THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2019 Mar.; 30(3), 215～222.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2019.30.3.215
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

무선채널환경에서 미상의 주파수 도약신호에 대한 도약정보 생성 기법

Hopping Information Generation of Unknown Frequency Hopping Signals in Wireless Channel Environments

안 준 일 · 이 치 호 · 정 운 섭

Junil Ahn · Chiho Lee · Unseob Jeong

요 약

주파수 도약신호는 전송시간 동안 반송파 주파수를 변경시켜 주파수 대역에서 확산 스펙트럼 특성을 가진다. 이러한 특성으로 주파수 도약신호는 무선채널환경에서 저피탐 및 항재밍 능력이 필요한 분야에 널리 활용된다. 본 논문에서는 미상의 주파수 도약신호에 대해 시작시간, 유지시간, 그리고 도약주파수를 포함하는 도약정보를 생성하는 기법을 제안한다. 제안한 블라인드 도약정보 생성 기법은 스펙트럼 데이터로부터 신호원에 대한 탐지정보를 생성하고, 이로부터 대상 주파수 도약신호의 출현, 유지, 그리고 종료 여부를 추정하는 동작 과정으로 도약정보를 추출한다. 또한, 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 기법이 다양한 주파수 도약신호에 대하여 탐지 누락 없이 정확한 도약정보를 제공함을 확인하였다.

Abstract

A frequency hopping(FH) signal can change its carrier frequency during transmission and has spread-spectrum characteristics in these frequency bands. Therefore, FH signals are widely used in applications that require low-probability-of-intercept(LPI) and anti-jamming (AJ) abilities in wireless communication environments. In this study, the authors propose a method for generating hopping information (HI), which includes start time, dwell time, and hopping frequency for unknown FH signals. The proposed blind HI generation method produces signal detection information based on the spectrum data and then extracts HI using operational procedures for estimating the target FH signal's status, such as appearance, maintenance, and termination. Further, simulation results demonstrate that the proposed method provides accurate HI without detection omissions for various FH signals.

Key words: Frequency Hopping Signals, Hopping Information, Blind Signal Detection, Unknown Signals

Ⅰ. 서 론

주파수 도약신호는 짧은 전송시간 동안 각기 다른 반송파 주파수를 사용하며, 넓은 주파수 대역에 걸쳐서 확산 스펙트럼 특성을 가진다. 이를 이용하여 주파수 도약 시스템은 제한적인 주파수 대역에서 사용자들 간의 신호 간섭을 방지하며, 효율적으로 다중 접속이 가능하게 한다. 또한, 주파수 변경 정보 등을 비롯한 도약 제원은 인

국방과학연구소(Agency for Defense Development)
· Manuscript received January 3, 2019 ; Revised February 18, 2019 ; Accepted March 25, 2019. (ID No. 20190103-003)
· Corresponding Author: Junil Ahn (e-mail: junilahn98@gmail.com)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

가된 송수신기 사이에서만 공유되어, 비인가 수신기에 대한 저피탐(low probability of intercept: LPI) 및 보안 능력, 그리고 주파수 다이버시티를 통한 항재밍(anti-jamming: AJ) 기능이 요구되는 분야에 널리 활용된다[1],[2].

한편, 미상의 통신신호에 대한 탐지 및 불법 전파감시를 위해서는 다양한 통신신호가 밀집된 무선채널환경에서 특정 대상의 신호원을 탐지 및 분류하고, 해당 신호원의 제원정보를 추출하는 능력이 필요하다[3]. 이러한 관점에서, 사전정보가 없이 주파수 도약신호를 탐지하기 위해서는 정확한 시간 및 주파수 동기로 해당 신호원을 검출할 수 있어야 한다[4]. 상기 이유로 주파수 도약신호를 블라인드 방식으로 추출하기 위한 여러 연구가 진행되어 왔으며, 대표적으로 신호원의 방위각 및 주파수 히스토그램(histogram) 분석을 이용한 기법[4], 다상 DFT(Discrete Fourier Transform) 필터뱅크 (filter bank) 또는 스펙트로그램 (spectrogram)을 통한 이미지 신호처리 적용 기법[5],[6]이 제안되었다. 하지만, 탐지 대상이 아닌 신호원이 혼재하며, 잡음에 의해 왜곡되는 무선채널환경에 안정적으로 적용할 수 있으며, 서로 상이한 도약 제원을 가지는 다수의 주파수 도약신호에 대해 각 주파수 도약별로 시작시간, 유지시간, 그리고 도약주파수를 포함하는 도약정보를 추정하는 방식에 관하여 추가 개선이 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 앞서 언급한 과제를 해결하기 위해 미상의 주파수 도약신호에 대한 도약정보 생성 기법을 제안한다. 제안한 블라인드 도약정보 생성 기법은 비교적 구현이 간단한 DFT를 통한 스펙트럼 데이터로 신호원에 대한 탐지정보를 생성한다. 이후, 입력된 탐지정보와 세부 알고리즘을 통해 주파수 도약신호의 출현, 유지, 그리고 종료 여부를 판단하여 도약정보를 생성한다. 또한, 고정주파수신호 또는 순간적으로 큰 잡음원이 포함된 무선채널환경에서도 대상 주파수 도약신호에 대한 도약정보를 추정할 수 있으며, 해당 신호원이 일시적으로 누락된 상황에도 안정적으로 도약정보 생성 기능을 수행할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 본 논문에서 고려한 주파수 도약신호 모델을 제시하고, 탐지정보 생성 단계와 도약정보 생성 단계로 구성되는 제안하는 도약정보 생성 기법을 설명한다. 한편, Ⅲ장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 기법의 성능 분석을 수행한다. 그 후, 논문의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 주파수 도약신호 모델 및 도약정보 생성 기법

2-1 주파수 도약신호 모델

주파수 도약신호는 할당된 주파수 대역에서 인가된 송수신 측 사용자 사이에서만 공유된 랜덤 코드(random code)에 의해 선정된 패턴으로 시간에 따라 반송파 주파수를 변경시키며 전송된다. 이때, 수신되는 주파수 도약신호는 다음 식 (1)과 같이 복소 (complex) 수학식 모델로 표현할 수 있다.

$$y(t) = A_k \sum_k rect_{T_h, T_m}(t - kT_h - T_o) \cdot e^{j2\pi f_k (t - kT_h - T_o) + \theta} + w(t) \quad (1)$$

여기서, 시간 t는 $0 < t \leq T$의 범위이며, T는 총 수신 시간, 그리고 A_k는 k 번째 주파수 도약의 신호 진폭이다. θ는 신호의 위상으로 Coherent 송수신 시스템에서는 $\theta = 0$으로, Noncoherent 경우에는 $0 \leq \theta \leq 2\pi$의 범위에서 Uniform 분포를 따른다고 가정할 수 있다. 또한, $w(t)$는 평균이 0이고, 차원 당 분산이 $N_0/2$인 복소 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 잡음이다. 한편, 구형함수 (rectangular function) $rect_{T_h, T_m}(t)$는 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$rect_{T_h, T_m}(t) = \begin{cases} 1 \ , & -\frac{T_h}{2} < t \leq \frac{T_h}{2} - T_m \\ 0 \ , & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

식 (1)에서 T_h는 도약시간으로 각 주파수 도약에 할당된 시간이며, 이는 현재와 다음 주파수 도약의 시작시간 간 차이에 해당된다. 이때, 도약시간의 역수는 1 초당 주파수 도약의 횟수로써 주파수 도약신호의 도약율이다. 한편, T_o는 신호발생 시작에 대한 시간 오프셋이다. 도약시간 T_h는 식 (3)과 같이 유지 (Dwell) 시간 T_d와 휴지 (mute) 시간 T_m으로 구성된다.

$$T_h = T_d + T_m \quad (3)$$

여기서, 유지시간 T_d은 도약시간 T_h 중 신호원이 존재

하는 구간이며, 휴지시간 T_m은 다음 번째 도약주파수로의 천이를 위한 구간으로써 신호원이 존재하지 않는다. 한편, 식 (1)에서 f_k는 k번째 도약주파수이며, $\Omega_f = \{f_1, f_2, \cdots, f_N\}$의 도약주파수 집합에서 랜덤 코드에 따른 패턴에 따라 결정된다.

2-2 제안한 도약정보 생성 기법의 구조

앞서 설명한 주파수 도약신호를 포함한 수신신호로부터, 사전정보 없이 주파수 도약신호의 추적, 분석, 저장, 또는 복조 등을 수행하기 위해서는 확산 스펙트럼의 특성에도 불구하고 신호원이 존재하는 시간구간 및 주파수에 대한 정보를 추출해야 한다. 따라서, 그림 1에 도시되어 있는 각 주파수 도약별 시작시간, 유지시간, 그리고 도약주파수를 포함하는 도약 제원인 도약정보의 생성이 필수적이다. 본 논문에서는 이러한 목적을 위해 주파수 도약신호가 포함된 수신신호로부터 블라인드 방식으로 도약정보를 추정하는 기법을 제안하고 설명한다. 제안하는 도약정보 생성 기법은 탐지정보 생성 단계와 도약정보 생성 단계로 구성되며, 각 단계의 상세 동작 과정은 다음에서 상세히 설명한다.

2-3 탐지정보 생성 단계

제안하는 도약정보 생성 기법 중 탐지정보 생성 단계에서는 디지털화된 입력데이터에서 신호원을 탐지하고, 검출된 신호원에 대해 탐지시간과 탐지주파수로 구성된 탐지정보를 생성한다.

신호원 검출을 위하여 H/W에서 구현이 용이한 DFT를 통해 얻어지는 스펙트럼 데이터를 이용한다. 이때, 주파수 상의 Spectral Leakage 현상[7]을 완화하기 위해 시간영역의 Windowing 함수[8]를 적용한 N-point DFT를 기반으로 다음 식 (4)와 같이 전력 스펙트럼 $\{X(m)\}_{m=0}^{N-1}$을 계산한다.

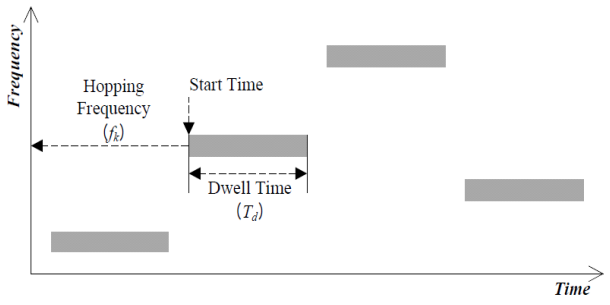

그림 1. 주파수 도약신호에서의 도약정보
Fig. 1. Hopping information in frequency hopping signal.

$$X(m) = \frac{1}{N}\left|\sum_{n=0}^{N-1} w(n) \cdot x(n) e^{-j2\pi nm/N}\right|^2 \quad (4)$$

위 식에서 $x(n)$는 입력신호, $w(n)$는 Windowing 함수의 계수이며, Hamming Window 함수를 이용한다. 또한, m은 주파수 Bin의 인덱스이다.

이후, 생성된 전력 스펙트럼을 dB(decibel) 스케일로 변환한 후, 사용자가 설정한 탐지 임계치와 비교하여 신호원을 검출한다. 이때, 해당 임계치보다 큰 전력값을 가지는 주파수 Bin들에 신호원이 존재한다고 판단한다. 이후, 신호원이 존재하는 주파수 Bin들 중에서 연속된 Bin들을 그룹핑하고, 각 주파수 Bin 그룹별로 탐지주파수를 결정한다. 탐지주파수는 주파수 Bin 그룹에 포함된 Bin의 개수가 L일 때, $\lceil L/2 \rceil$ 번째의 Bin에 해당하는 주파수 값으로 결정하며, $\lceil \cdot \rceil$ 은 천정 (Ceiling) 함수이다. 이후, 입력된 전력 스펙트럼의 생성시간을 탐지시간으로 하여, 탐지정보의 생성을 완료한다.

2-4 도약정보 생성 단계

도약정보 생성 단계를 설명하기 위한 동작 흐름도를 그림 2에 도시하였다. 그림 2의 동작 흐름도에서 회색 배경의 블록은 지정된 조건에 대한 판단을 수행하는 단계로써 충족 여부에 따라 다음 수행 단계가 결정된다.

제안하는 도약정보 생성 단계는 앞서 생성된 탐지정보를 기반으로 주파수 도약신호의 출현, 유지, 그리고 종료 여부를 판단하여 주파수 도약별로 도약정보를 생성한다. 이를 위해, 본 단계에서는 시작시간, 임시도약주파수, 유지카운터, 결손카운터로 구성되는 임시도약정보를 정의하고 이용한다. 이후, 입력 탐지정보에 따라 임시도약정보를 생성, 갱신, 그리고 제거하여, 수신신호 내 주파수 도약신호의 상태에 따라 도약정보를 생성함을 특징으로 한다. 또한, 임시도약정보의 유지 및 결손카운터는 도약정보 생성 과정에서 해당 도약정보의 유효성 판단에 활

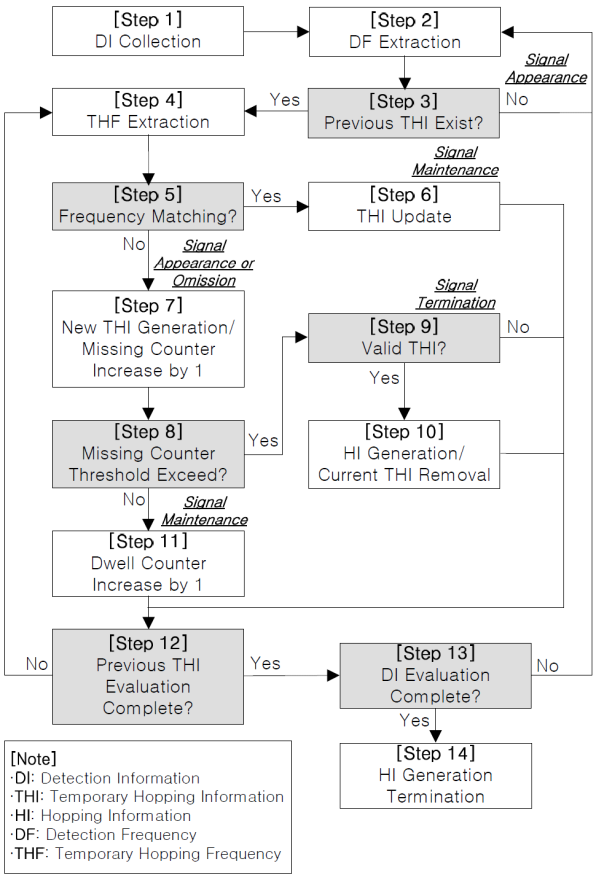

그림 2. 도약정보 생성 단계의 동작 흐름도
Fig. 2. The operational flow chart for hopping information generation stage.

용된다.

앞서 설명한 도약정보 생성 단계의 배경 개념에 따라 수신신호 내 주파수 도약신호의 상태(출현, 유지, 누락, 종료)에 대한 판단 내용을 그림 2의 동작 흐름도 해당 과정 옆에 병기하였다. 이후의 도약정보 생성 단계에 대한 상세한 설명은 그림 2의 동작 흐름도를 참조하며 기술한다.

우선, 단계 1에서 탐지정보를 수집하고, 단계 2에서는 입력된 탐지정보에 포함된 다수의 탐지주파수 중에서 도약정보의 생성 여부를 평가할 탐지주파수를 추출한다.

단계 3에서는 이전에 생성된 임시도약정보의 존재 여부를 판단한다. 이후, 이전 정보가 없으면 신규 임시도약정보를 생성하고 단계 2로 이동한다. 이는 새로운 주파수 도약신호가 출현한 경우에 포함될 수 있다. 신규 임시도약정보의 생성은 임시도약정보의 시작시간과 임시도약주파수를 탐지정보 탐지시간과 탐지주파수의 값으로 각각 설정하고, 유지 및 결손카운터는 1과 0으로 초기화함으로써 수행된다. 한편, 본 단계 3에서 이전 임시도약정보가 존재하면, 단계 4로 이동하여 앞서 추출된 탐지주파수와 매칭 여부를 확인할 임시도약정보를 선택하고 해당 임시도약주파수를 추출한다.

단계 5에서는 앞서 추출된 탐지주파수와 임시도약주파수의 매칭 여부를 확인하여, 탐지정보가 해당 임시도약정보에 연관된 동일 신호원인지를 판단한다. 매칭 여부는 식 (5)의 충족 여부로 판단한다.

$$\left| f_{\det} - f_{tmp} \right| \le M \cdot \Delta f_{spt} \tag{5}$$

여기서 $f_{\det}$와 f_{tmp}는 각각 추출된 탐지주파수 및 임시도약주파수이며, Δf_{spt}는 전력 스펙트럼의 주파수 해상도이다. 또한, M은 매칭오차 허용범위로써 주파수 해상도 Δf_{spt}와 대상 신호원의 대역폭 특성을 고려하여 설정한다. 이러한 매칭오차 허용범위의 설정으로 무선통신 신호의 수신과정에서 발생할 수 있는 주파수 오차를 보상하여 동일 신호원으로 매칭할 수 있다. 본 단계 5에서 두 비교 주파수의 매칭이 확인되면 단계 6을 수행하고, 그렇지 않으면 단계 7을 수행한다.

단계 6에서는 매칭된 임시도약정보를 갱신하며, 이는 이전에 출현한 주파수 도약신호가 유지되는 경우에 해당된다. 갱신 과정으로써 임시도약정보의 유지카운터를 1 증가시키고, 임시도약주파수는 이전값에 앞서 매칭된 탐지정보의 주파수를 포함하여 누적이동평균(Cumulative Moving Average)을 취해 업데이트한다.

한편, 단계 7은 신규 주파수 도약신호가 출현했거나, 이전에 발생된 주파수 도약신호가 탐지 또는 매칭 누락된 경우에 수행된다. 본 단계에서는 앞서 매칭되지 않은 탐지정보를 이용해서 단계 3에서 설명한 방식과 동일하게 신규 임시도약정보를 생성한다. 이후, 기존 선택된 임시도약정보의 결손카운터를 1 증가시킨 후, 단계 8로 이동한다.

단계 8에서는 앞서 선택된 임시도약정보 결손카운터의 결손임계값 d_{tmp} 초과 여부를 판단한다. 이후, 결손카운

터가 해당 임계값 d_{tmp}을 초과하면 단계 9에서 임시도약정보의 유효성을 확인한다. 그렇지 않은 경우에는 단계 11로 이동하여 현재 임시도약정보의 유지카운터를 1 증가시키며, 이는 이전에 출현한 주파수 도약신호가 해당 시점에 탐지 또는 매칭 누락이 되었으나, 아직 종료되지 않고 유지된 경우에 해당된다.

단계 9는 이전에 탐지된 신호원이 종료된 경우에 수행된다. 본 단계에서는 현재 평가되는 임시도약정보가 도약정보를 생성하는 대상 주파수 도약신호 제원에 포함되는지를 확인함으로써 임시도약정보의 유효성을 판단한다. 이러한 과정으로 탐지대상 도약율에 포함되지 않는 주파수 도약신호, 고정주파수신호, 또는 순간적으로 큰 잡음 신호원을 제외시킬 수 있다. 임시도약정보의 유효성은 다음 식 (6)의 충족 여부로 판단한다.

$$\lfloor T_{d,\min} \cdot \Delta f_{spt} \rfloor < c_{tmp} \leq \lceil T_{d,\max} \cdot \Delta f_{spt} \rceil \quad (6)$$

여기서 c_{tmp}는 임시도약정보의 유지카운터이며, $T_{d,\min}$과 $T_{d,\max}$는 도약정보 생성 대상인 주파수 도약신호의 유지시간 T_d에 대한 최대 및 최소값이다. 또한, $\lfloor \cdot \rfloor$는 바닥(floor) 함수이다. 이후, 임시도약정보가 탐지대상으로써 유효하면 단계 10으로 이동하고, 그렇지 않으면 해당 임시도약정보를 제거한 후 단계 12를 수행한다.

한편, 단계 10에서는 탐지대상으로 유효성이 확인된 임시도약정보로부터 도약정보를 생성한다. 이는 이전에 출현한 유효한 주파수 도약신호가 해당 도약주파수에서 종료된 경우에 해당한다. 도약정보 생성은 도약정보 시작시간과 도약주파수에 현재 임시도약정보 시작시간과 임시도약주파수의 값을 각각 입력하고, 도약정보의 유지시간에는 $c_{tmp}/\Delta f_{spt}$의 값을 설정하여 수행된다. 이후, 도약정보가 생성된 임시도약정보를 제거한 후, 단계 12로 이동한다.

단계 12에서는 이전에 생성된 임시도약정보들에 대해 추출된 탐지주파수와의 매칭 여부로 도약정보 생성 평가를 완료했는지 확인한다. 임시도약정보의 평가가 완료된 경우에는 단계 13을 수행하고, 그렇지 않은 경우, 다음 임시도약정보에 대한 확인을 위해 단계 4로 이동한다.

또한, 단계 13에서는 수집된 탐지정보에 포함된 모든 탐지주파수에 대해서 도약정보 생성 여부를 평가 완료했는지 확인한다. 본 단계에서 탐지정보의 평가 완료가 판단되면 단계 14에서 해당 수집된 탐지정보에 대한 도약정보 생성 단계를 종료하고, 그렇지 않으면 단계 2로 이동하여 앞서의 과정을 반복하게 된다.

Ⅲ. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 장에서는 앞서 제안 및 설명한 주파수 도약신호의 블라인드 도약정보 생성 기법에 대하여 시뮬레이션을 통해 성능 분석을 수행한다. 주파수 도약신호를 포함한 수신신호의 시나리오 및 관련 파라미터는 다음과 같이 설정하였다. 주파수 도약신호에 적용된 변조방식은 2-FSK를 가정하였으며, 심볼률은 10 ksymbols/sec이다. 또한, 수신신호의 입력 샘플링율은 2 Msps로 설정하였으며, 시뮬레이션에서 고려된 수신신호 SNR은 0 dB, 5 dB, 그리고 10 dB이다.

시뮬레이션에서 사용된 수신 주파수 도약신호의 주파수 도약 제원 파라미터는 표 1에 기술하였다. 표 1에서와 같이 제안한 기법에 입력되는 수신신호는 총 3개의 주파수 도약신호를 포함하며, 각각 서로 다른 도약율, 유지 및 휴지시간을 가지도록 하여 다양한 종류의 다중 주파수 도약신호 환경을 모의하였다. 한편, 각 주파수 도약신호는 표 1의 도약주파수 항목에 나열된 주파수 리스트에 따라 반복적으로 순환하며, 지정된 도약율에 맞추어 도약주파

표 1. 시뮬레이션에서 설정한 주파수 도약 파라미터
Table 1. Simulation parameters for frequency hopping.

Simulation parameters		Values
Number of frequency Hopping signals		3
Frequency hopping signal #1	Hopping rate	50 hops/sec
	Hopping frequency	−800, 800, −400, 400 kHz
	Dwell/mute time	18 msec/2 msec
Frequency hopping signal #2	Hopping rate	100 hops/sec
	Hopping frequency	−240, −720, 240, 720 kHz
	Dwell/mute time	9 msec/1 msec
Frequency hopping signal #3	Hopping rate	200 hops/sec
	Hopping frequency	560, 80, −80, −560 kHz
	Dwell/mute time	4.5 msec/0.5 msec

수를 변경한다.

시뮬레이션 수행 시, 탐지정보 생성 단계에서 식 (4)의 전력 스펙트럼 생성을 위해 256-point DFT를 적용하였다. 따라서, 전력 스펙트럼 주파수 해상도 Δf_{spt}는 7.8125 kHz 이다. 또한, 수신신호의 SNR에 따른 잡음 전력을 고려하여, SNR 0 dB, 5 dB, 10 dB의 조건에 대해 각각 탐지 임계치를 −12, −14, −17로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 한편, 도약정보 생성 단계에서 사용되는 파라미터 M, d_{tmp}, $T_{d,\max}$, $T_{d,\min}$은 탐지 대상 범위를 고려하여 각각 4, 2, 1/30, 1/300으로 설정하였다.

각 시뮬레이션에서 수신신호의 생성시간은 1 sec이며, 해당 시간 동안 생성된 모든 수신신호가 도약정보 생성 기법에 입력된다. 따라서, 설정된 생성시간 동안 제안한 기법이 각 주파수 도약신호에 대해 도약율과 같은 수의 도약정보를 생성한다면, 누락되거나 오류로 초과 발생된 도약정보가 없음을 판단할 수 있다. 또한, 생성된 도약정보인 시작시간, 유지시간, 그리고 도약주파수에 대한 제안한 기법의 추정 정확도는 RMSE(Root Mean Square Error)를 기준으로 평가하였다.

앞서 기술한 시뮬레이션 환경에서 SNR 10 dB 조건에 따라 생성된 수신신호 중 시간 축에서 0∼200 msec에 해당되는 데이터의 스펙트로그램을 그림 3에 도시하였다.

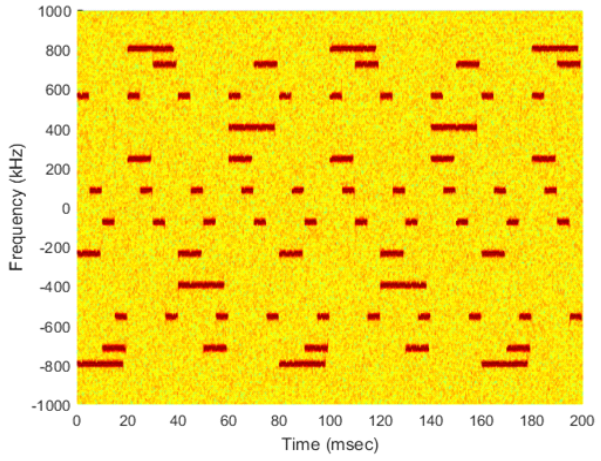

그림 3. SNR 10 dB 조건에서 생성된 수신신호의 스펙트로그램

Fig. 3. Spectrogram of generated receive signal with SNR 10 dB.

이와 함께, 그림 4에는 그림 3의 수신신호에 대해 제안한 도약정보 생성 기법의 도약정보 추정 결과를 시각화하였다. 여기서, 도약정보별로 추정된 시작시간과 유지시간의 종료지점은 원으로 표시하였고, 유지시간에 해당하는 시간 구간은 실선의 길이로 나타내었다. 이러한 그림 3과 4를 통해서 추정된 도약정보가 수신신호에 포함된 각 주파수 도약신호 성분에 대해 시간 및 주파수 축 측면에서 잘 매칭되고 있음을 사전 확인할 수 있다.

다음으로 수신신호의 SNR 조건에 따른 제안한 도약정보 생성 기법의 시뮬레이션 결과를 표 2에 정리하였다.

표 2에서 살펴보면 모든 시뮬레이션 결과에서 신호 생성시간(1 sec) 동안에 각 주파수 도약신호 #1∼#3에 대하여 생성된 도약정보의 수가 기 설정된 각 도약율과 동일하다. 따라서, 제안한 기법은 누락 또는 초과없이 정확한 개수의 도약정보를 생성함을 확인할 수 있다.

한편, 표 2에서 도약정보 중 시작시간과 유지시간에 대한 추정 오차는 수신신호의 SNR에 따른 영향이 거의 없이 유사하다. 시뮬레이션 결과에서 시작시간의 추정 오차는 0.037∼0.04 msec RMSE 범위로써, 해당 오차는 한 심볼의 유지시간인 0.1 msec 이내이다. 한편, 유지시간의 추정오차는 0.053∼0.07 msec RMSE 범위이다. 따라서, 전 시뮬레이션 결과에 걸쳐 주파수 도약신호 #1∼#3의 실제 유지시간에 대한 최대 추정오차의 비율은 각각 약 0.3 %,

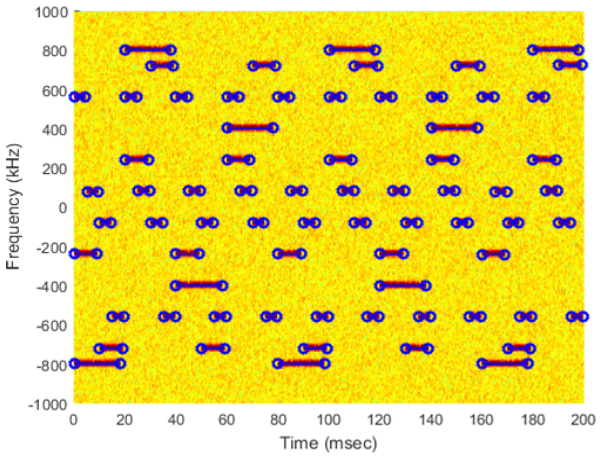

그림 4. 스펙트로그램 상에서 추정된 도약정보 시각화

Fig. 4. Visualization of estimated hopping information in spectrogram.

표 2. 제안한 도약정보 생성 기법의 시뮬레이션 결과
Table 2. Simulation results with the proposed hopping information generation method.

Simulation conditions		Estimation results			
SNR	Frequency hopping signal	Number of generated hopping information	Hopping frequency (kHz RMSE)	Start time (msec RMSE)	Dwell time (msec RMSE)
0 dB	#1	50	3.18	0.039	0.06
	#2	100	3.444	0.037	0.06
	#3	200	3.3	0.037	0.053
5 dB	#1	50	3.085	0.038	0.054
	#2	100	3.12	0.038	0.059
	#3	200	2.503	0.038	0.06
10 dB	#1	50	2.266	0.038	0.059
	#2	100	2.145	0.039	0.066
	#3	200	1.518	0.04	0.07

0.7 %, 1.6 % 수준으로 제안한 기법이 정확한 추정결과를 제공함을 알 수 있다.

반면, 도약정보 중 도약주파수의 추정오차는 수신신호의 SNR이 낮아짐에 따라 열화되는 경향을 보이며, SNR이 0 dB일 때 최대 오차값을 가진다. 한편, Orthogonal FSK 신호에서 인접 심볼 톤(tone) 간의 최소 주파수 차이는 심볼률의 값과 같다[9]. 따라서, 도약주파수의 RMSE 오차를 심볼률과 비교하여, 추정값의 정확도를 평가할 수 있다. 표 2의 SNR 0 dB 결과에서 주파수 도약신호 #1～#3에 대한 도약정보의 도약주파수 추정오차는 설정된 심볼률(10 ksymbols/sec)과 비교하여 각각 약 31.8 %, 34.4 %, 33 % 수준이다. 또한, SNR 10 dB에서는 주파수 도약신호 #1～#3에 대해 각각 22.3 %, 21.5 %, 15.2 %에 해당된다. 따라서, 고려된 SNR 범위에서 제안한 기법으로 추정된 도약주파수를 이용하여, 각 주파수 도약별 신호원을 심볼률 이내의 주파수 정확도로 기저대역 변환을 할 수 있다. 한편, 잔여 주파수 오차는 추가적인 주파수 오프셋 추정[10],[11]을 적용하여 제거함으로써, 추후 세부 분석 또는 복조에 더욱 적합한 I/Q(Inphase and Quadrature) 데이터 생성에 활용할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 무선채널환경에서 확산 스펙트럼 특성으로 저피탐 능력을 가지는 주파수 도약신호에 대해 각 주파수 도약별로 시작시간, 유지시간, 그리고 도약주파수를 포함하는 도약정보를 생성하는 기법을 제안하였다. 제안한 도약정보 생성 기법은 시간에 따른 주파수 도약패턴의 사전 정보를 필요로 하지 않으며, 미상의 주파수 도약신호에 대한 도약정보를 추정할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 기법은 고려된 모든 SNR 조건에서 주파수 도약신호에 대해 탐지 누락 없이 정확한 도약정보 추정 결과를 제공함을 확인할 수 있었다. 따라서, 제안한 도약정보 생성 기법은 미상의 주파수 도약신호에 대한 탐지를 통해 블라인드 제원 분석이 필요한 분야 등에 직접 활용 가능할 것으로 판단된다. 한편, 향후 연구 과제로써 도약시간이 랜덤하게 가변되는 주파수 도약신호에 대해 효율적으로 적용할 수 있는 블라인드 도약정보 생성 방안을 고려할 수 있다.

References

[1] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B. K. Levitt, *Spread Spectrum Communications*, Rockville, MA, Computer Science, 1985.

[2] D. Torrieri, *Principles of Spread-Spectrum Communication Systems*, Heidelberg, Springer, 2005.

[3] D. L. Adamy, *EW 103*: *Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare*, Boston/London, Artech House, 2009.

[4] 주증민, 원종묵, 이철수, 박성경, "다중신호 환경에서 히스토그램 분석을 통한 주파수 도약신호 추출 기법," 한국통신학회 하계종합학술발표회, 2006년 7월, pp. 1515-1518.

[5] 권정아, 이치호, 정의림, "다상 DFT 필터뱅크를 이용한 도약신호 검출에 관한 연구," 한국정보통신학회논문지, 17(4), pp. 789-796, 2013년 4월.

[6] X. Mankun, P. Xijian, L. Tianyun, and X. Mantian, "A new time-frequency spectrogram analysis of FH signals

by image enhancement and mathematical morphology," in *4th International Conference on Image and Graphics (ICIG 2007)*, Sichuan, 2007, pp. 610-615.

[7] J. G. Proakis, D. G. Manolakis, *Digital Siganl Processing: Principles*, *Algorithms*, *and Applications*, Upper Saddle River, Prentice Hall, 1996.

[8] R. G. Lyons, *Understanding Digital Signal Processing*, Upper Saddle River, Pearson, 2011.

[9] B. Sklar, *Digital Communications*: *Fundamentals and Applications*, Upper Saddle River, Prentice Hall, 2001.

[10] H. Wang, O. A. Dobre, C. Li, and R. Inkol, "Joint classification and parameter estimation of M-FSK signals for cognitive radio," in *2012 IEEE International Conference on Communications(ICC)*, Ottawa, ON, Jun. 2012, pp. 1732-1736.

[11] Y. C. Xiao, P. Wei, X. C. Xiao, and H. M. Tai, "Fast and accurate single frequency estimator," *Electronics Letters*, vol. 40, no. 14, pp. 910-911, Jul. 2004.

안 준 일 [국방과학연구소/선임연구원]

2004년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
2006년 2월: 광주과학기술원 기전공학과 (공학석사)
2006년 2월~2007년 2월: 삼성전자 무선사업부 연구원
2012년 8월: 광주과학기술원 정보기전공학부 (공학박사)
2012년 10월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 통신전자전, 적응형 신호처리, 디지털 빔형성

이 치 호 [국방과학연구소/책임연구원]

1996년 2월: 아주대학교 전파공학과 (공학사)
1998년 2월: 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학석사)
2002년 8월: 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)
2002년 9월~2005년 2월: 광주과학기술원 초고속광네트워크연구센터 연구교수
2005년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 전자전, 신호정보, 디지털신호처리

정 운 섭 [국방과학연구소/수석연구원]

1988년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2007년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
1990년 3월~현재: 국방과학연구소 수석연구원
[주 관심분야] 전자전장비 시스템 설계, 레이다 신호 탐지 및 식별