation Recognition; decimation; key feature; segmentation; decision-flowchart;

ABSTRACT

We propose an automatic modulation recognition scheme which extracts pre-defined key features from the received signal and then applies equal gain combining method to determine the used modulation. Moreover, we compare and analyze the performance of the proposed algorithm with that of decision-theoretic algorithm. Our scheme extracts five pre-defined key features from each data segment, a data unit for the key feature extraction, which are then averaged over all the segments to recognize the modulation according to the decision procedure. We check the performance of the proposed algorithm through computer simulations for analog modulations such as AM, FM, SSB and for digital modulations such as FSK2, FSK4, PSK2, and PSK4, by measuring recognition success rate varying SNR and data collection time. The result shows that the performance of the proposed scheme is comparable to that of the decision-theoretic algorithm with less complexity.

1. 서론

일반적으로 무선 통신에 적용되는 변조 신호들은 매우 넓은 범위의 주파수 영역에서, 서로 다른 변조 형식과 주파수를 갖고 송수신된다. 민간이나 군용에서

는 이러한 통신 신호를 모니터링하거나 식별하는 응용이 발전되어 왔는데, 민간에서는 통신 활동의 제어나 허가되지 않은 전송기기 등을 감지할 필요성에 의해 진행되었고, 군용에서는 전자전 (electronic warfare)과 같은 감지 및 탐지 공격을 목적으로 진행

* 충남대학교 정보통신공학과 멀티 이동통신 연구실(shseo@seolhwa.cnu.ac.kr), ** 충남대학교 정보통신공학과 이동통신 연구실,

*** 국방과학 연구소

논문번호 : KICS2004-07-108, 접수일자: 2004년 7월 27일

※본 연구는 국방과학연구소 위탁연구 지원으로 수행되었습니다.

되어 왔다. 이러한 신호 감지를 위하여 기존의 변조 인식기에서는 각 변조 형식 별로 고안된 복조기 뱅크(demodulator bank)를 이용하여 운영자가 복조기의 복조 결과를 관찰하고 분석하는 과정을 통해 수신 신호의 변조 형식을 결정하였다. 그러나 이 방식은 긴 신호 관찰 시간과 경험이 풍부한 운영자를 필요로 하며, 인식 대상 변조 형식의 수만큼 복조기 뱅크를 확보해야하는 어려움이 있었다^[1]. 이러한 기존의 변조 인식기를 개선하고, 사전에 변조 신호에 대한 정보가 없는 상황에서 아날로그 및 디지털 변조 신호로부터 변조 형식을 인식하는 다양한 기법이 연구되었다^{[2]-[5]}. [2]에서는 수신 신호의 포락선과 영점 교차 특성(zero-crossing characteristics)을 이용한 변조 인식기를 제안하고 있다. 이 인식기는 높은 변조도를 갖는 AM, DSB, MPSK 신호에서와 같이 반송 주파수가 심하게 억압되거나 존재하지 않는 상황에서 PLL을 이용하여 높은 SNR 효과를 얻는 장점이 있다. 그러나, CW, AM, FM, FSK2 신호를 대상으로 정확하게 인식하기 위해서는 SNR 20dB 이상의 환경을 필요로 하며, 수신기에서 완벽하게 중심 주파수를 찾지 못하면 성능이 급격하게 열화되는 단점이 있었다. [3]-[5]의 변조 인식기는 거의 모든 종류의 아날로그 및 디지털 신호들을 미리 정의된 특성값 추출과 이에 대한 통계적 특성을 이용하여 인식하고자 했다는 측면에서 의미가 있다. 이 인식기는 AM, DSB, SSB, FM, CW, 잡음, ASK2, ASK4, PSK2, PSK4, FSK2, FSK4 신호를 인식 대상 신호로 설정하여 변조 인식 성공률 측면에서 특정 변조 신호에 대해 좋은 성능을 보였으나, 특성값 추출과 이에 대한 의사 결정 과정, 그리고 이에 따른 변조 인식이라는 실행 순서에서 알 수 있듯이 구현 복잡도 측면에서 문제점을 드러내었다고 볼 수 있다. 또한, [3]의 경우에서는 95% 이상의 변조 인식 성공률을 얻기 위해 40dB 이상의 높은 SNR 환경을 필요로 하는 단점이 있었다.

본 논문에서는 수집된 수신 신호로부터 분할화(Segmentation) 과정을 통해 얻어진 세그먼트별로, 미리 정의된 키 피쳐값을 추출하고, 이러한 키 피쳐값들의 전체 수신 신호에 대한 동등 이득 조합을 산출한 후, 그 결과를 변조 형식 결정에 적용하는 자동 변조 인식 알고리즘을 제안한다. 제안한 변조 인식 알고리즘은 AM, FM, LSB, USB, PSK2, PSK4, FSK2, FSK4 신호를 인식 대상 신호로 하였고, [2]와 [3]에서 나타난 열악한 변조 인식률을 개선하여, SNR 10dB 하에서 95% 이상의 변조 인식률을 얻을 수 있었다. 또한, [3]-[5]에서 적용된 의사 결정 접근 방식

에 비해 낮은 복잡도를 가지면서, 이에 근접하는 변조 인식률을 얻을 수 있었다.

서론에 이어 II장에서는 수신된 신호를 분할화하여 얻어진 세그먼트에서 추출되는 키 피쳐의 정의에 대해 설명하고, III장에서는 II장의 키 피쳐 정의를 바탕으로 제안된 자동 변조 인식 알고리즘 구조에 대해 설명한다. IV장에서는 모의실험을 통하여 제안된 알고리즘의 변조 인식 성공률을 분석하였고, V장에서 결론을 맺는다.

II. 키 피쳐의 정의

본 장에서는 변조 인식 결정 과정에서 적용되는 총 5개의 키 피쳐 정의와 특징에 대해 기술한다.

첫 번째 키 피쳐인 P는 반송 주파수 주변에서의 스펙트럼 대칭성을 이용한 것으로 이를 식으로 표현하면 다음과 같다^[1].

$$P = \frac{P_L - P_U}{P_L + P_U} \quad (1)$$

$$P_L = \sum_{i=1}^{f_m} |X_c(i)|^2, \quad P_U = \sum_{i=1}^{f_m} |X_c(i + f_{cn} + 1)|^2 \quad (2)$$

$$f_{cn} = \frac{f_c N_s}{f_s} - 1 \quad (3)$$

여기서 f_c 는 중심 주파수, f_s 는 샘플링 주파수, 그리고 N_s 는 한 세그먼트의 총 샘플수를 의미하며, $X_c(i)$ 는 해당 세그먼트의 푸리에 변환에 의해 나타난 i -번째 주파수 응답을 의미한다. 식(1)에서의 P는 해당 세그먼트의 스펙트럼 대칭성을 관찰하는 키 피쳐로 중심 주파수를 기준으로 상측파대와 하측파대의 주파수 성분이 대칭인 AM이나 FM 등의 변조 신호는 0에 가까운 값을 나타내고, 단측파대 성분을 갖는 LSB 신호는 +1, USB 신호는 -1에 가까운 값을 갖게 된다.

두 번째 키 피쳐는 선형 위상 요소(linear phase component)를 제거한 극성을 갖는 순간 위상의 표준 편차를 나타낸 것으로 이를 식으로 표현하면 다음과 같다^[1].

$$\sigma_{dp} = \sqrt{\frac{1}{C} \left(\sum_{A_n(n)} \phi_{NL}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{C} \sum_{A_n(n)} \phi_{NL}(i) \right)^2} \quad (4)$$

여기에서 $\phi_{NL}(i)$ 은 선형 위상 요소가 제거된 순간 위상을 의미하며, $A_n(i)$ 는 해당 세그먼트의 i -번째 샘플에 대한 진폭, a_i 는 진폭에 대한 임계값을 의미한다. 또한, C 는 한 세그먼트의 샘플들 중 임계 진폭 a_i 이상의 진폭을 갖는 샘플 수를 의미한다. 식 (4)는 위상 정보를 갖는 변조 신호와 그렇지 않은 변조 신호를 구분하는 데 유용하게 쓰일 수 있는 키 피쳐이다.

세 번째 키 피쳐는 신호의 진폭을 중심-정규화(normalized-centered)하여 푸리에 변환하였을 때 신호 크기의 최대값을 나타낸 것으로 이를 표현하면 식(5)와 같다¹¹⁾.

$$A_{cn}(i) = A_n(i) - 1, \quad A_n(i) = \frac{A(i)}{m_a} \quad (6)$$

$$m_a = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} A(i) \quad (7)$$

식(7)에서 m_a 는 해당 세그먼트의 평균 진폭을 의미하며, 식(6)은 식(7)에서 얻은 평균 진폭을 이용하여 중심-정규화된 진폭을 산출하는 과정이다. 즉, 진폭 변조 신호에 대하여 식(5)의 키 피쳐는 높은 레벨의 값으로 나타나게 되고, 반면 주파수 변조 및 위상 변조 신호에서는 상대적으로 낮은 레벨에서 키 피쳐 값이 분포하게 된다.

네 번째 키 피쳐는 선형 위상 요소를 제거한 절대 순간 위상의 표준 편차를 나타낸 것으로 식(8)과 같이 표현할 수 있다¹¹⁾.

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{\frac{1}{C} \left(\sum_{A_n(i) > a_i} \phi_{NL}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{C} \sum_{A_n(i) > a_i} |\phi_{NL}(i)| \right)^2} \quad (8)$$

식(8)은 위상 절대값의 변화가 있는 변조 방식과 없는 변조 방식을 구분하는 데 적용될 수 있다. 예를 들어, 극성만 반대인 두 레벨의 PSK2 신호의 경우 중심화 후의 위상 절대값은 $\pi/2$ 로 상수가 되며, 이로 인해 위상의 절대값 성분을 갖지 않는 특징이 있다. 반면 PSK4 신호의 경우 PSK2와는 다르게 변조 특성상 절대 위상 성분을 갖고 있다.

다섯 번째 키 피쳐는 중심-정규화된 순간 주파수의 절대치에 대한 표준 편차를 나타낸 것으로 순간 주파수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$f(i) = \frac{\phi_{NL}(i+1) - \phi_{NL}(i)}{f_s}, \quad i = 1, 2, \dots, N_s - 1 \quad (9)$$

식(9)에서 얻은 순간 주파수를 이용하여 키 피쳐를 식으로 표현하면 다음과 같다¹¹⁾.

$$\sigma_{af} = \sqrt{\frac{1}{C} \left(\sum_{A_n(i) > a_i} f_{N(i)}^2 \right) - \left(\frac{1}{C} \sum_{A_n(i) > a_i} |f_{N(i)}| \right)^2} \quad (10)$$

$$f_N(i) = \frac{f_m(i)}{r_s}, \quad f_m(i) = f(i) - m_f \quad (11)$$

$$m_f = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} f(i) \quad (12)$$

식(12)에서 m_f 는 해당 세그먼트의 평균 주파수를 의미한다. 식(11)은 식(12)에서 얻은 평균 주파수를 이용하여 중심-정규화된 순간 주파수를 산출하는 과정이며, r_s 는 심볼 전송률을 의미한다. 식(10)에서 표현한 키 피쳐는 순간 주파수의 크기가 같고 극성이 반대인 FSK2 신호의 경우 주파수의 절대값 성분을 갖고 있지 않은 반면 FSK4 신호는 주파수의 절대값 성분을 갖고 있다.

III. 자동 변조 인식 알고리즘 구조 및 동작

본 장에서는 추출된 키 피쳐를 이용하여 수신 신호의 변조 형식을 결정하는 자동 변조 인식기의 구조와 그 동작에 대해 설명한다. 본 논문에서 제안한 변조 인식기는 3개의 하위 시스템으로 구성되고, 변조 인식기의 주요 블록은 그림 1과 같은 구조로 구성되어 있다.

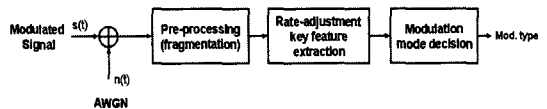


그림 1. 자동 변조 인식기 주요 블록도

1. 전처리 블록

어떠한 사전 정보를 갖지 못한 상태로 변조 인식 대상 신호가 수신되고 있으므로, 변조 인식을 위해 얼마만큼의 신호 수집 시간을 적용해야 하는지를 결정해야 한다. 그 이유는 신호 수집 시간이 얼마인지

에 따라 수신된 신호의 대역폭이나 심볼 전이(symbol transition) 횟수, 위상 변화의 정도 등이 결정되고 이로부터 변조 신호의 특성이 확연히 구분되기 때문이다. 따라서 이러한 관점에서 전처리 블록은 수신 신호의 프레임 길이를 결정하여 키 피쳐 추출 블록으로 프레임 시퀀스를 제공하는 역할을 한다.

2. 적응형 데시메이션 키 피쳐 추출 블록

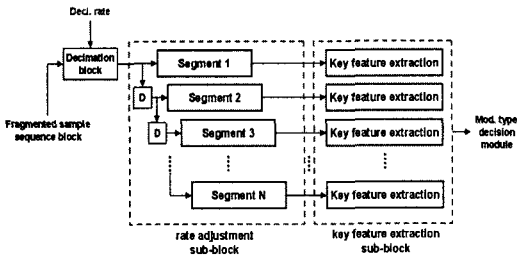


그림 2. 적응형 데시메이션 키 피쳐 추출 블록 구조도

그림 2는 적응형 데시메이션 키 피쳐 추출 블록을 구성하는 적응형 데시메이션 서브블록과 키 피쳐 추출 블록을 나타낸다. 적응형 데시메이션 서브블록은 전처리 블록에서 수집한 프레임 시퀀스에 대해 데시메이션률 N을 적용하여 프레임의 분할화를 수행한다. 데시메이션 과정을 수행하는 이유는 주파수의 분해능을 향상시켜 IF 수신 신호의 주파수 특성을 보다 명확하게 추출하고, 실시간으로 자동 변조 인식과정을 용이하게 처리하도록 데이터의 양을 줄이는 효과가 있기 때문이다. 또한, 그림 2에서와 같이 데시메이션률을 N으로 가정했을 때, 수집된 수신 신호 프레임으로부터 총 N개의 세그먼트들로 분할하고 있다. 이는 수신 신호 프레임을 최대한 이용하고 데시메이션 과정을 반영하기 위해 한 샘플 간격을 두고 병렬 수행함으로써 얻을 수 있다.

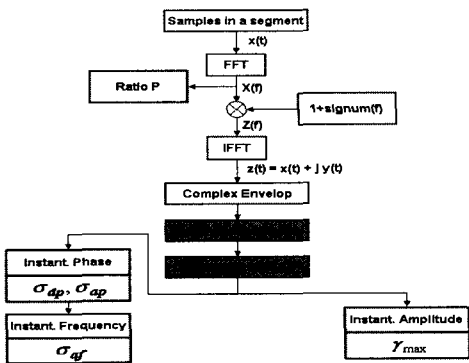


그림 3. 키 피쳐 추출 서브블록 구조도

그림 3의 키 피쳐 추출블록은 본 논문에서 적용되는 5개의 키 피쳐들을 하나의 세그먼트로부터 추출하는 과정을 나타내고 있다. 세그먼트 내의 신호 샘플 $x(t)$ 에 대하여 푸리에 변환을 수행하고, 그 결과로 나타나는 주파수 응답 $X(f)$ 를 이용해 식(1)의 P를 추출한다. 그 다음으로 해석 신호를 생성하기 위해 힐버트 변환과 역푸리에 변환을 수행하게 된다. 여기서 나머지 4개의 키 피쳐를 추출하기 위해서는 2 가지 과정이 선행되어야 한다. 첫 번째 처리 과정은 데시메이션된 세그먼트 신호에 존재하는 선형 위상 성분을 제거하는 과정으로 샘플 신호의 정확한 위상과 주파수를 추출하기 위해 필요하다. 이를 식으로 표현하면 식(13)과 같다.

$$\hat{z}(t) = z(t) \cdot e^{-j2\pi \frac{f_c}{f_s} t} \tag{13}$$

여기서 f_c 와 f_s 는 데시메이션으로 인해 변화된 중심 주파수와 샘플링 주파수를 의미한다. 두 번째 처리 과정은 힐버트 변환에 의해 각 세그먼트의 첫 부분과 마지막 부분에 나타나는 비정상적인 리키지(leakage) 성분을 제거하는 과정으로 세그먼트 앞, 뒤의 일정 샘플 개수만큼을 제거함으로써 처리할 수 있다. 이와 같은 두 가지 처리 과정을 수행한 후 식(4), (5), (8), (10)의 키 피쳐를 추출하게 된다.

3. 변조 모드 결정 블록

그림 4는 키 피쳐 추출 서브블록으로부터 얻어진 각각의 키 피쳐값을 이용하여 현재 수집된 수신 신호의 변조 모드를 최종 결정하는 변조 모드 결정 블록을 나타낸다. 그림에서 실선으로 표시된 블록이

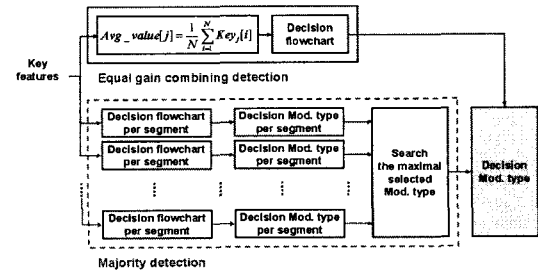


그림 4. 변조 모드 결정 블록 구조도

본 논문에서 제안한 동등 이득 조합이 적용된 변조 인식 결정 방식이며, 점선으로 표시된 부분은 기존의 의사 결정 방식을 나타낸 것이다.

의사 결정 방식을 적용한 경우 각 세그먼트별로 산

출된 5개의 키 피쳐값을 세그먼트 단위로 결정-순서도에 적용되고 해당 세그먼트의 변조 형식을 미리 결정한다. 그 후, 수집된 수신 신호에 대한 변조 형식은 전체 N개의 세그먼트 중 가장 많이 선택된 변조 형식으로 결정된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$N = \sum_{i=1}^8 N_c[i], \quad i \text{ 는 변조 신호의 종류} \quad (14)$$

$$Mod. \text{ type} = \max(N_c[i]) \quad (15)$$

여기서 $N_c[i]$ 는 해당 변조 형식으로 결정된 세그먼트의 개수를 의미한다.

동등 이득 조합을 적용한 변조 모드 결정 방식의 경우 각 키 피쳐 종류별로 전체 N개의 세그먼트에 걸쳐 추출한 키 피쳐값을 평균화하고 그 결과로 얻어지는 최종 5개의 키 피쳐를 결정-순서도에 적용하여 수신 신호의 변조 모드를 최종 결정하게 된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Avg_Key_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Key_n[i], \quad 1 \leq n \leq 5 \quad (16)$$

여기서 n 은 키 피쳐의 종류를 의미한다. 즉, Avg_Key_n 은 n -번째 키 피쳐의 전체 세그먼트에 대한 평균 키 피쳐값을 의미한다.

수신 신호 프레임 내의 특정 세그먼트에서 추출한 키 피쳐값이 예상된 키 피쳐값과 동떨어진 결과로 나타날 경우, 제안된 결정 방식에 비해 기존의 의사 결정 방식이 인식 성능 측면에서 장점을 갖지만, 식(16)과 같은 평균화된 키 피쳐값은 하나의 세그먼트로부터 추출된 키 피쳐값보다 향상된 SNR을 기대할 수 있기 때문에 기존의 방식에 거의 근접한 변조 인식 성능을 기대할 수 있다. 여기서, 두 방식의 연산량을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_{Majority} = N \cdot T_{flow} + T_{select} = N \cdot T_{flow} + (7 \cdot T_{comp.}) \quad (17)$$

$$T_{EGC} = T_{flow} + (N-1) \cdot T_{add} = T_{flow} + (N-1) \cdot T_g \quad (18)$$

식(17)은 식(14), 식(15)를 수행하는데 걸리는 총 시간을 의미하고, 식(16)에서의 정규화 과정은 결정-

흐름도상에서 설정된 각 키피쳐 임계값에 N만큼을 곱한 값과 키 피쳐 누적값을 비교함으로써 대체할 수 있다. 따라서 식(16)을 수행하는 데 걸리는 시간은 식(18)과 같이 표현 가능하다. T_{flow} 는 그림 5에 나타난 결정-흐름도를 통과하는 시간을 나타내며, T_{select} 는 식(15)를 수행하는데 걸리는 시간, $T_{comp.}$ 는 값을 비교하는데 걸리는 시간을 의미한다. T_{add} 는 값의 누적 시간이고, T_g 는 단위 논리 게이트 지연을 의미한다. 여기서 $T_{comp.}$ 는 2개의 게이트가 필요하기 때문에 $2 T_g$ 가 되고, T_{flow} 는 최대 $12 T_g$, 최소 $2 T_g$ 가 소요된다. 따라서 식(17)과 식(18)의 최대 및 최소 소요시간을 표 1과 같이 계산할 수 있다.

표 1. 연산 소요시간 비교

Max ($T_{Majority}$)	$2 T_g(6N+7)$
Min ($T_{Majority}$)	$2 T_g(N+7)$
Max (T_{EGC})	$T_g(N+11)$
Min (T_{EGC})	$T_g(N+1)$

표 1의 결과에서 $\text{Min}(T_{Majority})$ 와 $\text{Max}(T_{EGC})$ 의 차이는 $T_g(N+3)$ 가 되며, 이로부터 동등 이득 조합 방식이 의사 결정 방식보다 최소 $T_g(N+3)$ 만큼 연산 소요 시간이 줄어들음을 알 수 있다. 따라서, 동등 이득 조합 방식이 기존의 방식보다 변조 형식 결정과정의 연산량이 적음을 예상할 수 있다.

4. 결정-순서도 구성

그림 4의 변조 모드 결정 블록에서 적용되는 결정-순서도를 구성하기 위해서는 각 키 피쳐의 확률 분포를 측정하고 이를 토대로 변조 신호 분류를 위해 필요한 임계치를 설정해야 한다. IF 대역에서 자체 생성한 변조 신호의 평균 파워는 표 2와 같다.

표 2. 변조 신호별 평균 파워

변조 신호 종류	평균 파워
AM	0.58
SSB(LSB, USB)	0.07
FM, FSK2, FSK4, PSK2, PSK4	0.5

표 2의 변조 신호별 평균 파워를 적용하여 SNR 10dB하에서 측정된 각 키 피쳐별 확률 분포를 구하

고, 그 결과로 각 키 피쳐를 통해 인식 대상 변조 신호를 구분하는 결정-순서도를 그림 5와 같이 구성하였다.

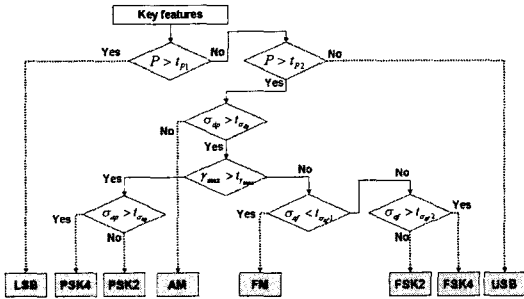


그림 5. 결정-순서도

그림 5에서 보는 바와 같이 입력되는 키 피쳐값에 대한 변조 신호 분류 절차는 다음과 같다.

- 1) 신호의 특성 중 스펙트럼 대칭성을 비교하기 위해 적용되는 식(1)의 키 피쳐를 추출하고 LSB 신호를 분류하기 위해 임계치 t_{p1} 을 적용하고, USB 신호를 구분하기 위해 t_{p2} 를 적용한다.
- 2) 신호의 특성 중 위상 정보를 갖고 있는 변조 신호와 그렇지 않은 변조 신호를 비교하기 위해, 식(4)의 키 피쳐를 추출한 후 임계치와 비교하여 AM 신호를 분류한다.
- 3) 심볼 전이 지점에서 나타나는 진폭의 변화가 상대적으로 높은 PSK 계열 신호와 진폭의 변화가 거의 없는 FM, FSK 계열 신호를 식(5)의 키 피쳐를 추출하여 분류한다.
- 4) 절대 위상 성분의 표준 편차를 의미하는 식(8)의 키 피쳐를 추출하여 임계치와 비교한 후 PSK2와 PSK4 신호를 분류한다.
- 5) 신호 특성 중 절대 주파수 성분의 표준 편차를 의미하는 식(10)의 키 피쳐를 추출한 후 임계치 $t_{\sigma_{a1}}$ 을 적용해 FM 신호를 분류하고, $t_{\sigma_{a2}}$ 를 적용하여 FSK2와 FSK4 신호를 분류한다.

IV. 모의실험 결과 및 성능 분석

제안한 알고리즘의 성능 분석을 위해 다음과 같은 모의실험 파라미터를 설정하고, 모의실험을 통해 나타난 기존의 의사 결정 방식과 동등 이득 조합을 적용한 방식의 변조 인식 성공률을 비교, 분석한다.

표 3. 모의실험 파라미터

Simulation parameter		Value
f_s		8 MHz
f_c		2.6 MHz
Message signal BW		10 KHz
Frequency deviation	FM	10 KHz
	FSK2	50 KHz
	FSK4	25 KHz
Data rate		100 Kbps
# of sample per frame	10ms	65,536
	30ms	229,376
	50ms	393,216
Decimation rates		16
# of sample per segment		1,024
Key feature thresholds	t_{p1}	0.7
	t_{p2}	-0.6
	$t_{\sigma_{wb}}$	0.6
	$t_{\gamma_{max}}$	1.0
	$t_{\sigma_{a1}}$	0.6
	$t_{\sigma_{a1}}$	0.95
	$t_{\sigma_{a2}}$	2.0

표 3은 모의실험에 적용된 파라미터를 나타낸 것으로 샘플링 주파수와 데시메이션률 및 세그먼트 당 샘플수를 감안하여 10ms, 30ms, 50ms내에 수집 가능한 샘플수를 설정하였다. 분할화 과정 후 각 세그먼트 신호 샘플들의 중심 주파수와 샘플링 주파수는 각각 100KHz, 500KHz로 변화한다. 가정 사항으로, 식(10)으로 표현되는 σ_{a1} 에서 이 키 피쳐를 산출하는 데 적용되는 심볼 시퀀스의 심볼률 γ_s 는 변조 신호의 실제 심볼률을 의미하지만, 모의실험에서는 FSK4, PSK4 신호의 경우 0.5, 나머지 변조 신호에 대해서는 1.0이라는 스케일 값으로 설정하여 키 피쳐값을 산출하였다.

표 3의 각 키 피쳐의 임계치는 SNR 10dB하에서 다음의 그림 6 ~ 10과 같은 확률 분포 결과를 바탕으로 설정하였다.

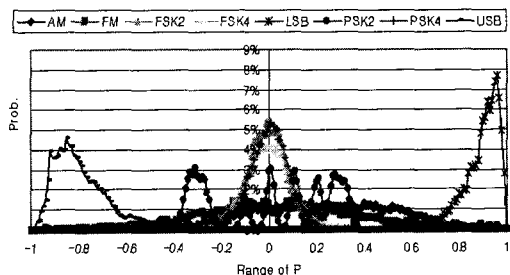


그림 6. Ratio P 히스토그램

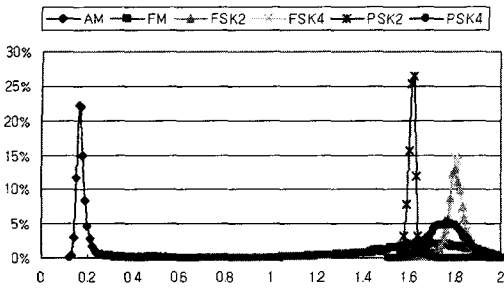


그림 7. Sigma dp 히스토그램

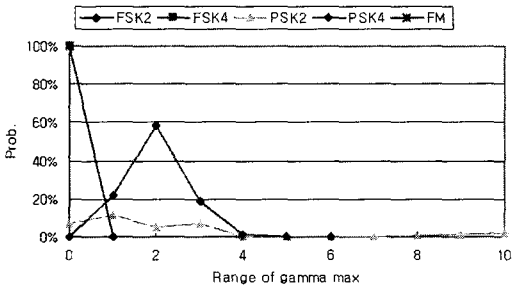


그림 8. Gamma max 히스토그램

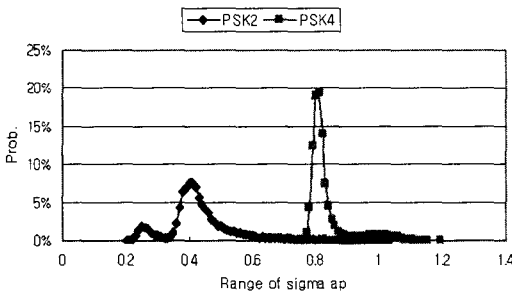


그림 9. Sigma ap 히스토그램

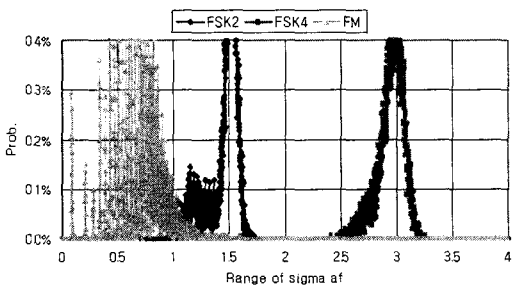


그림 10. Sigma af 히스토그램

표 4 ~ 6에서 보는 바와 같이, 제안된 동등 이득 조합 방식을 적용한 결과 변조 인식 성공률이 SNR 10dB 하에서 95% 이상의 성능을 나타내었고, 디지털 신호의 경우, 표에 반영하진 않았지만 SNR 6dB 이

상에서 두 방식 모두 100%의 인식 성공률을 나타내었다. 모의실험 결과에 보듯이, 아날로그 신호에 대한 변조 인식률은 신호 수집 시간별로 근접한 성능을 나타내었고, 수집 시간이 길어질수록 두 알고리즘 간의 성능 차이가 거의 없는 경향으로 진행됨을 알 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구 내용

본 논문에서는 변조 인식 대상이 되는 AM, FM, LSB, USB, FSK2, FSK4, PSK2, PSK4 신호에 대하여 데시메이션 과정과 동등 이득 조합 방식을 적용한 자동 변조 인식 알고리즘을 제안하였다. 제안된 변조 인식 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 본 논문에서는 동등 이득 조합 방식과 기존의 의사 결정 방식을 적용한 변조 인식률을 모의실험을 통해 비교해 보았다. 동등 이득 조합 방식을 통해 신호 수집 시간 10ms 이상, SNR 10dB 하에서 95% 이상의 변조 인식률을 얻을 수 있었다. 변조 신호의 특성을 파악하기 위한 파라미터로 총 5개의 키 피쳐를 구성하였고, IF 신호의 주파수 분해능과 처리 데이터 양을 줄이는 목적으로 데시메이션 과정을 포함하였다. 또한, 모의 실험 결과 제안된 동등 이득 조합 방식의 성능은 기존에 제안된 의사 결정 방식의 성능과 거의 근사한 변조 인식률을 나타냈으며, 구현의 복잡도와 처리 연산량 측면에서 기존 방식보다 향상된 구조임을 알 수 있었다. 향후 연구 내용으로는 효과적인 신호 관찰 범위 선택과 변조 인식 성능 향상을 위한 적응형 대역폭 추정(adaptive band-width estimation) 과정이 필요하며, 가정 사항으로 설정한 데이터 심볼률 등의 파라미터를 자동으로 추정하는 부분도 연구되어야 할 것이다.

표 4. 수집 시간 10ms 인 경우 인식 성공률 비교

변조 방식	SNR(dB)	의사 결정	동등 이득 조합
AM	6	99 %	98 %
	8	99 %	99 %
	10	99 %	99 %
FM	6	89 %	94 %
	8	94 %	99 %
	10	94 %	99 %
LSB	6	88 %	86 %
	8	95 %	94 %
	10	97 %	97 %
USB	6	86 %	85 %
	8	96 %	94 %
	10	99 %	97 %

표 5. 수집 시간 30ms 인 경우 인식 성공률 비교

변조 방식	SNR(dB)	의사 결정	동등 이득 조합
AM	6	99 %	98 %
	8	100 %	100 %
	10	100 %	100 %
FM	6	97 %	98 %
	8	99 %	100 %
	10	99 %	100 %
LSB	6	93 %	87 %
	8	98 %	96 %
	10	99 %	98 %
USB	6	92 %	89 %
	8	98 %	96 %
	10	100 %	99 %

표 6. 수집 시간 50ms 인 경우 인식 성공률 비교

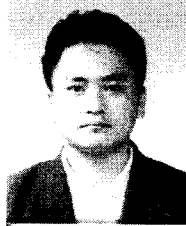
변조 방식	SNR(dB)	의사 결정	동등 이득 조합
AM	6	99 %	99 %
	8	100 %	100 %
	10	100 %	100 %
FM	6	99 %	99 %
	8	100 %	100 %
	10	100 %	100 %
LSB	6	95 %	90 %
	8	98 %	97 %
	10	100 %	98 %
USB	6	92 %	89 %
	8	98 %	97 %
	10	100 %	100 %

참고 문헌

- [1] E. E. Azzouz, A. K. Nandi, *Automatic Modulation Recognition of Communication Signals*, Kluwer, 1996.
- [2] T. G. Callaghan, J. L. Pery, and J. K. Tjho, "Sampling and algorithms aid modulation recognition," *Microwaves RF*, Vol. 24, No. 9, pp. 117-119, 121, September 1985.
- [3] L. V. Dominguez, J. M. Borrallo and J. P. Garcia, "A general approach to the automatic classification of radio communication signals," *Signal Processing*, Vol. 22, No. 3, pp. 239-250, March 1991.
- [4] E. E. Azzouz, A. K. Nandi, "Automatic analogue modulation recognition", *Signal Processing*, Vol 46, pp. 211-222, May 1995.
- [5] E. E. Azzouz, A. K. Nandi, "Automatic identification of digital modulation types", *Signal Processing*, Vol. 47, pp. 55-69, March 1995.

서 승 한(Seunghan Seo)

준회원

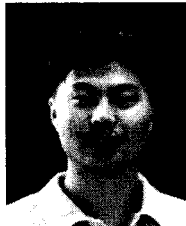


2003년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 졸업
2003년 3월~현재: 충남대학교 정보통신공학과 석사과정

<관심분야> 차세대 이동통신, OFDM 이동통신, WLAN

윤 여 중(Yeojong Yoon)

준회원



2003년 2월: 배재대학교 전자공학과 졸업
2003년 3월~현재: 충남대학교 정보통신공학과 석사과정

<관심분야> 차세대 이동통신, OFDM 이동통신

진 영 환(Younghwan Jin)

정회원

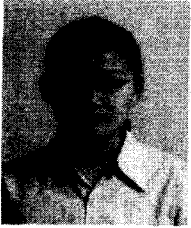


2002년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 졸업
2004년 8월: 충남대학교 정보통신공학과 석사
2004년 9월~현재: 충남대학교 정보통신공학과 박사과정

<관심분야> 차세대 이동통신, UWB 통신, WLAN

서 영 주(Youngju Seo)

정회원



2001년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 졸업
2003년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 석사
2003년 3월~현재: 충남대학교 정보통신공학과 박사과정

<관심분야> 차세대 이동통신, CDMA 이동통신

은 창 수(Chang-soo Eun)

정회원



1985년 2월: 서울대학교 전자공학과 졸업
1987년 2월: 서울대학교 전자공학과 석사
1995년 12월: 텍사스 오스틴 대학교 전기공학과 박사
1997년~현재: 충남대학교 전기정보통신공학부 부교수

<관심분야> 통신 신호 처리, RF 및 초고주파 회로 설계

임 선 민(Sunmin Lim)

정회원



2000년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 졸업
2002년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 석사
2002년 3월~현재: 충남대학교 정보통신공학과 박사과정

<관심분야> 통신 신호 처리, 이동 통신

장 원(Won Jang)

정회원



1984년 2월: 서울대학교 전자공학과 졸업
1986년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1991년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
1991년~현재: 국방과학연구소 책임 연구원

<관심분야> 전자기파 응용

안 재 민(Jaemin Ahn)

정회원



1987년: 서울대학교 전자공학과 졸업
1989년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1994년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
1994년~1999년: 삼성전자 선임연구원

구원

1999년~현재: 충남대학교 전기정보통신공학부 부교수

<관심분야> 차세대 이동통신 물리계층 및 Radio Resource management

나 선 필(Sunphil Nah)

정회원



1985년 2월: 충남대학교 계산통계학과 졸업
1987년 2월: 충남대학교 계산통계학과 석사
1991년~현재: 국방과학연구소 선임 연구원

<관심분야> 신호처리