

주파수 도약 신호 탐지에 최적화된 탐지 확률 향상 기법

Detection Probability Improvement Scheme Optimized for Frequency-Hopping Signal Detection

이 인 석 · 오 성 준*

In-Seok Lee · Seong-Jun Oh*

요 약

주파수 도약(frequency hopping) 기법은 대역확산(spread spectrum) 방법 중 하나로, 광대역 상에서 반송파의 주파수가 고정되어 있지 않고, 다양한 주파수 채널로 도약하는 통신방식이다. 이러한 특성으로 인해 뛰어난 항재밍 성능, 낮은 탐지율 등의 장점을 가지고 있어, 군 통신에 자주 사용되고 있으며, 상용 통신에도 종종 사용되고 있다. 바꿔 말하면, 이런 주파수 도약 신호를 잘 탐지해내는 것은 매우 어려우며 중요한 연구분야 중 하나이다. 본 논문에서는 FFT를 이용한 신호 탐지를 할 때, 주파수 도약 신호의 탐지율을 증가시킬 수 있는 기법을 제안한다. 수신한 신호를 FFT를 이용하여 주파수 성분으로 변환시킬 경우, 스펙트럼 누설(spectral leakage)이 발생하여 탐지율이 낮아진다. 이때, 해밍 윈도우(hamming window)를 이용하여 문제를 해결하고 탐지율을 증가시킬 수 있는데, 주파수가 도약하는 환경에서는 윈도우가 오히려 성능 저하를 가져오기도 한다. 제안하는 기법은 주파수 변화에 대응하여 이러한 약점을 해결하였으며, 기존에 비해 최대 13 % 정도의 탐지율 향상을 얻을 수 있다.

Abstract

The frequency-hopping technique is one of the spread-spectrum techniques. Frequency hopping is a communication system in which the carrier frequency channel is hopped within the wideband. Therefore, a frequency-hopping system has such advantages as antijamming and low probability of intercept. This system is often used in military communications. Because frequency-hopping signal detection is difficult, it is an important research issue. A novel detection technique is proposed that can improve detection probability. When the received signal is transformed to a frequency domain sample by fast Fourier transform, spectral leakage lowers the detection probability. This problem can be solved by using the Hamming window, and the detection probability can be increased. However, in a frequency-hopping environment, the windowing technique lowers the detection probability. The proposed method solves this weakness. The simulation results show that the proposed detection technique improves the detection probability by as much as 13 %.

Key words: Spread Spectrum, Frequency Hopping, FFT, Windowing, Spectral Leakage

I. 서 론

주파수 도약(frequency hopping)은 대역 확산 통신방식

「이 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음.」

고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과(Department of Computer Science and Engineering, Korea University)

*고려대학교 정보보호대학원(Graduate School of Information Security, Korea University)

· Manuscript received January 8, 2018 ; Revised March 23, 2018 ; Accepted October 12, 2018. (ID No. 20180108-003)

· Corresponding Author: In-Seok Lee (e-mail: insukee@korea.ac.kr)

(spread spectrum) 중 하나이다^[1]. 주파수 도약이란, 광대역 상에서 반송파의 주파수가 고정되어 있지 않고, 다양한 주파수로 바뀌며 도약하는 통신방식을 말한다. 주파수 도약은 빠른 주파수 도약(fast FH)과 느린 주파수 도약(slow FH), 2가지 방식으로 세분화할 수 있다. 빠른 주파수 도약은 한 심볼 내에 하나 이상의 도약이 존재할 때를 말하며, 느린 주파수 도약은 한 번의 도약 내에 하나 이상의 심볼이 존재함을 의미한다. 주파수 도약 시스템은 주파수가 고정되어 있지 않다는 특징으로 인해 뛰어난 항재밍(anti-jamming) 성능, 저파탐(low probability of intercept: LPI) 등의 장점을 가지고 있다. 주로 적에게 탐지되지 않아야 하는 군 통신에서 많이 사용되며, 상용 통신에서도 종종 사용되고 있다. 상용 통신에서는 여러 명의 사용자들이 주파수 대역을 효율적으로 이용하고자 주파수도약 기술이 이용되며, 대표적인 예로는 bluetooth나 WLAN 등이 있다^[2]. 군 통신의 입장에서 주파수도약 시스템은 아군의 신호를 적군이 탐지 및 복원하기 어렵게 하여, 신호를 안전하게 송수신하는 것을 목적으로 주로 이용된다.

이처럼, 주파수도약 시스템은 보안이 가장 중요한 군 통신 분야에서 주목받고 있으며, 항재밍 성능을 높이는 방법으로 보안성을 더욱 강화하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다^{[3]~[5]}. 하지만 이 주파수 도약 시스템은 반대편의 측면에서도 생각해 볼 필요가 있다. 적군이 주파수도약 신호를 이용하여 송수신을 한다면, 아군 측에서도 탐지가 어렵다. 아군의 통신을 보호하는 것만큼 적군의 신호를 탐지하는 것도 중요한 사안이므로, 주파수 도약 신호의 탐지율을 높이는 방안에 대한 연구도 매우 중요하다. 상대측의 신호를 탐지하기 위한 탐지기 구조와 탐지 방법에 대한 연구도 많이 진행되었다^{[6]~[9]}. 하지만, 주로 신호 탐지에 이용되는 간단한 방식인 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용한 신호 에너지 검출 기법에는 큰 약점이 존재한다. 탐지될 신호의 주파수가 FFT가 표현할 수 있는 주파수 성분(frequency bin)과 정확히 일치하지 않는 경우에, spectral leakage가 발생하여 탐지 확률에 악영향을 끼친다. 특히, 주파수가 고정되지 않고 계속 변화하는 주파수 도약 신호를 탐지하고자 할 경우는 더 큰 영향을 받게 된다.

본 논문에서는 위와 같은 기존의 약점을 보완하기 위

해 해밍 윈도우(Hamming window)를 활용한 새로운 탐지 방법을 소개하고자 한다. 물론, 신호 탐지에 윈도우를 활용하거나, 다양한 윈도우 함수 자체의 특성을 분석한 기존의 연구도 있었으나^[10], 새로 제안하고자 하는 방법은 단순히 윈도우를 적용하기만 하는 방법과는 차별성을 가진다. 주파수가 계속 변화하는 도약 신호를 탐지하고자 하는 상황에서는 윈도우를 적용하는 것이 반드시 성능 향상을 가져오는 것은 아니며, 다양한 주파수의 변화에 대응하는 것이 더욱 중요하다. 본 논문에서는 주파수 도약 신호 탐지 상황에서 주파수 변화에 대응하여 탐지율을 향상시킬 수 있으며, 기존의 탐지기 구조를 그대로 활용할 수 있는 복잡하지 않는 구조를 가지는 새로운 탐지 방법을 제안하고, 그에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 FFT를 이용한 주파수 도약 신호 탐지 방법에 대하여 소개하고, III장에서 탐지기 결정 방법과 주파수 변화에 대응하여 탐지율을 향상시킬 수 있는 기법을 소개한다. IV장에서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법이 기존의 방법에 비해 높은 탐지 확률을 가짐을 보이며, V장에서 본 논문을 정리하고 결론을 맺는다.

II. 주파수도약 신호 탐지방법

신호를 수신하였을 때, 주파수 호핑 신호가 포함되어 있는지를 판단하는 것이 탐지(detection)이다. 주파수 호핑 신호를 판별해 내기 위하여 FFT를 이용하며, 주파수 성분의 값이 특정한 탐지 기준(detection threshold)보다 클 경우에 주파수 호핑 신호가 포함되어 있다고 판단할 수 있다.

2-1 FFT를 이용한 주파수 도약 신호 탐지

주파수 도약 신호 탐지를 위하여 수신 신호를 고속 푸리에 변환 즉, FFT를 한다^{[6][11]}. 식 (1)은 FFT를 수식으로 나타내고 있으며, 수신한 신호를 FFT를 이용하여 주파수 성분들로 표현할 수 있다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

식 (1)에서 $x(n)$ 은 수신기에서 수신한 시간 축의 신호

이며, $X[k]$ 는 수신 신호를 주파수 축으로 표현한 성분이 되고, N 은 FFT 포인트 수를 나타낸다. 만약, 주파수 성분 $X[k]$ 의 파워 값 중에서 탐지 기준 이상의 값을 가지는 주파수 성분이 존재하면, 주파수도약 신호가 존재한다고 판단한다.

2-2 스펙트럼 누설로 인한 탐지 확률 저하

주파수도약 신호가 존재할 경우, 그림 1에서 볼 수 있듯이 주변의 다른 주파수 성분보다 매우 큰 파워를 가지는 성분이 존재한다. 주파수도약 신호가 포함된 수신된 신호를 FFT할 경우, 주파수도약 신호의 주파수가 FFT 포인트의 주파수 성분 값으로 정확히 표현이 되지 않을 때 주파수 성분의 스펙트럼 누설(spectral leakage)이 전 대역으로 발생할 수 있다^[10]. 스펙트럼 누설 현상이란 그림 2에서 볼 수 있듯이 주파수도약 신호의 주파수 주위로 파워가 퍼져 영향을 끼치는 것을 말한다. 그림 1은 주파수도약 신호의 주파수와 FFT 포인트의 주파수 성분이 정확히 일치하는 경우를 보이고 있고, 그림 2는 주파수도약 신호의 주파수와 FFT 포인트의 주파수 성분이 최대한 어긋나 있는(포인트의 중간에 위치하는) 경우를 보이고 있다. 본 논문에서는 그림 1의 경우를 best case, 그림 2의 경우를 worst case로 지칭하도록 하겠다. Worst case에 해당하는 경우에는, 신호의 파워가 옆으로 퍼짐이 가장 심하다. 그림 2에서 알 수 있듯이, 수신 신호를 주파수 성분으로

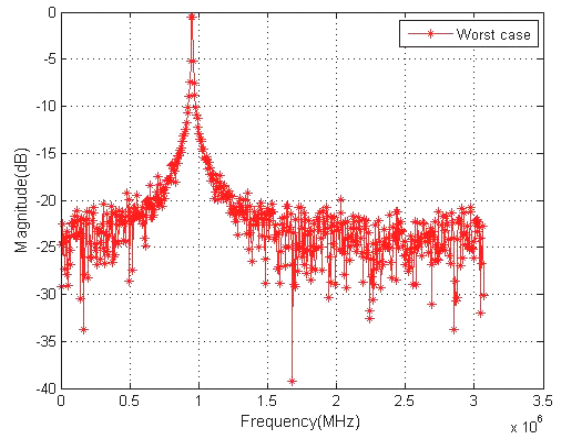


그림 2. 스펙트럼 누설 현상의 worst case
Fig. 2. Worst case of spectral leakage.

나타내었을 때 스펙트럼 누설이 가져오는 왜곡이 상당히 심하며, 이 왜곡은 탐지 확률 저하에 영향을 끼친다.

그림 3은 주파수도약 신호의 주파수에 특정한 offset 값을 더하여, 그에 따른 탐지 확률을 시뮬레이션한 결과이다. Best case는 offset을 더하지 않아서 주파수도약 신호의 주파수와 FFT 포인트의 주파수 성분이 일치할 때의 결과이고, worst case는 offset 값을 FFT 포인트의 주파수 성분과 최대한 어긋나게 설정한 결과이다. 실제로 worst case에서는 같은 수준의 탐지 확률을 얻기 위해서 3~4 dB 정도 높은 SNR을 요구하며, 같은 SNR에서는 탐지 확률이

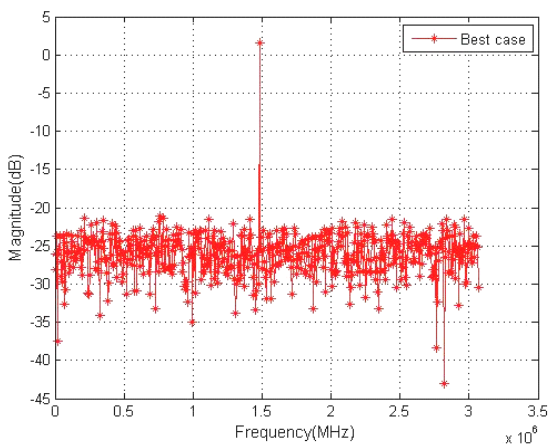


그림 1. 주파수 도약 신호(best case)
Fig. 1. Frequency hopping signal(best case).

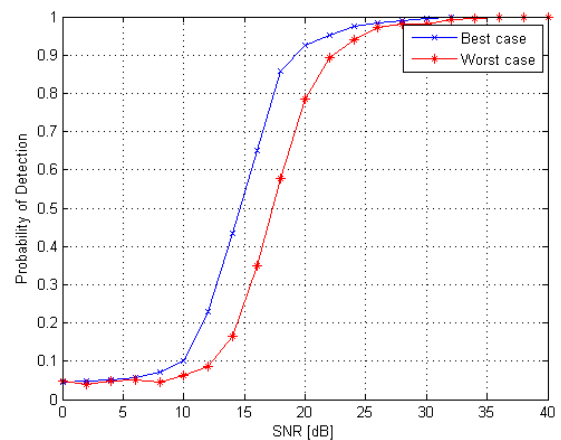


그림 3. Offset 설정에 따른 탐지 확률
Fig. 3. Detection probability according to offset.

최대 30 %까지 차이가 있음을 알 수 있다. 만약 어떠한 수신 신호에서 주파수도약 신호가 포함되어 있는지 탐지하기를 원하는 경우, 주파수도약 신호의 주파수는 계속 변화하기 때문에 정확히 알아내기가 힘든 경우가 대부분이다. 따라서, FFT를 이용하는 기존의 탐지 방법은 best case보다는 worst case에 가까운 환경에서 탐지하는 상황이 대부분일 것이며, 이는 기존의 탐지 방법이 주파수가 변화하는 환경에서는 효율적이지 못하다는 것을 알 수 있다. 단순히 FFT의 사이즈를 늘려 탐지확률을 높일 수도 있겠지만, 여전히 worst case는 존재하며 worst case일 때 발생하는 탐지 확률 저하를 해결하기는 힘들다. 본 논문에서는 주파수 도약이라는 환경에서 탐지 확률 저하를 막을 수 있는 신호 탐지 방법을 제안하고자 한다.

III. 제안하는 주파수도약 신호 탐지 방법

3-1 탐지 기준 결정방법

탐지 기준을 정하는 방법은 N-sigma, K-median 등의 여러 가지가 있고^{[12],[13]}, 본 논문에서는 탐지 기준을 결정하기 위해 K-median 방식을 선택하여 사용하였다^[12]. K-median 방식은 여러 값들 중에서 median 값을 찾은 뒤에 정수 K배를 하여 기준을 정하는 방식이다. 본 논문에서는 주파수 성분들의 파워값의 median 값을 찾은 뒤에 정수 K를 곱하여 탐지 기준을 정하였다. 그 후에, 주파수 성분 파워의 최대값을 찾아서 최대값이 설정된 탐지 기준보다 높다면 주파수도약 신호가 존재한다고 판단하고, 최대값이 탐지 기준보다 낮다면 신호가 존재하지 않는다고 판단한다. 정수 K값은 오경보 확률(false alarm probability)에 따라 결정하게 되며, IV장에서 시뮬레이션을 통해 K값을 결정하는 방법을 자세히 기술하였다.

3-2 제안하는 주파수도약 신호 탐지 알고리즘

FFT로 인해 발생하는 스펙트럼 누설로 인한 성능 저하를 막기 위해서 FFT의 입력 신호 즉, 수신 신호에 윈도우를 적용하는 방식을 사용하였다. FFT 윈도우기법은 식 (2)와 같이 FFT의 입력신호에 일정한 계수들을 곱하여 FFT를 실행하게 된다. 그 결과, 그림 4에서 보이는 바와 같이 전 대역으로 넓게 퍼지는 신호를 비교적 좁은 범위

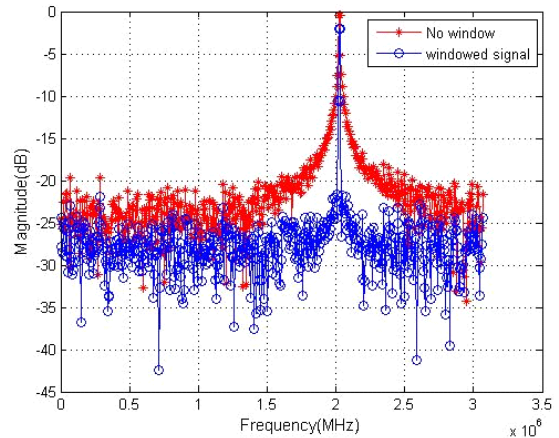


그림 4. Hamming window를 적용
Fig. 4. Use of Hamming window.

로 압축시켜주는 효과를 보여준다. 자주 사용되는 윈도우 기법에는 해밍 윈도우(Hamming window), 블랙만-해리스 윈도우(Blackman-Harris window) 등이 있다^[10]. 본 논문에서는 해밍 윈도우를 선택하여 적용하였다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} w(n)x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (2)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

그림 4에서 볼 수 있듯이 worst case인 경우에 해밍 윈도우를 적용하면, 스펙트럼 누설로 인한 왜곡이 완화되기 때문에 탐지확률 향상을 기대해볼 수 있다. 하지만 best case의 경우에는 윈도우 자체의 특성으로 인해 오히려 peak의 파워가 다른 주파수 성분으로 퍼지는 왜곡이 일어나게 되므로, 더 안 좋은 성능을 가져올 수 있다. 즉, 윈도우의 사용이 무조건적으로 탐지 확률 향상을 가져오는 것이 아니며, 주파수가 계속 변화하는 환경에 대응할 필요성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 주파수 변화에 대응할 수 있으면서도 구조가 간단한 새로운 주파수 도약 신호 탐지 방법을 제안한다. 제안하는 탐지 방법 알고리즘의 블록도는 그림 5에 나타나 있다. 우선, 윈도우를 이용하지 않은 원래의 수신 신호를 K-median 방식으로 탐지한다. 만약, 탐지 기준을 넘어서는 주파수 성분이 있다면 주파수도약 신호가 존재한다고 판단한다. 그리고 탐지 기준을 넘어서는 주파수 성분이 없다면, 수신 신호에 윈도우를 적

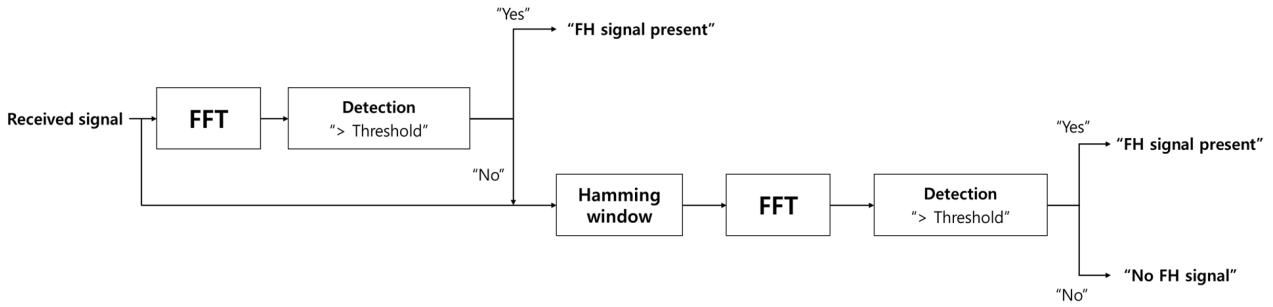


그림 5. 제안하는 주파수도약 신호 탐지 알고리즘 블록도
Fig. 5. Proposed frequency hopping detection algorithm block diagram.

용하여 K-median 방식으로 한번 더 탐지한다. 이러한 방식으로 탐지를 한다면, 스펙트럼 누설의 영향을 받아 탐지 확률이 낮아지는 worst case에서는 탐지 확률 향상을 기대할 수 있고, best case에서는 윈도우로 인한 탐지 확률 저하를 막을 수 있어서 주파수 변화에 효율적으로 대응이 가능하다. 두 단계 탐지로 인해 계산량이 증가되는 단점은 존재하지만, 기존에 사용되던 FFT를 이용한 에너지 검출 탐지기의 구조를 변화시키지 않고 그대로 활용할 수 있어 비용을 대폭 줄이면서도 다양한 주파수 오프셋에 대한 강인한 탐지 성능을 얻을 수 있다는 큰 장점이 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안하는 탐지 방법의 성능 비교를 위하여, 윈도우를 사용하지 않은 경우와 항상 사용한 경우, 그리고 제안하는 방법을 사용한 경우의 3가지 환경에서 오경보 확률과 탐지 확률을 비교하였다. 우선 QPSK로 데이터를 생성하고, 1 심볼당 1번 hop을 하는 느린 주파수 도약을 사용한다고 가정하였으며, SNR은 8~28 dB까지 2 dB 간격으로 시뮬레이션을 진행했다. 수신된 주파수도약 신호는 Rayleigh fading 채널을 통과했다고 가정하였으며, white Gaussian noise가 더해졌고 윈도우는 해밍 윈도우를 사용하였다. 제안하는 방법의 단점으로 언급한 계산량의 증가를 고려하기 위해서 제안하는 방법은 512 FFT를 사용하고 그 외의 방법은 1024 FFT를 사용하여 성능 비교에 공정성을 기하였다. 그리고 FFT로 인해 발생하는 processing gain을 모든 경우에서 $10 \cdot \log_{10}(\text{FFT point}/2)$ 만큼 고려하였다. 시뮬레이션은 주파수도약 신호의 주파수에 따라 best case,

worst case, semi-worst case, 3가지 환경으로 구분하여 진행하였다. Best case는 II 장에서도 설명했듯이, 주파수도약 신호의 주파수와 FFT포인트가 나타내는 주파수가 정확히 일치할 경우(offset=0)이고, worst case는 주파수도약 신호의 주파수가 FFT 포인트의 중간에 위치하는, 완전히 어긋난 경우(offset=FFT 포인트가 나타내는 주파수의 0.5 배)이다. Semi-worst case는 주파수도약 신호의 주파수가 완전히 어긋나지는 않고, FFT 포인트에 비교적 가까운 경우(offset=FFT 포인트가 나타내는 주파수의 0.35배)이다.

그림 6은 K-median을 이용한 탐지 기준을 결정할 때, K값의 변화에 따른 오경보 확률을 나타낸 것이다. 윈도우의 사용 유무와 제안하는 방법, 3가지 경우를 나누어서 시뮬레이션을 진행했다. 앞에서 언급하였듯이, 제안하는 방법은 512 FFT를 이용하고 그 외의 방법은 1024 FFT를

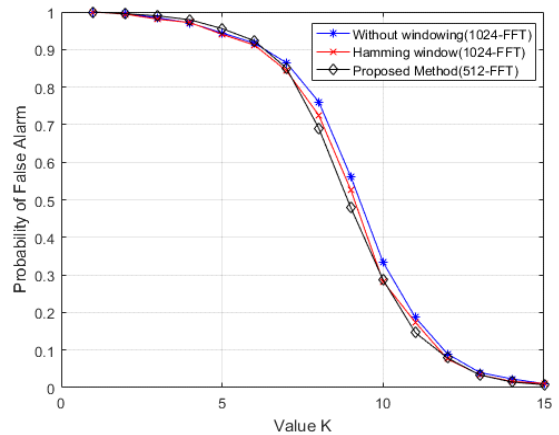


그림 6. K값에 따른 오경보 확률
Fig. 6. False alarm probability according to value K.

이용하였다. K 값이 낮은 숫자일 경우는 탐지 기준이 낮은 것이므로, 오경보 확률이 높다. 반대로 K 값이 높은 숫자일 경우는 탐지 기준이 높은 것이므로, 오경보 확률이 낮게 나타난다. K 값이 8~11인 경우에 오경보 확률이 약간의 차이가 있으나 큰 차이는 아니며, 3가지 경우 모두 대체로 유사한 오경보 확률을 보임을 알 수 있다. 탐지 확률 실험을 위한 오경보 확률은 임의로 설정할 수 있지만, 일반적으로 0.1 혹은 그보다 낮게 설정한다⁹⁾. 그림 6에서 K 값이 12일 때를 보면, 3가지 경우 모두 오경보 확률이 거의 동일하며 0.1에 매우 가까운 오경보 확률을 가진다. 그리고, K 값이 15일 때는 오경보확률이 0.01에 매우 가깝다. 따라서, 본 논문의 실험에서는 오경보 확률이 0.1에 가까울 때의 K 값인 12와, 오경보확률이 0.01에 가까울 때의 K 값인 15를 선택하여 탐지 기준을 정하였다. 즉, 주파수 성분의 파워 값의 median값을 찾은 뒤에 12 혹은 15를 곱한 값을 탐지 기준으로 정했다.

그림 7~그림 9는 주파수도약 신호의 SNR에 따른 탐지 확률을 보이고 있다. 실선의 그래프는 K 값이 12이고 오경보확률이 0.1일 때를 나타내며, 점선 그래프는 K 값이 15이고 오경보확률이 0.01일 때를 나타낸다. 그림 7의 worst case에서는 단순히 윈도우를 수신 신호에 적용했을 때, 사용하지 않은 경우보다 최대 6 % 정도 향상된 탐지 확률을 보인다. 제안하는 방법을 사용하였을 경우에는 기존의 방법보다 최대 13 % 정도 향상된 탐지 확률을 보인다.

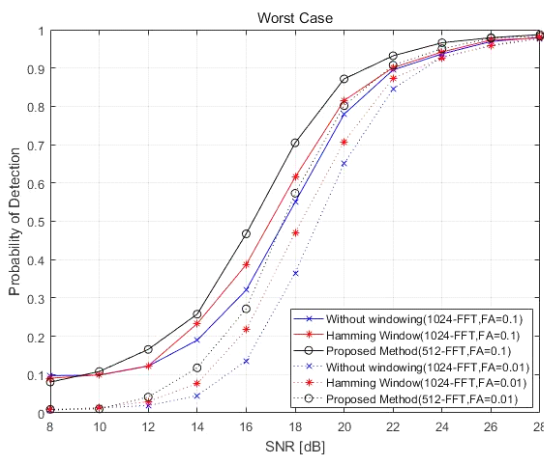


그림 7. Worst case 상황에서의 탐지 확률
Fig. 7. Detection probability in worst case.

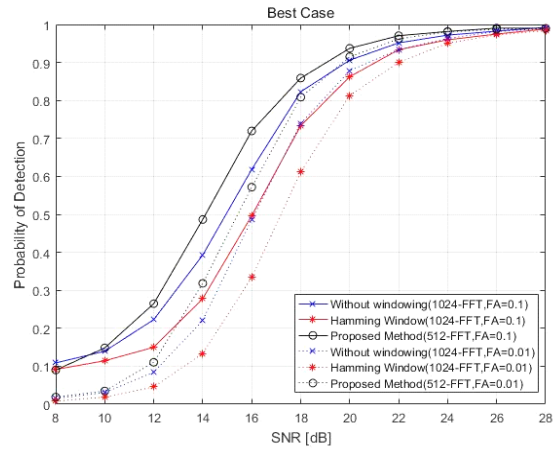


그림 8. Best case 상황에서의 탐지 확률
Fig. 8. Detection probability in best case.

Worst case에서는 단순히 윈도우를 사용하기만 해도 약간의 성능 향상을 얻을 수 있으며, 제안하는 방법을 이용하면 그보다 더 높은 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 8의 best case에서는 오히려 윈도우를 사용했을 경우가 기존의 방법보다 10 % 낮아진 탐지 확률을 보인다. 이는 앞에서 예상한 대로 best case에서는 윈도우로 인한 왜곡이 탐지 성능 저하를 가져옴을 알 수 있고, 윈도우의 적용이 반드시 성능 향상을 가져오는 것은 아님을 보여준다. 제안하는 방법을 사용하면 탐지 확률 저하를 막고 기존의 방법보다도 7 % 정도 향상된 탐지 확률을 얻을 수 있

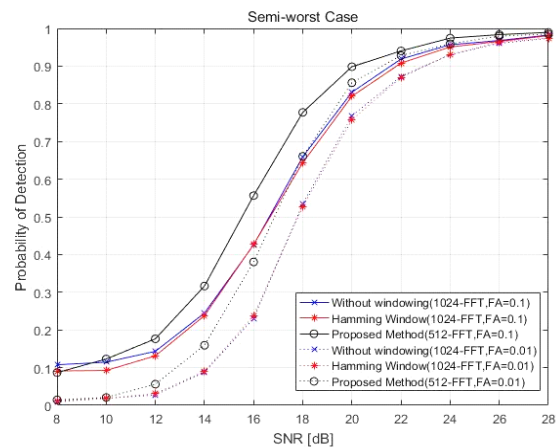


그림 9. Semi-worst case 상황에서의 탐지 확률
Fig. 9. Detection probability in semi-worst case.

었다. 그림 9의 semi-worst의 경우에는 윈도우를 사용하지 않은 경우와 항상 사용한 경우가 거의 차이가 없는 탐지 확률을 보인다. 하지만 제안하는 방법을 사용하면, 10 % 정도 향상된 탐지 확률을 얻을 수 있었다. 그리고, 모든 경우에서 오경보확률이 0.1일 때와 0.01일 때의 탐지확률은 매우 비슷한 경향과 증가폭을 보임을 알 수 있다. 다만, 오경보확률이 0.01일 때는 탐지 기준이 상대적으로 높은 것이므로, 탐지 확률은 상대적으로 낮다.

V. 결 론

본 논문에서는 주파수도약 신호의 탐지 확률을 높이는 방법에 대하여 연구하였다. 기존의 탐지 방법들은 주파수도약 신호를 탐지하기 위해 FFT를 이용하여, 주파수 성분이 탐지 기준을 넘어서면 주파수도약 신호가 존재한다고 판단한다. 하지만 FFT point가 표현할 수 있는 주파수가 도약 신호의 주파수와 어긋남으로 인해 발생하는 스펙트럼 누설은 탐지 확률을 낮추는 원인이 된다. 이를 해밍 윈도우를 이용하여 해결할 수 있었다. 하지만, 주파수 변화에 따라 윈도우의 적용은 오히려 성능에 악영향을 가져올 수도 있다. 이를 고려하여, 원래의 수신 신호를 FFT 하여 탐지하고, 만약 탐지되지 않았을 경우에 수신 신호에 윈도우를 적용하여 한번 더 탐지하는 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 기존의 방법의 탐지기 구조 활용이 가능하면서도, 주파수가 계속 변화하는 주파수도약 신호 탐지라는 환경에 대응하여 효율적으로 신호 탐지가 가능하다. 제안하는 방법을 사용하였을 때, 계산량의 증가라는 단점을 고려한 환경에서도 윈도우를 사용하지 않은 보통의 탐지 방법에 비해 worst case에서는 13 % 정도, best case의 경우에는 7 % 정도로 모두 향상된 탐지 확률을 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안하는 방법은 주파수도약 신호라는 특수한 환경에서 변화에 대응하여 기존의 방법보다 향상된 성능을 가짐을 알 수 있다.

References

[1] D. J. Torrieri, *Principles of Spread-Spectrum Communication Systems*, 2nd ed. Heidelberg, Springer, 2004.
 [2] R. C. Dixon, *Spread Spectrum Systems with Commercial*

Applications, 3rd ed. New York, John Wiley & Sons, 1994.
 [3] H. Ahn, C. Kim, J. S. No, J. Park, H. Y. Song, and S. W. Han, "The higher-order-modulated slow-frequency-hopping spread-spectrum system over AWGN under partial-band jamming," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences(KICS)*, vol. 42, no. 1, pp. 14-24, Jan. 2017.
 [4] C. Kim, P. Yang, J. S. No, J. S. Park, H. Y. Song, and S. W. Han, "Construction of anti-jamming partially regular LDPC codes for follower jamming under frequency hopping spread spectrum system," in *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Nov. 2015, pp. 595-596.
 [5] J. Park, I. Kim, H. Y. Song, P. Yang, J. S. No, and S. W. Han, "Erasure insertion and clipping for LDPC coded frequency-hopping non-coherent BFSK system over partial-band jamming channel," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences(KICS)*, vol. 40, no. 8, pp. 1492-1499, Aug. 2015.
 [6] N. C. Beaulieu, W. L. Hopkins, and P. J. McLane, "Interception of frequency-hopped spread-spectrum signals," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 8, no. 5, pp. 853-870, Jun. 1990.
 [7] C. D. Chung, "Generalised likelihood-ratio detection of multiple-hop frequency-hopping signals," *IEEE Proceedings-Communications*, vol. 141, no. 2, pp. 70-78, Apr. 1994.
 [8] J. E. Dunn, "Detection and classification of frequency-hopped spread spectrum signals," Ph.D. dissertation, Iowa State University, 1991.
 [9] A. Polydoros, K. Woo, "LPI detection of frequency-hopping signals using autocorrelation techniques," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 3, no. 5, pp. 714-726, Sep. 1985.
 [10] F. J. Harris, "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform," in *Proceedings of the IEEE*, Jan. 1978, vol. 66, no. 1, pp. 51-83.
 [11] J. Joo, J. Won, C. Lee, S. Park, and K. Lee, "Detection of an unknown FH signal using scanning receiver and

DF receiver in practical environments," in *2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Kowloon, Mar. 2007, pp. 1226-1230.

- [12] J. O. Kim, J. S. Bae, and K. W. Song, "A method and apparatus to improve anti-jamming and to eliminate jamming in a GPS system by adjusting additional threshold value in the frequency domain," Patent application:

10-2010-0014870, Aug. 2010.

- [13] P. T. Capozza, B. J. Holland, T. M. Hopkinson, and R. L. Landrau, "A single-chip narrow-band frequency-domain excisor for a global positioning system(GPS) receiver" *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 35, no. 3, pp. 401-411, Mar. 2000.

이 인 석 [고려대학교/석·박통합과정]



2014년 2월: 고려대학교 컴퓨터·통신공학부 (공학사)
2014년 3월~현재: 고려대학교 전파통신공학전공 석·박사통합과정
[주 관심분야] 무선통신, 신호처리

오 성 준 [고려대학교/교수]



1991년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2000년 9월: University of Michigan, EE: Systems PhD
2000년 9월~2007년 8월: Ericsson Wireless Communications 와 Qualcomm CDMA Technologies 근무
2007년 9월~현재: 고려대학교 정보보호대학원 교수
[주 관심분야] 무선네트워크, 통신 표준화, 모뎀 구현