

# 단기 푸리에 변환을 이용한 주파수 도약 신호의 암맹 탐지 및 추정 성능 향상

김 남 경\*, 오 성 준<sup>o</sup>

## Performance Improvement of Blind Detection and Estimation for Frequency Hopping Signals Using Short-Time Fourier Transform

Nam-kyoung Kim\*, Seong-jun Oh<sup>o</sup>

### 요 약

주파수 도약 신호는 저피탐 특성 때문에 탐지 및 추정이 어려운 신호이다. 본 논문에서는 시간-주파수 분석 방법 중 하나인 STFT를 이용하여 탐지 및 추정을 할 때 기존과 다른 방법을 제안하여 추정하고자 하는 파라미터 값에 따라 다른 윈도우 길이를 적용하여 오류율이 낮은 탐지 및 추정을 얻을 수 있었다.

**Key Words** : Frequency Hopping, Time-Frequency analysis, STFT, Window, Blind Detection

### ABSTRACT

The frequency hopping signal is a signal that is difficult to detect and estimate because of its LPI characteristics. In this paper, a novel algorithms for detection and estimation using STFT is proposed which is one of time-frequency analysis methods, and can obtain detection and estimation with low error rate by applying different window lengths according to parameter values to be estimated there was.

## I. 서 론

주파수 도약 기술(Frequency Hopping)은 대역확산 기술(Spread Spectrum)의 종류 중 하나로써 주파수 도약의 항 재밍(Anti-Jamming)과 저피탐 능력(Low Probability of Intercept, LPI)으로 인해 보안이 요구 되는 통신 분야에서 많이 이용된다. 주파수 도약 신호의 반송파 주파수는 의사랜덤(Pseudo-Random)한 코드에 의해 랜덤한 주파수로 도약하며 통신을 하는 방식이다<sup>1)</sup>. 대역확산 기술에 대한 연구 초기에는 항 재밍 능력에 대한 연구가 많이 이루어졌다면 최근에는 저피탐 신호의 송신자에 대한 정보를 모르는 블라인드 상황에서 송신신호를 탐지하고 추정하는 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구는 시간-주파수 분석(Time-Frequency analysis) 기술을 이용하여 이루어진다. 주파수 도약 신호의 반송파가 특정 주파수 대역에 머무르는 시간이 짧아 탐지가 어렵기 때문에 신호의 시간에 따른 주파수 스펙트럼을 탐지하고 신호의 파라미터를 추정하는 방식이다.

본 논문에서는 연구[6]에서의 윈도우 길이를 최적화 하는 방법을 적용하여 시간-주파수 분석의 한 종류인 STFT(Short Time Fourier Transform)을 이용할 때 윈도우 길이에 따라 주파수 도약 신호의 파라미터 값을 정확하게 탐지 및 추정하는 방법을 소개한다.

본 논문의 구성은 II장에서 주파수 도약 신호와 STFT를 이용한 시간-주파수 분석에 대한 시스템 모델을 소개하고, III장에서 탐지 및 추정하려고 하는 주파수 도약 신호의 파라미터 값에 대한 탐지 및 추정을 향상시키는 알고리즘 기법을 제안하고 IV장에서 시뮬레이션 결과에 대한 성능을 분석하며 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

### 2.1 주파수 도약 신호

일반적인 주파수 도약 신호에 대한 수식은 다음과 같다.

$$y(k) = A_k e^{j2\pi f_k T_s} + n_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

식 (1)에서  $y(k)$ 는 채널을 통과한 수신측 주파수

\* 이 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음.

• First Author : Korea University Department of Information Security, knk107@korea.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Korea University Department of Information Security, seongjun@korea.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2017-10-320, Received October 23, 2017; Revised November 13, 2017; Accepted November 13, 2017

도약 신호이다.  $A_k$ 는  $k$ 번째 신호의 크기를 나타내고  $f_j$ 는 반송파를 도약시키는 도약 주파수이다.  $N$ 개의 도약 주파수 set인  $\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ 에서 의사랜덤 코드에 의해 정해진 주파수로 도약하게 된다.  $T_s$ 는 샘플링 주기이고  $n_k$ 는 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널이다. 본 논문에서는 하나의 도약에 하나의 심볼이 존재한다고 가정하였다.

본 논문에서 탐지 및 추정하고자 하는 주파수 도약 신호의 파라미터 값은 도약 시간(Hop Timing)과 도약 주파수(Hopping Frequency)이다. 심볼이 도약 주파수 당 머무르는 시간인 dwell time은 모두 같다고 가정하였다. 주파수 도약 신호처럼 시간에 따라 주파수가 달라지는 non-stationary signal을 탐지하기 위해 시간-주파수 분석 방법을 이용하고자 한다.

### 2.2 STFT를 이용한 시간-주파수 분석 방법

시간-주파수 분석 방법은 크게 두가지로 나뉜다<sup>2)</sup>. 하나는 Wigner-Ville distribution(WVD)를 이용하는 것이고 다른 하나는 시간-주파수 영역에서의 변환을 이용하는 것이다. 각각의 방법은 장단점이 존재하는데 WVD는 좋은 해상도를 나타낼 수 있지만 cross-term 이 문제가 되고 시간-주파수 변환의 한 종류인 STFT 은 WVD보다는 해상도가 떨어지지만 cross-term 문제가 없고 복잡도가 낮으며 구현에서의 편리함이 있다. 따라서 본 논문에서는 시간-주파수 분석 방법 중 STFT에 의한 블라인드 탐지 및 추정을 연구하였다. STFT의 수식 표현은 다음과 같다.

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau)e^{-j2\pi f\tau} dt \quad (2)$$

위 식(2)에서  $x(t)$ 는 수신된 신호이고  $w(t)$ 는 윈도우 함수이다. STFT 과정을 거쳐 시간-주파수 영역에서의 스펙트럼을 얻게 되는데 이때 정확한 탐지와 추정을 위해서 시간영역의 해상도와 주파수 영역의 해상도가 중요하다. 해상도가 좋을수록 오차율이 적은 정확한 탐지와 파라미터 값 추정을 할 수 있기 때문이다. 그러나 하이젠베르크의 불확정성의 원리 때문에 시간영역의 해상도와 주파수영역의 해상도를 동시에 향상시키는 것은 불가능하다. 따라서 기존 논문들에서는 변환에 대한 알고리즘을 변경하여 탐지 및 추정을 향상시키는 연구가 이루어져왔다<sup>3-5)</sup>. 본 논문에서는 기존 논문들과 달리 추정하고자 하는 파라미터 값에 따라서 윈도우의 길이를 다르게 하여 개별적으로 최

적화하는 알고리즘을 제안한다.

## III. 제안하는 알고리즘

### 3.1 윈도우 함수의 설정

본 논문에서 STFT를 적용함에 있어서 윈도우 함수는 Hamming Window를 적용하였다. STFT에 적용하는 Window 종류로는 Hamming, Hanning, Blackman, Bartlett, Rectangular 등이 있는데 시간-주파수 영역의 해상도 측면에서 가장 좋은 해상도를 제공하는 최적의 윈도우는 Hamming Window이다. 다음은 Hamming Window의 수식 표현이다.

$$w(n) = 0.54 - 0.46\cos\left(2\pi\frac{n}{N}\right), \quad 0 \leq n \leq N \quad (3)$$

$$L = N + 1 \quad (4)$$

위의 식(3)은 Hamming Window의 수식이고 식(4)의  $L$ 은 윈도우의 길이를 나타낸다.

### 3.2 윈도우 길이에 따른 탐지 및 추정 방법

본 논문에서는 추정하고자 하는 파라미터 값에 따라 다른 윈도우 길이를 적용하는 접근을 새롭게 제안한다. 도약 시간을 추정하고자 할 때에는 상대적으로 시간 영역의 해상도가 좋은 짧은 길이의 윈도우를 사용하고 도약 주파수를 추정하고자 할 때에는 상대적으로 긴 길이의 윈도우를 사용한다. 적용 가능한 윈도우 길이 집합  $N_w = \{32, 64, 128, 256, 300, 324, 350, 512, 1024, 2048\}$  이라고 했을 때 시간 영역에서 최적의 윈도우 길이에 대한 수학적 증명은 연구[6]에서 다음과 같이 연구가 이루어졌다<sup>6)</sup>.

$$L_{opt} = 4.999/\omega_m \sqrt{m} \quad (5)$$

위 식(5)에서  $m$ 은 변조 진폭이고,  $\omega_m$ 은 신호의 각 속도이다. 따라서 본 논문에서는 시간 영역에서의 최적 해상도 윈도우 길이는 32로 얻을 수 있었다. 주파수 영역에서의 최적의 해상도를 얻을 수 있는 윈도우 길이는 512로 얻을 수 있었다.

## IV. 시뮬레이션 결과

제안하는 알고리즘을 MATLAB 시뮬레이션을 통해 실험한 결과이다. 본 논문에서 도약 주기(Hop

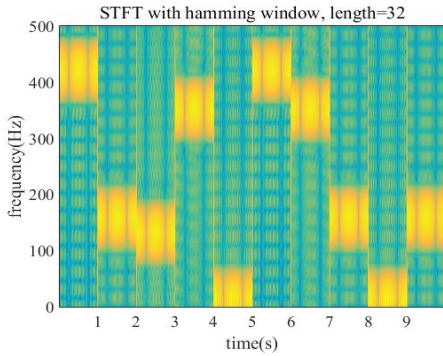


그림 1. 해밍 윈도우 길이 32에서의 STFT  
Fig. 1. STFT with hamming window length 32

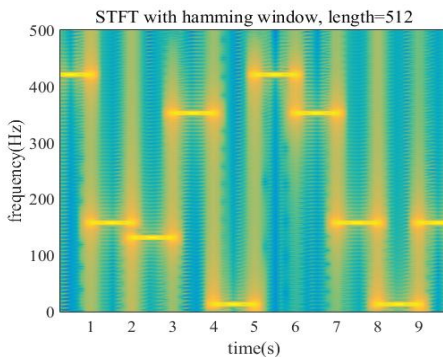


그림 2. 해밍 윈도우 길이 512에서의 STFT  
Fig. 2. STFT with hamming window length 512

duration)는 모두 같다고 가정하였고 모두 1s의 길이로 가정하였다.

위 그림 1과 그림 2는 각각 다른 윈도우 길이에 따른 주파수 도약 신호를 STFT한 결과이다. 윈도우 길이 32에서는 시간 영역의 해상도가 좋아 도약 시간을 추정하기에 적합하고 윈도우 길이 512에서는 주파수 영역의 해상도가 좋아 도약 주파수를 추정하기에 적합하다. 다음은 단일 윈도우 길이를 사용하였을 때와 본 논문에서 제안하는 방법을 썼을 때의 오류율에 대한 비교표이다.

표 1. relative error 비교 표  
Table 1. relative error comparison table

	Hop Timing relative error	Hopping Frequency relative error
Single Window(32)	0.016(s)	109.4(Hz)
Single Window(512)	0.28(s)	9.3(Hz)
Proposed Algorithm	0.016(s)	9.3(Hz)

위의 표 1을 보면 제안하는 방법은 추정하는 파라미터 값에 따라 윈도우의 길이를 다르게 최적화함으로써 단일 윈도우를 사용하는 기존의 방법보다 더 낮은 오류율을 얻을 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 STFT를 사용하여 블라인드 상황에서 주파수 도약 신호를 탐지 및 추정하는 연구를 하였다. 정확한 탐지 및 추정을 위해서는 STFT에 사용되는 윈도우 함수 종류와 윈도우 길이의 결정이 중요한데 본 논문에서는 이를 최적화 하는 방법에 대하여 연구를 하였다. 블라인드 상황에서 우리가 추정해야 하는 파라미터 값은 주파수 도약 신호의 도약 시간과 도약 주파수이다. 본 논문에서는 도약 시간 추정과 도약 주파수 추정에 각각 다른 윈도우 길이를 최적화하여 사용하였고 기존 하나의 윈도우 길이를 사용하는 STFT 보다 낮은 오류율로 파라미터 값을 추정하는 것을 확인하였다.

### References

- [1] D. Torrieri, *Principles of Spread Spectrum Communication Systems* 2nd, Springer, 2004.
- [2] L. Chen, *Research on FH signal detection technology*, National University of Defense Technology, 2009.
- [3] D. L. Stevens and S. A. Schuckers, "Low probability of intercept frequency hopping signal characterization comparison using the spectrogram and the scalogram," *Global J. Res. in Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 13-24, 2016.
- [4] W. Yang, et al., "Parameter estimation of frequency hopping signals based on time frequency analysis." in *Proc. 26<sup>th</sup> Conf. Spacecraft TT&C Technol. in China*, pp. 131-140, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [5] S. M. Kim, W.-R. Oh, and W.-W. Kim, "Blind hopping pattern period estimation algorithm in BFSK/FHSS system," in *Proc. IEIE Summer Conf.*, vol. 33, no. 1, pp. 1037-1039, Jun. 2010.
- [6] H. Si-san, et al., "The optimal window length of STFT for sine modulated signal," *2009 IET Int. Radar Conf.*, pp. 1-3, 2009.