

레터논문 (Letter Paper)

방송공학회논문지 제22권 제2호, 2017년 3월 (JBE Vol. 22, No. 2, March 2017)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2017.22.2.257>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

대역폭 추정을 적용한 효율적인 디지털 변조 신호 분류

최종원^{a)}, 안우현^{a)}, 서보석^{a)†}

An Efficient Classification of Digitally Modulated Signals Using Bandwidth Estimation

Jong-Won Choi^{a)}, Woo-Hyun Ahn^{a)}, and Bo-Seok Seo^{a)†}

요 약

이 논문에서는 대역폭 추정치를 이용하여 효율적으로 디지털 변조 신호를 자동으로 분류하는 변조인식 방법을 제안한다. 변조 신호를 분류하기 위해서 일반적으로 특징변수를 이용한 방법이 널리 사용되는데, 특징변수의 정확도는 특징변수 추정에 사용되는 디지털 변조 신호의 심볼수와 심볼당 표본수에 따라 크게 영향을 받는다. 이 논문에서는 높은 과표본화율로 표본화된 신호에 대해 먼저 대략적으로 대역폭을 추정하고 이로부터 심볼당 적절한 표본수를 취할 수 있도록 표본율을 감소시킨다. 따라서 처리하는 표본수가 동일한 경우 더 많은 심볼을 사용하게 되어 변조 인식을 높일 수 있다.

Abstract

In this letter, we propose an efficient automatic modulation recognition (AMR) method which classifies digitally modulated signals by estimating the bandwidth. In AMR, feature-based methods are widely used and the accuracy of the features is highly dependent on the number of symbols and the number of samples per symbol (NSPS). In this letter, at first, we coarsely estimate the bandwidth of the oversampled signals, and then decrease the sample rate to yield adequate NSPS. As a result, more symbols are used for AMR and the correct classification rate becomes high under the same number of samples.

Keyword : bandwidth estimation, digitally modulated signal classification, modulation recognition

a) 충북대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University)

† Corresponding Author : 서보석(Bo-Seok Seo)
E-mail: bouseok@cbnu.ac.kr
Tel: +82-43-261-3267

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1610-3667>

※ 이 논문은 2014년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

· Manuscript received February 16, 2017; Revised March 15, 2017; Accepted March 15, 2017.

1. 서 론

신호에 대한 사전 정보 없이 수신신호의 변조방식과 파라미터를 추정하는 자동 변조인식(automatic modulation recognition: AMR)은 군사적으로 적의 통신을 감청하는 COMINT(communication intelligence)나 SIGINT(signal intelligence) 분야에서 매우 필수적인 기술이다^[1]. AMR은

변조방식뿐만 아니라 중심주파수, 심볼율, 채널 부호화 방식 등의 파라미터를 추정하기 위한 모든 기술을 포함한다.

변조인식을 위해서는 특징변수 기반 방법을 주로 이용하는데^{[2][3]}, 특징변수 방법은 신호로부터 변조방식을 특징적으로 구별할 수 있는 변수를 추출하고 패턴인식 방법을 적용하여 변수를 분류하는 방법으로, 준최적의 성능을 나타내지만 구현하기가 비교적 간단한 장점이 있다.

한편 디지털 변조방식의 특징변수는 특징변수를 추정하기 위해 사용되는 신호의 심볼당 표본수와 심볼수에 따라 그 정확도가 달라진다. 이런 이유로 실제 시스템에서는 신호의 심볼율에 대한 사전 정보가 전혀 없기 때문에 인식 가능한 최대 심볼율을 기준으로 매우 높은 주파수로 과표본화(oversampling)를 하고, 충분한 심볼이 포함되도록 상당히 많은 표본을 이용하여 특징변수를 추출한다. 이 경우 신호의 심볼율에 비해 불필요하게 표본화율이 높을 수 있고, 또 많은 표본을 처리해야 하므로 처리속도가 늦어질 수 있다는 단점이 있다.

이 논문에서는 과표본화된 표본신호로부터 대략적으로 대역폭을 추정한 후 이에 따라 표본율(sample rate)을 감소시켜 처리하는 표본수가 고정된 경우 변조 인식률을 높일 수 있는 효율적인 방법을 제시하고자 한다.

제안 방법에서는 먼저 저자들이 [4]에서 제시한 히스토그램 방법을 적용하여 심볼율과 관련이 있는 신호의 대역폭을 추정한다. 이로부터 적절한 심볼당 표본수가 되도록 간축률(decimation ratio)을 정하고 표본율을 낮춘다. 이후 낮은 표본율의 표본 신호를 이용하여 변조 파라미터 추정, 특징변수 추출 및 변조신호 분류를 수행하게 된다.

II. 신호 모델

이 논문에서 분류하고자 하는 대상은 선형변조 방식의 ASK, M-PSK (M=2, 4, 8), 16-QAM과 비선형변조 방식의 M-FSK (M=2, 4, 8) 등 8개의 디지털 변조 신호이다. 신호 분류에 사용하는 신호는 심볼율에 비해 매우 높은 비율로 과표본화된 기저대역 신호로 n 번째 표본은 $x[n] = x(t)|_{t=nT_s}$ (T_s 는 표본화 간격)로 나타낼 수 있다. 심볼길이를 T_{sym} 라 할 때, 실제 변조인식 시스템에서는 신호에 대한

사전정보가 없으므로 과표본화율($N_{sps} = T_{sym}/T_s$ 로 정의하는 심볼당 표본수와 동일함)이 수 십 이상이 될 수도 있다^[3]. 표본신호 $x[n]$ 의 전력은 1로 정규화 한다.

III. 제안한 디지털 변조 신호 분류 알고리즘

이 논문에서는 대역폭을 추정하여 심볼당 표본수를 조절함으로써 변조신호 분류의 효율성을 보이하고자 하는 것으로, 대표적인 변조신호와 비교적 간단한 분류기를 사용하였다. 제시하는 디지털 변조 신호 분류기의 구조는 그림 1과 같으며, 크게 표본율 조절 단계, M-FSK 분류 단계, ASK 분류 단계, PSK 및 16-QAM 분류 단계 등 4개 단계로 구분할 수 있다.

1. 표본율 조절

이 단계에서는 높은 과표본화율로 표본화된 기저대역 신호를 이용하여 대역폭을 추정하고 그로부터 간축률을 구하여 간축(decimation)함으로써 표본율을 낮추게 된다.

먼저 대역폭을 추정하기 위해 [4]에서 제시한 진폭 스펙트럼의 히스토그램을 이용하는 방법을 적용한다. 추정한

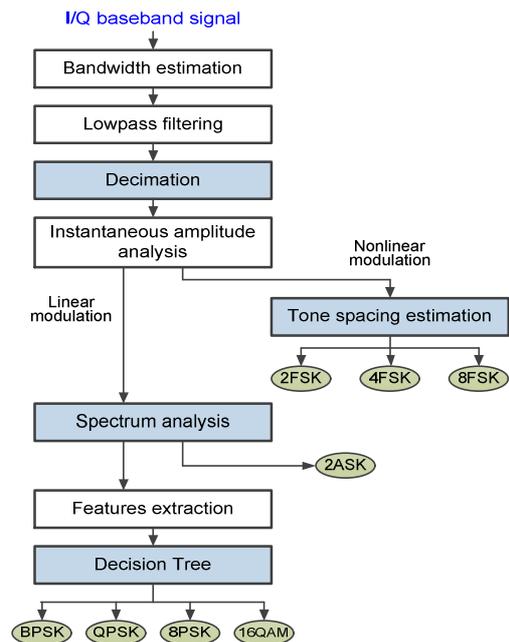


그림 1. 제안한 변조신호 분류 방법
Fig. 1. The proposed modulation classification scheme

대역폭을 \hat{B} 라 할 때, 간축률은 $D = \lfloor f_s / N_{sps} \hat{B} \rfloor$ 로 정의한다. 여기서 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 크지 않는 최대 정수를 의미하며, N_{sps} 는 근사적인 심볼당 표본수를 나타낸다.

표본율은 $1/D$ 로 낮추게 되는데, 간축하기 전에 스펙트럼 겹침 잡음(aliasing noise) 방지를 위해 저역필터를 먼저 통과시킨다. 간축 후의 표본율은 $f_{s2} = f_s / D \approx N_{sps} B$ 가 되는데, 이것은 표본율이 대역폭의 N_{sps} 배, 즉 심볼당 표본수가 근사적으로 N_{sps} 임을 나타낸다.

2. M-FSK 분류

주파수 변조한 FSK 신호는 다른 디지털 변조 신호와 다르게 진폭이 일정한 특성이 있다. 따라서 이 특성을 반영한 표본신호의 표준편차 $\hat{\sigma}_x$ 를 이용하여 선형 변조 신호와 비선형 변조 신호를 구분할 수 있다^[5].

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x[n] - \hat{m}_x)^2} \quad (1)$$

여기서 N 은 전체 표본신호의 수를 나타내고, $\hat{m}_x = (1/N) \sum_{n=1}^N x[n]$ 이다. 선형변조 신호와 비선형변조 신호는 표준편차에 의해 뚜렷하게 구분되며, 이 논문에서는 $\sigma_{th} = 0.24$ 를 기준으로 이보다 크면 선형변조, 작으면 비선형변조로 분류한다.

비선형 변조인 FSK 신호를 분류하고 난 다음에는 진폭 스펙트럼의 첨두를 검출하여 FSK 변조 차수를 추정한다. 한편 첨두 검출에서는 첨두 여부를 판정하는 임계치가 검출 성능에 크게 영향을 미치는데, 이 논문에서는 진폭 스펙트럼의 히스토그램을 이용하여 임계치를 자동적으로 간단하게 결정하는 [6] 방법을 적용하였다.

3. 2-ASK 분류

선형변조 신호의 경우 2-ASK 신호만이 DC 성분이 있으므로 0주파수에 선 스펙트럼이 존재한다. 따라서 진폭 스펙트럼의 히스토그램에서 다음과 같이 2-ASK와 다른 선형변조 신호를 구분한다.

$$\text{The modulation type is } \begin{cases} 2\text{-ASK} & \text{if } \Sigma_{C_2} < \Sigma_{C_{2,th}} \\ \text{PSK, QAM} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 Σ_{C_2} 는 히스토그램에서 C_2 보다 큰 구간(bin)에서 계수(count)의 합이고, C_2 는 히스토그램의 $\mu \pm 3\sigma_c$ (μ, σ_c^2 는 신호구간에서 계수의 평균과 분산) 구간에서 가장 큰 계수를 나타낸다. 문턱값은 $\Sigma_{C_{2,th}} = 30$ 으로 놓았다.

4. M-PSK 및 16-QAM 분류

최종적으로 남은 PSK 신호와 16-QAM 신호는 결정분류(decision tree) 알고리즘^[2]을 적용하여 분류한다. 특징변수로는 [7]에서 사용한 고차 순환 큐물런트(cyclic cumulant) C_{20}, C_{40} 의 절대값과 다음과 같이 정의되는 순시진폭 절대값의 표준편차 등 3개의 변수를 사용한다.

$$\hat{\sigma}_{|x|} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (|x[n]| - \hat{m}_{|x|})^2} \quad (3)$$

여기서 $\hat{m}_{|x|} = (1/N) \sum_{n=1}^N |x[n]|$ 이다.

결정분류기는 그림 2와 같은 구조를 가진다. 각 판단기에서의 문턱값은 기준심볼을 이용하여 실험적으로 구하였으며, $C_{20,th} = 0.5$, $\sigma_{|x|,th} = 0.37$, $C_{40,th} = 0.14$ 이다.

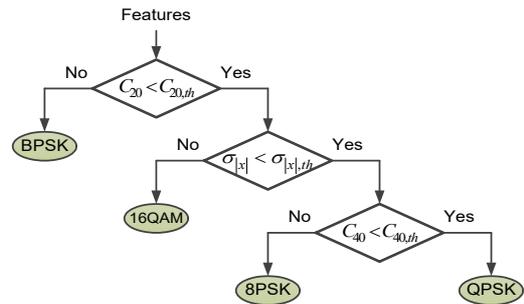


그림 2. 신호 분류를 위한 결정분류기 구조
 Fig. 2. The structure of the decision tree for classification

IV. 모의실험 결과

모의실험에서 분류하고자 하는 대상 신호는 2ASK,

2/4/8-PSK, 16-QAM 및 2/4/8-FSK 신호 등 모두 8개이다. PSK, QAM 신호의 펄스성형을 위한 롤오프율(roll-off factor)은 0.35이다. 성능을 확인하기 위해 각 변조신호에 대해 100번씩 모두 800번을 무작위로 발생시킨 후 변조인식을 수행하고 평균 분류확률을 구하였다.

그림 3은 8개 변조방식 중에서 상대적으로 분류확률이 높아 전체 분류확률을 결정짓는 QPSK, 8-PSK, 16-QAM 3개 변조신호에 대해 심볼당 표본수가 13일 때 사용한 심볼수에 따른 평균 분류확률을 나타낸 것이다. 세 방식 모두 심볼수가 약 700 이하에서는 분류확률이 심볼수에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

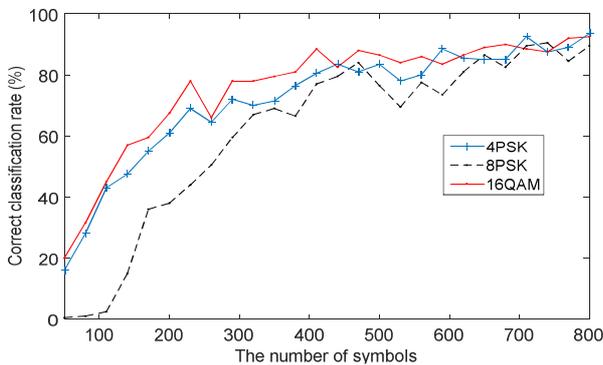


그림 3. 심볼수에 따른 평균 분류확률
Fig. 3. The average correct classification rate with the number of symbols

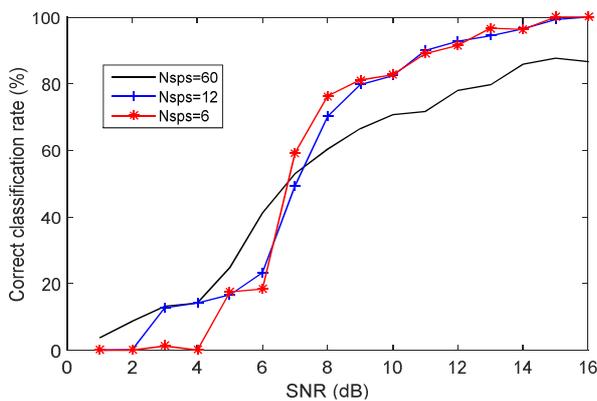


그림 4. 심볼당 표본수에 따른 평균 분류확률
Fig. 4. The average correct classification rate with the number of samples per symbol

그림 4는 8개 변조방식 각각에 대해 동일하게 18,000개의 표본신호를 사용하여 신호분류를 할 때 심볼당 표본수 (N_{sps})에 따른 평균 분류확률을 나타낸다. 의미를 가지는 50% 이상의 인식률을 나타내는 약 7dB 이상의 SNR(signal to noise power ratio)에서는 대역폭을 추정하고 이로부터 심볼당 표본수(N_{sps})를 6과 12로 조절한 제안 방법이 분류 확률이 더 높음을 알 수 있다. 이것은 표본신호의 수가 동일할 때 심볼당 표본수를 감소시킴으로써 더 많은 수의 심볼을 이용하여 특징변수를 추출하고 분류를 했기 때문이다.

V. 결론

이 논문에서는 수신신호의 대역폭을 추정하고 이로부터 심볼당 표본수를 조절하여 동일한 개수의 표본을 처리할 때 더 많은 심볼을 사용함으로써 분류확률을 높일 수 있는 효율적인 변조신호 분류 방법을 제시하였다. 제안 방법을 적용하면 동일한 성능을 얻기 위해 기존의 방법에 비해 필요한 표본의 수를 크게 감소시킬 수 있다.

참고 문헌 (References)

- [1] J.T. Richelson, *The U.S. Intelligence Community*, 6th ed., Boulder, Westview Press, pp. 203-229, 2011.
- [2] O. A. Dobre, A. Abdi, Y. Bar-Ness, and W. Su, "A survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends", *IET Commun.*, Vol.1, pp. 137-156, 2007.
- [3] A. Hazza, M. Shoaib, S.A. Alshebeili, A. FAHAD, "An overview of feature-based methods for digital modulation classification", *International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications*, pp. 1-6, 2013.
- [4] W.H. Ahn, et al., "Bandwidth Estimation Algorithm of Digitally Modulated Signals Based on Histogram of Spectrum", *Proceeding of International Instrumentation And Measurement Technology Conference*, pp. 390-395, 2016.
- [5] Z. Zhu and A.K. Nandi, *Automatic Modulation Classification: Principles, Algorithms and Applications*, Wiley, 2014.
- [6] W.H. Ahn, B.S. Seo, "An Efficient Peak Detection Algorithm in Magnitude Spectrum for M-FSK Signal Classification", *Journal of Broadcast Engineering*, Vol. 19, No. 6, pp. 967-970, 2014.
- [7] W.H. Ahn, et al., "Digitally Modulated Signal Classification Based On Higher Order Statistics of Cyclostationary Process", *Journal of Broadcast Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 195-204, 2014.