

주파수 도약 M-FSK 신호의 블라인드 복조정확도 개선 연구

박 영 일*

The Study of Demodulation Accuracy Improvement for Frequency Hopping M-FSK Signals in Blind Environment

Young-il Park*

요 약

제3자가 통신 채널 주파수를 예측할 수 없도록 송수신기의 채널 주파수가 의사잡음 코드발생기에 의해 불규칙하고 아주 빠른 속도로 변경되면서 송신기와 수신기가 서로 약속된 도약 주파수(Hopping Frequency)로 통신하는 주파수 도약방식의 통신장비가 통신용으로 널리 이용되고 있다. 이러한 시스템의 불법적 사용 및 주파수 도용 방지를 위해서는 지속적으로 스펙트럼을 모니터링하여야 할 필요가 있는데 스펙트럼 모니터링 장비에서는 수신된 도약 주파수만으로 제원을 확보할 수밖에 없다. 이러한 블라인드 환경에서 도약 주파수를 수신하여 그 제원을 추출하기 위해서는 변조방식 추정 과정을 거쳐야 하는데, 다양한 이날로그 및 디지털 변조방식 중에서 FSK라고 추정된 신호에 대하여 2/4/8FSK과 같은 를 각각 분리할 필요가 있다. 본 연구에서는 투영중첩법을 이용하여 미상의 M-FSK 신호에 대해 4/8FSK의 신호를 분리하는 기법을 제안하였고, 궁극적으로 복조정확도를 개선하였다.

키워드 : 자동변조인식, 도약 주파수, 투영 중첩

Key Words : AMR, Hopping Frequency, Pile up Projection

ABSTRACT

Recently, it is used the radio system with frequency hopping what the channel frequency is changed quickly and aperiodically by the pseudo noise sequence generator system on the transmitter-receiver for precluding a third party predict communications channel frequency. We needed to monitor illegal or unlicensed spectrum use by 3rd party. AMR(Automatic Modulation Recognition) is one method for obtaining modulation type information of blindly intercepted signals.

This paper suggests a method of the separation 4 FSK one of the obtained information through AMR. We suggested the method of pile up projection as method of separation 4FSK and verified the usefulness of pile up projection method through the experimental simulation.

I. 서 론

사전 정보 없이 입사되는 통신용 고정 신호에 대한 변조 인식기에 관한 연구가 각 분야에서 진행이 되고

있다. 이러한 연구는 Machine Learning이나 통계적 분석법에 의한 방법을 통해 간섭 식별, 스펙트럼 감시, 신호 탐색, 전자전, 민수 및 군 통신 응용분야에 적용되어지고 있다^{1,2)}.

* First Author : Agency for Defense Development, gyroheat@naver.com, 정회원
논문번호 : 201912-330-0-SE, Received November 29, 2019; Revised December 20, 2019; Accepted December 20, 2019

한편, 제 3자가 통신 채널 주파수를 예측할 수 없도록 송수신기의 채널 주파수가 의사잡음 코드발생기에 의해 불규칙하고 아주 빠른 속도로 변경되면서 송신기와 수신기가 서로 약속된 도약 주파수로 통신하는 주파수 도약 통신장비가 통신용으로 널리 이용되고 있으나, 도약 주파수를 사용하는 통신에 대한 변조 인식기에 관한 연구는 그 수를 찾아보기가 어렵다. 도약 주파수를 사용하는 통신 시스템의 불법적 사용 및 주파수 도용 방지를 위해서는 도약 주파수 신호를 감지하여야 할 필요가 있지만, 감시단에서는 수신된 일부 도약 주파수만으로 분석에 필요한 제원을 확보할 수 밖에 없으므로 도약 주파수에 대한 변조방식인식에 대한 연구가 미진한 상황이다.

이러한 블라인드 환경에서 사전 정보 없이 입사하는 도약 주파수를 감지하기 위해서는 도약 주파수를 수신하여 그 제원을 추출하여야 하는데, 제원 추출과정을 살펴보면 수신된 도약 주파수에 대한 주파수 도약 대역폭, 주파수 도약률, Duration, Mute Time 등의 도약 정보를 추출한 후 각각의 Hop마다 Mute Time을 제거하고 시간 순으로 Hop을 모아 역도약을 수행하게 된다. 이후 도약 주파수에 대한 변조방식인식의 과정을 거쳐야 하는데, 각 종의 변조방식 중에서 FSK라고 판단된 신호에 대하여서는 2, 4, 8, 16, 32등 캐리어 주파수의 개수(M) 별로 분리를 할 필요가 있다³⁾.

본 연구에서는 도약 주파수에서 가장 많이 쓰이는 M-FSK 중 4FSK 및 8FSK의 신호를 분리하는데 있어, 투영중첩법을 이용하여 각각의 4/8FSK 신호를 분리하는 기법을 제안하고, 제안된 기법을 적용하여 4FSK, 8FSK의 변조방식 분류를 개선할 시뮬레이션하고 그 결과를 각각의 SNR별로 확인하였다.

II. 투영중첩법

2.1 도약 주파수에서의 FSK 분류 문제점

앞 절에서 소개한 바와 같이 도약주파수의 제원을 추출하기 위해서는 먼저 역도약을 수행하게 되는데 역도약을 수행하게 되면 Hop by Hop의 주파수 I/Q 데이터를 얻게 된다. 이 하나의 Hop에 대한 I/Q 데이터를 대상으로 1차 Cyclic Moment로 FFT를 수행하면, 그림 1과 같은 Carrier Frequency를 가지는 주파수 스펙트럼을 얻을 수 있다⁴⁾. 이때 주파수 스펙트럼 상의 Peak의 개수로 M-FSK를 구분하게 된다.

기존의 방식에서는 이 하나의 홉에서 얻어지는 주파수 스펙트럼으로 FSK의 분류를 수행하였는데 하나의 Hop이 가지는 주파수 스펙트럼의 수가 많지 않음

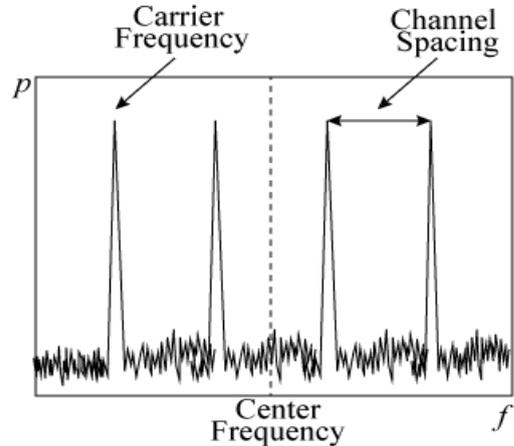


그림 1. 주파수 스펙트럼
Fig. 1. Frequency Spectrum

므로 고정주파수를 대상으로 하는 FSK 분류 개선 알고리즘을 적용하여도 인식률이 좋지 않은 결과를 초래하였다⁵⁾. 2FSK를 예로 들어 설명하면 그림 2와 같이 2FSK가 표현할 수 있는 bit의 조합 수는 00, 01, 10, 11의 4가지로 구분할 수 있다. 이 중 2FSK의 peak를 모두 가지는 경우는 BIT 조합이 11일 경우인데, 이는 1/2의 확률을 가지고 나타날 수 있다. 이와 같은 방법을 4/8FSK에 적용하면 4FSK는 1/16, 8FSK는 1/64의 확률로 계수에 해당하는 peak 개수가 나타나게 된다. 가령, 4FSK, Data rate 10Kbps, 500Hop의 신호가 있다고 가정해 보면, 하나의 Hop에 20개의 데이터가 존재하게 되고(Mute time에도 데이터가 존재한다고 가정) 4FSK이므로 얻을 수 있는 주파수 스펙트럼의 개수는 5개가 되며 5개의 주파수 스펙트럼으로 FSK의 계수를 판단하게 된다. 따라서 1/16의 확률로 발견 할 수 있는 peak를 모두 가지는 경우를 5개의 주파수 스펙트럼으로 분류하기에는 확률적인 면에서

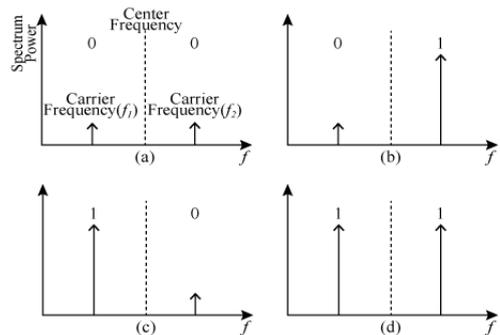


그림 2. 2FSK의 BIT 표현
Fig. 2. Bit Expression by 2FSK

유용성이 많이 떨어지는 결과를 얻을 수밖에 없었다. 또한, SNR이 나쁜 경우에는 peak가 모두 나타나더라도 8FSK나 다른 계수의 FSK로 분류하는 경우도 발생할 수 있다.

2.2 전처리 과정

본 연구에서 제안하는 투영중첩법은 여러 개의 Hop에서 얻어지는 변조신호에 대한 주파수 스펙트럼을 투영하여 중첩시키고 중첩된 이미지의 Max Hold 값으로 Peak 계수를 산출하여 FSK를 분류하는 기법이다.

투영중첩법을 적용하는 방법은 다음과 같다. 하나의 Hop에 대하여 역도약을 수행한 I/Q데이터를 1차 Cyclic Momnet로 FFT하여 추출해낸 주파수 스펙트럼(g)을 가정하면, g 는 주파수(f_i)에 따른 Spectrum Power(p)로 표현할 수 있기 때문에 다음과 같은 식이 성립된다.

$$g = p(f_i) \tag{1}$$

이때, f_i 는 주파수 스펙트럼 상에서 샘플링된 주파수 중 i 번째의 주파수를 의미하는 것으로 다음과 같은 식으로 정의 할 수 있다.

$$f_i = \Delta f(i-1) \tag{2}$$

각각의 주파수 스펙트럼(g)의 중첩을 위해서는 일정한 크기의 Carrier Frequency로 일치시켜주어야 할 필요가 있으므로 식(3)에 표현한 것과 같이 g 를 Normalization하였고, Noise와 차이가 명확한 Carrier 신호 확보를 위해 제곱처리를 하였다. 그렇게 해서 얻어지는 중첩가능한 주파수 스펙트럼(G)를 구하였다.

$$G = \left(\frac{p(f)}{MAX(p(f))} \right)^2 \tag{3}$$

2.3 투영중첩법 적용

본 연구에서 정의 하는 투영중첩법은 그림 3에서 보는 바와 같이 n 개의 G 를 중첩할 때 각각의 G 의 요소 $p(f_i)$ 를 서로 비교하여 그 중에서 가장 큰 값을 취하는 Max Hold 방식을 취하였다. 이를 수식으로 표현하면,

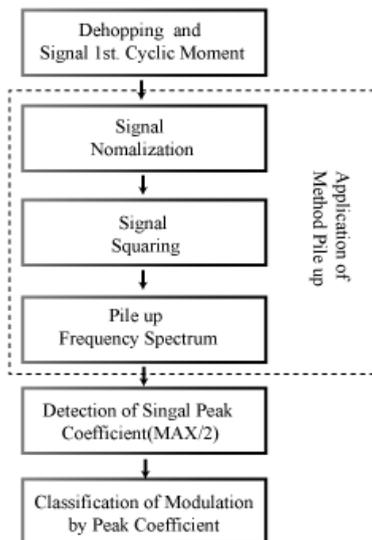


그림 3. 투영중첩법의 적용
Fig. 3. Applications of Method Pile up

$$G^p = MAX(G_n(f_i)) \tag{3}$$

으로 표현 할 수 있다. 여기서, n 은 중첩수로 $2 \leq n \leq$ 최대 중첩수의 값을 가지게 되나, 중첩수가 늘어날수록 상대적으로 Buffer 용량을 늘려야 하므로

최대의 분류율을 낼 수 있는 적절한 Buffer 용량을 설계할 필요가 있다.

그림 3에서는 투영중첩법을 적용하는 과정을 그림으로 표현하였다. 그림 3에서 점선으로 표시한 부분이 본 연구에서 제안하는 투영중첩법을 적용하는 과정을 나타낸다. 또한, 투영중첩법의 이해를 돕기 위하여 그림 4에서는 투영중첩법의 원리에 대해서 표현하였다.

본 연구에서는 투영중첩법의 유용성을 확인하고 적

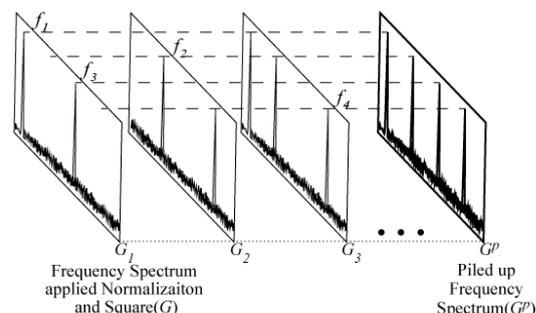


그림 4. 투영중첩법의 원리
Fig. 4. principle of Method Pile up

절한 중첩 수를 평가하기 위하여, 도약주파수에서 대표적으로 사용되어지는 4/8FSK의 신호에 대하여 각각의 SNR별로 중첩을 하지 않았을 경우와 중첩을 했을 경우의 결과를 비교하는 Simulation을 수행하였고 그 결과는 다음과 같다.

III. 시뮬레이션 결과

3.1 4FSK의 분류

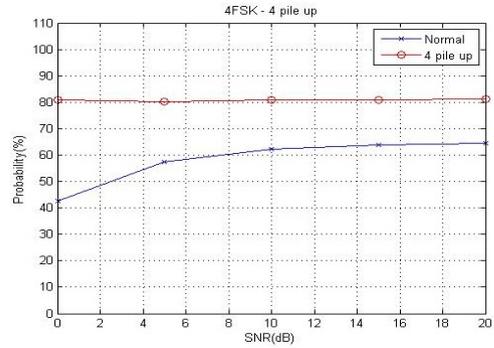
이 장에서는 4FSK 분류 Simulation 결과에 대하여 설명하고자 한다. 표 1은 4FSK 분류 Simulation에 사용된 신호 제원을 나타내고 있다. 그림 5는 4FSK 분류 결과를 나타내는데 결과그래프는 각각의 SNR 0, 5, 10, 15, 20dB에 따른 4FSK의 분류율을 나타내고 있다. 또한, 분류율은 2FSK, 8FSK, 혹은 미상으로 판단한 경우에는 분류성공, 4FSK로 판단한 경우에는 분류실패로 구분하여 분류율을 계산하였다.

결과로는 그림 5에서 확인할 수 있듯이, 기존의 분류방법에 비해 4중첩일 때 80%, 6중첩일 때 95%, 8중첩일 때는 거의 100% 가량의 분류율로 제안하는 투영중첩법을 적용하였을 때 높은 성능향상의 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

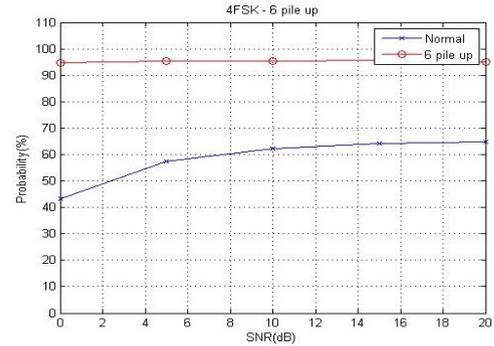
또한, 모든 중첩에서 공통적으로 확인할 수 있었던 것은 SNR비의 변화와 상관없이 전체적으로 평균적인 분류율 결과를 보이는 것으로 미루어보아 SNR비가 낮아도 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 중첩 수에서는 4중첩과 6중첩의 분류율 성능차이에 비해 6중첩과 8중첩의 분류율 성능차이가 미비한 것이 확인되었다. 이는 중첩 수가 많아질수록 Buffer의 용량을 크게 가져가야하기 때문에 연산량과 연산시간이 늘어날 수밖에 없는 점을 고려한다면, 8중첩 이상의 중첩보다 6중첩일 때 가장 효율적인 중첩결과를 얻었다고 평가할 수 있다.

표 1. 4FSK 분류 Simulation 제원
Table 1. Parameter of 4FSK Simulation

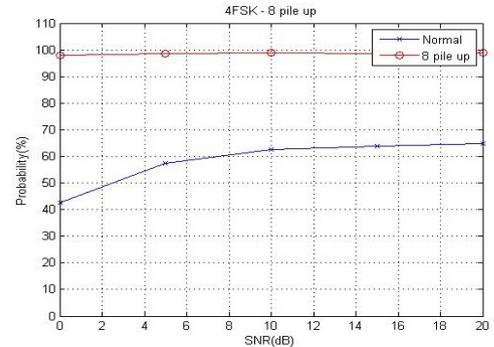
| Item | Value |
|---------------------|-----------|
| Hop rate | 500 hop/s |
| Dwell : Mute (Time) | 9 : 1 |
| Symbol rate | 20kbps |
| Number of Hops | 80,000 |



(a) 4FSK의 4중첩 결과



(b) 4FSK의 6중첩 결과



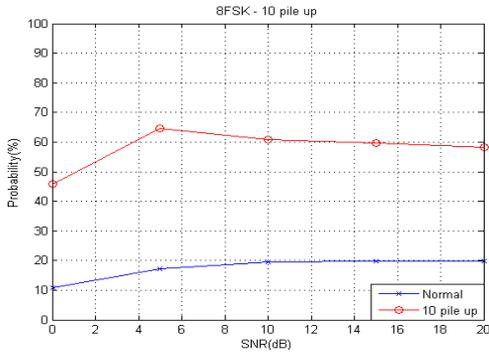
(c) 4FSK의 8중첩 결과

그림 5. 4FSK 중첩수 별 Simulation 결과
Fig. 5. The Result of Numbers 4FSK Pile up

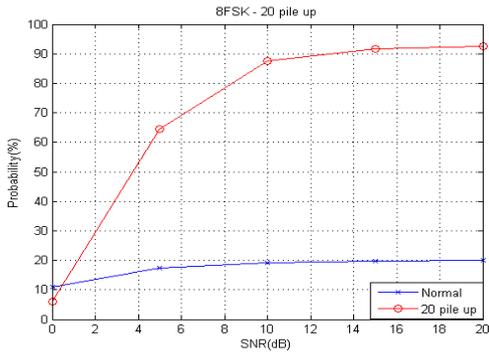
3.2 8FSK의 분류

이 장에서는 8FSK 분류 Simulation 결과에 대하여 설명한다. 표 2는 8FSK 분류 Simulation에 사용된 신호 제원을 나타내고 있다. 8FSK의 분류에서는 동일한 Symbol rate를 8FSK로 표현하는 점과 중첩 수를 많이 가져가야 하는 점을 이유로 Hop수를 40만개로 늘려서 Simulation을 수행하였다.

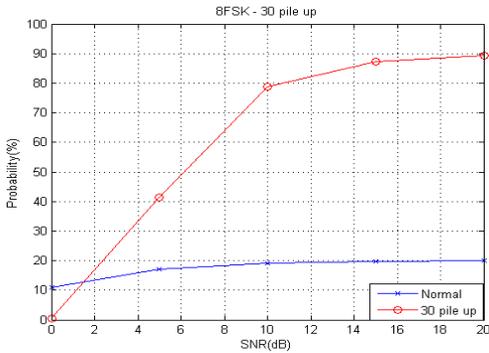
결과를 보면, 중첩수를 10, 20, 30중첩 등 중첩수를



(a) 8FSK의 10중첩 결과



(b) 8FSK의 20중첩 결과



(c) 8FSK의 30중첩 결과

그림 6. 4FSK 중첩수 별 Simulation 결과
Fig. 6. The Result of Numbers 4FSK Pile up

많이 해야 4FSK 분류 결과와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다는 점이 가장 눈에 띄었다. 또한, 4FSK 분류 결과와 비교하여 SNR이 0일 때는 기존의 분류방법과 비교하여 오히려 성능이 더 떨어지는 결과를 보였으며 30중첩일 때의 분류율이 20중첩일 때의 분류율 보다 성능이 약간 떨어지는 결과를 보였다. 하지만, 전체적인 결과로서는 거의 4배의 성능 향상을 보여주는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 4FSK의 분류 결과보다

표 2. 8FSK 분류 Simulation 제원
Table 2. Parameter of 8FSK Simulation

| Item | Value |
|---------------------|-----------|
| Hop rate | 500 hop/s |
| Dwell : Mute (Time) | 9 : 1 |
| Symbol rate | 20kbps |
| Number of hops | 400,000 |

뛰어난 성능향상을 보여 준다고 평가 할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Hopping 주파수에 대한 M-FSK 변조 분류 기법의 개선을 위하여 투영중첩법이라는 기법을 제안하고 simulation을 통해 그 성능을 확인하였다. 그 결과 투영중첩법이 4FSK, 8FSK 동이 FSK 변조 분류 성능에서 우수한 성능을 보였다. 또한, 4FSK 변조 분류에서는 6번을 중첩하였을 때, 8FSK 변조 분류에서는 20번을 중첩하였을 때 분류율이 가장 우수함을 실험적으로 입증하였다.

한편, 이번 실험에서는 각각의 주파수 스펙트럼을 중첩할 때 중심주파수가 모두 같다는 전제를 가지고 Simulation을 수행하였다. 하지만, Hop마다 서로 다른 주파수대역을 가지는 호핑 주파수를 정밀하게 역도약을 수행하더라도 Noise 환경에 따라 주파수 스펙트럼의 크기도 달라질 수밖에 없으므로 중심주파수를 일치시켜 중첩을 수행하는 과정이 필요하다. 이후 연구에서는 역도약 과정 후 중심주파수가 일치하지 않는 상황, 즉 주파수 Offset을 고려한 FSK 분류 기법에 관하여 연구할 필요성이 있다고 판단된다.

References

- [1] C. S. Park, W. Jang, and D. Kim, "Fast modulation classifier for software radio," *J. KICS*, vol. 32, no. 4, pp. 425-432, Apr. 2007.
- [2] C. S. Park, S. Nah, J. Yang, and J. Choi, "Automatic recognition of digital modulation types using wavelet transformation," *J. IEIE TC*, vol. 45, no. 4, pp. 22-30, Apr. 2008.
- [3] W. Ahn and B. Seo, "An efficient peak detection algorithm in magnitude spectrum for M-FSK signal classification," *J. KIBME*, vol.

19, no. 6, pp. 967-970, Nov. 2014.

- [4] D. Kim, J. Kim, K. Shim, and J. Ahn, "Automatic modulation recognition algorithm based on cyclic moment and new modified cumulant for analog and digital modulated signals," *J. KIICE*, vol. 17, no. 9, pp. 2009-2019, Sep. 2013.
- [5] Z. Yu, "Automatic modulation classification of communication signals," A Dissertation Submitted to the Faculty of New Jersey Institute of Technology in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, 2006.
- [6] C. S. Park, "Digital modulation types recognition using HOS and WT in multipath fading environments," *J. IEIE*, vol. 45, no. 5, pp. 102-109, Apr. 2008.

박 영 일 (Young-il Park)



2002년 2월 : 조선대학교 전기
공학과 졸업

2006년 9월 : The University
of Electro-Communications
전자 공학과 석사

<관심분야> 생체전자, 통신전
자전

[ORCID:0000-0002-6555-4886]