

주파수 도약 대역 확산 신호의 도약 패턴 추정을 위한 시간-주파수 순위 벡터 접근법

전강혁*¹, 최윤철*², 윤동원**

Time-Frequency Rank Vector Approach for FHSS Signal Hop Pattern Estimation

Ganghyuk Jeon*¹, Yooncheol Choi*², and Dongweon Yoon**

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. KRIT-CT-22-021, 우주공간 신호정보 특화연구실)

요 약

주파수 도약 대역 확산(FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum) 시스템은 넓은 주파수 대역에 걸쳐 송신되기 때문에 비협력 상황의 수신기는 송신 신호의 전체 대역을 포착하기 어렵다. 본 논문에서는 비협력 상황에서 FHSS 신호의 부분 대역 신호 관찰만을 통하여, 도약 패턴을 생성하는 PN(Pseudo Noise) 시퀀스를 효과적으로 추정할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법은 시간-주파수 분석으로부터 관찰된 부분 대역의 주파수 도약 패턴에 대한 순위 벡터를 추출한 후, 이를 모든 원시 생성 다항식 후보에서 생성한 PN 시퀀스와 비교하여 유사도가 가장 높은 후보를 선택함으로써 도약 패턴을 생성하는 PN 시퀀스를 추정한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 PN 시퀀스의 정확한 추정을 위한 최소 부분 대역 관찰 조건을 제시하고 추정 성능을 분석한다.

Abstract

Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS) radiates over a wide frequency band, making it difficult for a receiver to capture the entire transmitted spectrum for a non-cooperative context. This paper proposes a algorithm that accurately estimates the Pseudo Noise (PN) sequence generating the hopping pattern using only a partially observed band of an FHSS signal under non-cooperative contexts. The method first extracts a rank vector representing the observed hopping pattern frequencies from a time-frequency analysis, then compares this vector against the PN sequences generated by all candidate primitive polynomials, selecting the one with the highest similarity. Comprehensive computer simulations identify the minimum partial-band observation required for reliable PN sequence estimation and analyze the estimation performance.

Keywords

blind estimation, frequency hopping spread spectrum, partial band, time-frequency analysis, non-cooperative context

* 한양대학교 융합전자공학과 석박사통합과정
- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0001-0776-2687>
- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0000-0365-2133>
** 한양대학교 융합전자공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9631-3500>

• Received: May 09, 2025, Revised: Jun. 17, 2025, Accepted: Jun. 20, 2025
• Corresponding Author: Dongweon Yoon
Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University,
222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea
Tel.: +82-2-2220-0362, Email: dwyoon@hanyang.ac.kr

1. 서 론

대역 확산(Spread spectrum) 통신 시스템은 PN (Pseudo-Noise) 시퀀스 등을 이용해 정보 신호를 넓은 주파수 대역에 걸쳐 확산하여 전송함으로써, 간섭, 재밍, 도청 등 다양한 전파 장애 요소에 강인한 통신 방식으로 여러 응용 분야에서 널리 활용되어 왔다[1]-[5]. 대표적인 대역 확산 방식으로는 직접 시퀀스 대역 확산(DSSS, Direct-Sequence Spread Spectrum), 그리고 주파수 도약 대역 확산(FHSS, Frequency-Hopping Spread Spectrum) 방식 등이 있다.

이중, DSSS는 신호에 고속으로 변화하는 PN 시퀀스를 곱함으로써 신호의 스펙트럼을 의도적으로 넓은 주파수 대역에 걸쳐 확산시킨다. DSSS 신호의 동작은 확산 부호 길이 및 패턴 등 여러 파라미터에 의해 결정되며 이에 따라 통신 파라미터에 대한 사전 정보가 없는 비협력 통신 상황에서 DSSS 신호의 정보를 복원하기 위한 대역 확산 부호 블라인드 추정 연구가 활발히 수행되었다[6]-[12].

한편, FHSS는 PN 시퀀스를 통해 빠르게 주파수를 전환하여 신호를 넓은 주파수 대역에 걸쳐 전송한다. FHSS 신호의 동작은 주파수 도약 패턴의 주기, 도약의 지속 시간, PN 시퀀스의 생성 다항식 등 여러 파라미터에 의해 결정되며, 이를 위해 비협력 상황에서 FHSS 신호의 핵심 파라미터 추정을 위한 다양한 알고리즘이 제안되었다[13]-[16]. 참고 문헌 [13]에서는 이차 시간-주파수 분포와 순간 주파수 및 시간-주파수 모멘트 기법을 결합하여 비협력 상황에서 도약 주파수와 간격을 추출하였으며, [14]에서는 단시간 푸리에 변환과 의사-위너-빌 분포를 통합하여 다수의 FHSS 신호에 대한 도약 지속시간, 중심 시간, 주파수 파라미터를 추정하는 방법이 제안되었다. 또한, [15]에서는 딥러닝 모델을 활용하여 제한된 시간 관찰 창 내에서 미래의 도약 주파수를 예측하는 접근법이 도입되었다. 마지막으로 [16]는 도약 패턴의 주기를 연속적으로 수신할 수 없다는 현실적 제약을 전제로 하여, 한정된 시간 관찰 범위만으로도 PN 시퀀스의 생성 다항식을 복원할 수 있도록 시간-주파수 해상도를 향상한 분석 기법을 제안하였다.

이러한 기존 연구들은 FHSS 신호의 전체 대역에 대한 완전하고 제한 없는 관찰을 전제로 한다. 그러나 넓은 대역에 걸쳐 신호가 전송되는 FHSS의 특성상, 비협력 상황에서 송신 신호의 전체 대역을 동시에 포착하기 어렵다는 한계가 있다[17]. 따라서 이를 극복하기 위해 신호의 부분 대역 관찰만을 이용하여 핵심 파라미터를 추정하는 기법의 개발이 필수적이다.

본 논문에서는 비협력 상황에서 FHSS 신호의 부분 대역만을 이용하여 도약 패턴을 결정하는 PN 시퀀스를 효과적으로 추정할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 먼저 수신 신호에서 전체 도약 패턴의 한 주기를 추출하고, 잡음과 도약 구간을 구분한 후 시간 순으로 정렬하여 제한된 주파수 대역 내에서 도약 패턴을 재구성한다. 이후, 재구성된 도약 패턴과 PN 시퀀스의 결정적 특성을 활용하여 사전에 생성된 후보 시퀀스 중 가장 유사한 후보를 선택함으로써 도약 패턴 생성에 사용된 PN 시퀀스를 추정한다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 정확한 추정을 위한 최소 부분 대역 관찰 조건을 제시한다.

본 논문의 주요 기여는 다음과 같다. 첫째, 비협력 환경에서 FHSS 신호의 전체 대역이 아닌 부분 대역만을 활용하여도 도약 패턴을 정확히 복원할 수 있는 추정 알고리즘을 제안한다. 둘째, 제안 알고리즘의 성능을 보장하기 위해, 필요한 최소 부분 대역 관찰 조건을 제시한다. 이를 통하여 제한된 주파수 관찰 환경 아래에서도 PN 도약 시퀀스 추정의 정확도를 확보할 수 있는 부분 대역 조건을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 FHSS 시스템 모델과 제한된 주파수 관찰 환경에서의 수신 신호를 기술하며, 3장에서는 시간-주파수 분석 기반 도약 패턴 재구성 및 PN 시퀀스 추정 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안 알고리즘의 성능과 최소 부분 대역 관찰 조건을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석하며 5장에서 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 시스템 모델

이 장에서는 이진 주파수 편이 변조(BFSK, Binary Frequency Shift Keying)를 기반으로 동작하는 FHSS 시스템을 정의하고, 수신기의 부분 대역 관찰을 포함한 시스템 모델을 제시한다. 그림 1에는 일반적인 BFSK/FHSS 시스템 구조를 나타내었다.

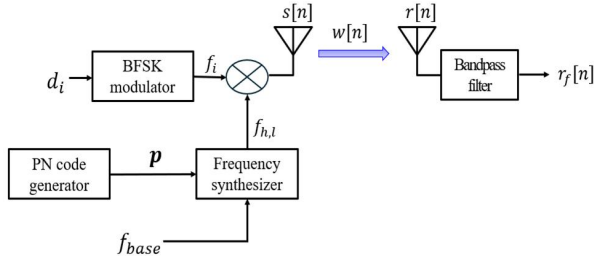


그림 1. BFSK/FHSS 시스템 블록도
Fig. 1. System block diagram of BFSK/FHSS

FHSS 신호는 데이터 비트를 FSK 변조한 후, PN 시퀀스를 기반으로 생성된 주파수 도약 패턴과 결합하여 생성된다[1]. 입력 데이터 비트 $d_i \in \{0,1\}$ 는 BFSK 변조기를 통해 각 비트가 ‘1’일 경우에는 양의 주파수 편이 $+f_s$, ‘0’일 경우에는 음의 주파수 편이 $-f_s$ 이 적용되어 이진 주파수 레벨 f 로, 식 (1)과 같이 변조된다.

$$f_i = (2d_i - 1)f_s \quad (1)$$

한편, 주파수 도약 패턴 $f_{h,l}$ 생성을 위한 PN 시퀀스 p 는 선형 피드백 시프트 레지스터(LFSR, Linear Feedback Shift Register)로부터 식 (2)와 같이 생성된다.

$$p_{k+n} = \sum_{i=0}^{n-1} c_i p_{k+i} \bmod 2 \quad (2)$$

여기서 c_i 는 식 (3)으로 정의되는 생성 다항식 $G(x)$ 의 계수이다.

$$G(x) = 1 + c_1x + \dots + c_{n-1}x^{n-1} + x^n \quad (3)$$

LFSR로부터 생성된 이진 시퀀스 p 는 정수 시퀀스 u_l 로 식 (4)와 같이 변환되며

$$u_l = \sum_{k=0}^{n-1} p_{l+k} 2^k, \quad (4)$$

기준 주파수 f_{base} 와 곱해져 각 도약에 해당하는 주파수로 식 (5)와 같이 매핑된다.

$$f_{h,l} = f_{base} \times u_l \quad (5)$$

이후, BFSK 변조 주파수 f_i 와 도약 주파수 $f_{h,l}$ 를 결합하여 FHSS 송신 신호가 생성된다. 송신 신호 $s[n]$ 의 i 번째 비트에 대응하는 변조 신호 $s_i[n]$ 은 식 (6)과 같이 정의된다.

$$s_i[n] = \cos\{2\pi(f_{h,\{(i \bmod L)+1\}} + f_i)nT_e\} \quad (6)$$

여기서 L 은 도약 시퀀스의 길이를, T_e 는 샘플링 주기를 의미한다. 식 (6)의 $(i \bmod L)+1$ 항은 도약 주파수 시퀀스가 유한한 길이 L 을 가지며 주기적으로 재사용된다는 점을 반영한다.

송신 신호는 가산 백색 가우시안 잡음(AWGN, Additive White Gaussian Noise) 채널을 통해 전송되며, 수신 신호 $r[n]$ 은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$r[n] = s[n] + w[n] \quad (7)$$

실제 수신기에서는 비협력 상황에서 FHSS 신호의 전체 대역폭을 동시에 감시하는 것이 어렵기 때문에, 전체 주파수 대역의 일부인 부분 대역만을 관찰하게 된다. 이러한 현실적인 제약을 반영하기 위해, 수신기의 관찰 특성은 이상적인 대역통과 필터의 임펄스 응답 $h_{ideal}[n]$ 을 통해 모델링되며, 실제 수신 신호는 시간 영역에서 식 (8)과 같이 수신 신호와 필터의 임펄스 응답의 합성곱을 통해 표현된다.

$$r_f[n] = r[n] * h_{ideal}[n] \quad (8)$$

III. 부분 대역 FH 신호의 도약 패턴 추정

이 장에서는 비협력 상황에서 FHSS 신호의 부분 대역만이 관찰 가능할 때 주파수 도약 패턴을 결정하는 PN 시퀀스를 효과적으로 블라인드 추정하는 기법을 제시한다. 그림 2에는 본 논문에서 제시하는 PN 시퀀스 추정 알고리즘의 블록도를 나타내었다.

우선 수신 신호의 시간-주파수 분석을 통하여 주파수 도약 패턴의 한 주기를 추출하고, 잡음과 도약 구간을 구분한 후 제한된 주파수 대역 내에서 도약 패턴을 재구성한다. 이후, 재구성된 도약 패턴과 PN 시퀀스의 결정적 특성을 활용하여 미리 생성된 후보 시퀀스 중 가장 유사한 후보를 선택함으로써 도약 패턴 생성에 사용된 PN 시퀀스를 효과적으로 추정한다.

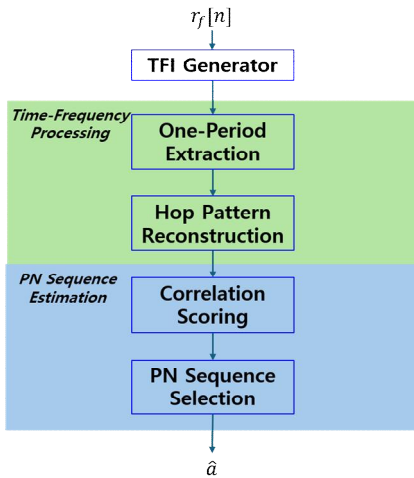


그림 2. 제안 추정 알고리즘 블록도
Fig. 2. Block diagram of the proposed algorithm

3.1 시간-주파수 분석

수신 신호 $r_f[n]$ 은 시간에 따라 중심 주파수가 변화하므로, 이를 시각화하기 위해 시간-주파수 이미지(TFI, Time-Frequency Image) 변환을 이용한다. 본 논문에서는 계산 복잡도가 낮고 실시간 처리가 가능한 스펙트로그램 기반 분석을 TFI로 채택한다. 스펙트로그램은 신호를 부분적으로 중첩된 창으로 나누고, 각 구간에 단시간 푸리에 변환(Short-Time fourier transform)을 적용하여 식 (9)와 같이 생성된다[18].

$$S[u,v] = \left| \sum_{n=uR}^{uR+M-1} r_f[n]g[n-vR] \exp\left(-j\frac{2\pi uk}{M}\right) \right|^2 \quad (9)$$

여기서 $S[u,v]$ 는 $r_f[n]$ 의 스펙트로그램이며, u 와 v 는 각각 시간 인덱스와 주파수 인덱스를 의미한다. $g[n]$ 은 신호의 특정 구간을 분리하는 창함수를, R 은 인접한 창 사이의 중복된 샘플 수이다. 스펙트로그램 상의 고에너지 값은 수신 신호의 순간 주파수를 반영하며, 이를 통해 잡음과 도약 구간을 식별할 수 있다. 그림 3에는 2번의 도약 패턴 주기 동안 수신된 신호의 스펙트로그램을 나타내었는데, 부분 대역 관찰에 의하여 주파수 값이 인접한 도약 패턴만이 관찰되는 것을 알 수 있다.

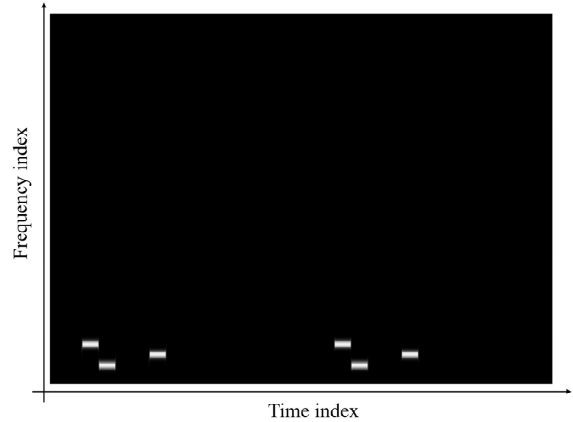


그림 3. 수신된 FHSS 신호의 스펙트로그램
Fig. 3. Spectrogram of received FHSS signal

하나의 도약 주기 내에서 도약이 발생한 시간 구간과 순수 잡음만 존재하는 구간을 구분하기 위해, 전체 관찰 시간을 도약 구간 별로 분할한다. PN 시퀀스 생성 다항식의 차수 n 이 사전에 추정되었다고 가정하면, 대응하는 PN 시퀀스의 전체 길이는 $L=2^n-1$ 로 주어지며, 이에 따라 한 주기의 관찰 시간 구간 O 를 L 개의 블록으로 분할하여 각 도약 영역을 구분할 수 있다. 각 블록의 길이 $\Delta O = O/L$ 에 대하여 각 도약 구간을 정의하는 블록 S_i 는 식 (10)과 같다.

$$S_i = \{(u,v) | u \in \{(i-1)\Delta O, \dots, i\Delta O - 1\}, v \in F\}, \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (10)$$

여기서 F 는 전체 주파수 인덱스 집합을 의미한다. 이후, 각 블록에 대해 모든 스펙트로그램 픽셀 값을 누적하여 벡터 $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_L]$ 를 식 (11)과 같이 정의한다.

$$h_i = \sum_{(u,v) \in S_i} |S[u,v]| \quad (11)$$

잡음 블록과 도약 블록을 구분하기 위해 임계값 $\theta = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L H_i$ 을 기준으로 도약이 관찰된 블록 인덱스 B 를 식 (12)와 같이 정의한다.

$$B = \{i | h_i > \theta\} \quad (12)$$

이후, 도약이 관찰된 각 블록에 대하여 도약 주파수 인덱스를 판별하기 위해, 해당 블록의 시간 인덱스에 따라 스펙트로그램 값을 주파수별로 누적하여 다음과 같이 주변화된 블록 분포 $\bar{S}_i[v]$ 를 식 (13)과 같이 정의한다.

$$\bar{S}_i[v] = \sum_{(u,v) \in S_i} |S[u,v]| \quad (13)$$

도약 주파수 인덱스 f_i 는 시간 축을 따라 주변화된 에너지 분포에서 최대값을 갖는 주파수 인덱스를 식 (14)와 같이 정의된다.

$$f_i = \underset{v}{\operatorname{argmax}} \bar{S}_i[v], \quad i \in B \quad (14)$$

이렇게 추출된 $\{f_i\}_{i \in B}$ 는 부분 대역의 도약 주파수 인덱스를 나타낸다. 이에 따라, 도약이 감지된 구간 내에서 유효한 관찰 벡터 $\mathbf{e} = [e_1, e_2, \dots, e_V]$ 는 식 (15)와 같이 정의된다.

$$e_t = \begin{cases} f_{b_{\min} + t - 1}, & \text{if } b_{\min} + t - 1 \in B \\ \emptyset, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

여기서 도약이 처음으로 감지된 인덱스를 $b_{\min} = \min(B)$, 마지막으로 감지된 인덱스를 $b_{\max} = \max(B)$ 로 표기한다. 또한 벡터의 길이

$V = b_{\max} - b_{\min} + 1$ 이며 \emptyset 는 도약이 감지되지 않은 결측 구간을 나타낸다. 이를 통해 생성한 벡터는 감지된 도약 주파수와 부분대역에 의한 결측 구간을 포함하여 도약 시퀀스의 시간 구조를 온전히 보존한다.

다음으로, 식 (13)의 관찰 시퀀스 벡터 \mathbf{e} 를 도약 간의 상대적 순서를 반영한 순위 벡터 \mathbf{e}^{rank} 를 식 (16)과 같이 정의한다.

$$e_t^{\text{rank}} = 1 + |\{j | j \in B, e_{j - b_{\min} + 1} < e_t\}|, \quad e_t \neq \emptyset \quad (16)$$

이 벡터는 도약 간의 상승 및 하강 흐름을 유지하면서도, 결측 구간의 도약 위치를 함께 구현한다. 그림 4에는 $n=4$ 의 생성 다항식을 기반으로 생성된 FHSS 스펙트로그램의 시간-주파수 분석을 나타내었다. 한 주기를 균등하게 각 도약 영역으로 분할한 후, 도약이 관찰된 영역과 결측 영역을 구분하고 첫 도약과 마지막 도약 사이의 상대적 도약 주파수 값과 결측값을 포함한 순위 벡터 $\mathbf{e}^{\text{rank}} = [3, 1, \emptyset, \emptyset, 2]$ 로 도출된다.

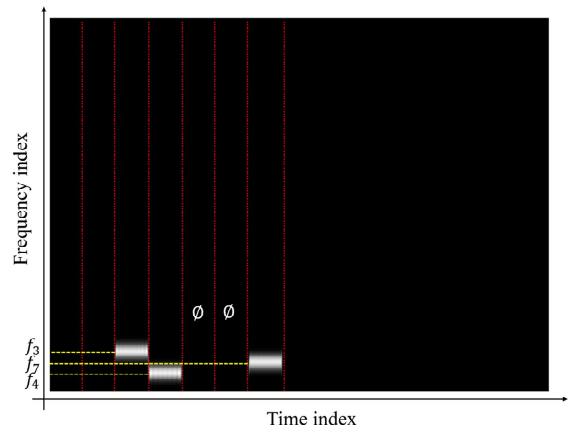


그림 4. 스펙트로그램의 도약 패턴
Fig. 4. Hop pattern of spectrogram

3.2 PN 시퀀스 추정

순위 벡터 \mathbf{e}^{rank} 로부터 FHSS 신호의 도약 패턴을 결정하는 PN 시퀀스를 추정하기 위해, 우선 가능한 모든 n 차 원시 생성 다항식을 기반으로 후보 시퀀스 집합 $A = \{\mathbf{a}^1, \mathbf{a}^2, \dots, \mathbf{a}^M\}$ 를 구성한다. M 은 가능한 다항식의 수를 의미하며 각 후보 시퀀스 $\mathbf{a}^i = [a_1^i, a_2^i, \dots, a_L^i]$ 는 원시 다항식으로부터 생성된

PN 시퀀스를 식 (4)의 정수 시퀀스 u_i 과 동일한 방식으로 변환하여 형성된다.

이때 FHSS 신호의 도약 시퀀스와 대응되는 후보 시퀀스가 순위 벡터 e^{rank} 와 가장 높은 정합도를 가질 것으로 추측할 수 있다. 이에 따라 각 후보 시퀀스 a^i 와 순위 벡터 e^{rank} 를 슬라이딩 윈도우 방식으로 정렬 위치를 이동시키며 유사도를 계산하고, 가장 높은 유사도를 가지는 후보를 올바른 PN 시퀀스로 결정한다.

슬라이딩 윈도우의 시작 인덱스를 나타내는 $k \in \{0, 1, \dots, L-1\}$ 는 유효 구간이 후보 시퀀스 내에서 위치할 수 있는 가능한 모든 정렬 위치를 의미하며, 이에 따라 후보의 부분 시퀀스 $a^i(k)$ 는 식 (17)과 같이 정의된다.

$$a^i(k) = [a_{k \bmod L}^i, a_{(k+2) \bmod L}^i, \dots, a_{(k+V-1) \bmod L}^i] \quad (17)$$

한편, e^{rank} 는 결측값을 포함하므로, 유효한 도약만을 반영하기 위해 유효 인덱스 집합 T 를 식 (18)과 같이 정의한다.

$$T = \{t \in \{1, 2, \dots, V\} | e_t^{rank} \neq \emptyset\} \quad (18)$$

이후 이 두 벡터 간의 정합도는 식 (19)와 같이 계산된다.

$$Score(a^i(k)) = \sum f(e_t^{rank}, a_{k+t}^i) \quad (19)$$

여기서 f 는 유사도 계산 함수로, 상관 계수, 코사인 유사도, 최소 제곱 오차 등이 사용될 수 있다. 이후 각 후보 시퀀스 a^i 에 대해 모든 가능한 정렬 위치 k 에 대한 점수 중 정합도가 가장 높은 후보 시퀀스를 선택하여 식 (20)과 같이 PN 시퀀스를 추정한다.

$$(\alpha, \beta) = \arg \max_{(i, k)} Score(a^i(k)) \quad (20)$$

$$\hat{a} = a^\alpha$$

이와 같은 과정은 부분 대역 관찰 하에서의 결측

을 효과적으로 보완하며, 도약 패턴과 후보 시퀀스 간의 유사성을 기반으로 도약 패턴을 결정하는 PN 시퀀스 추정을 가능하게 한다.

IV. 모의실험 및 성능분석

이 장에서는 제안된 추정 기법의 성능을 모의실험을 통해 평가한다. 모의실험은 전체 주파수 대역 중 일부만을 관찰하는 부분대역 조건에서 진행되며, 관찰 가능한 대역폭에 따른 추정 성능의 변화를 확인하고 정확한 추정을 위한 최소 관찰 대역폭을 도출한다.

모의실험에서는 생성 다항식의 차수 n 의 범위를 3부터 12까지 범위로 설정하였으며, 수신기의 샘플링 주파수는 $f_s = 8kHz$, 신호 지속시간은 10초로 설정하였다. 도약의 대역폭은 100Hz에서 900Hz로 설정하였으며, 이중 부분대역 관찰을 위한 주파수 하한값 $f_{low} = 80Hz$ 는 고정된 상태에서 상한값 f_{high} 을 전체 대역폭의 $P\%$ 를 차지하도록 조정하였다.

그림 5에는 제안된 기법의 PN 시퀀스 차수 변화에 따른 정확한 추정을 위한 최소 부분대역 비율을 도시하였다. 그림 5의 결과는 다항식의 차수 n 이 증가함에 따라 시퀀스 추정에 필요한 부분대역 관찰 비율 P 가 급격히 감소함을 명확히 보여준다. 구체적으로, $n=3$ 일 때는 전체 대역폭의 약 42.9%를 관찰해야 100%의 정확한 추정 성공률을 달성했으나, $n=5$ 에서는 관찰 비율이 12.9%로 크게 낮아진다. 6에서 8까지는 각각 6.4%, 3.9%, 2.0% 수준으로 요구 대역폭이 절반가량 줄어들었고, 그 이상의 고위 차수에서는 1% 미만의 관찰 비율만으로도 안정적인 추정이 가능함을 확인할 수 있다.

이를 바탕으로 P 와 n 의 관계를 판정하기 위해 선형 회귀 분석을 수행하였다. $\log_2 P$ 대 n 의 선형 회귀 분석 결과, $\log_2 P = -0.904 * n + 8.121$ 로 $\log_2 P$ 와 n 사이에 음의 상관 관계가 관찰되었으며, 기울기가 -1에 근접한다. 이는 $P \propto 2^{-n}$ 형태의 지수적 감소를 의미하여, 차수가 하나 증가할 때마다 대략 절반으로 줄어든다는 사실을 시사한다. 이러한 지수적 감소 특성은 PN 시퀀스 차수가 커질수록 도약 패턴의 길이가 기하급수적으로 증가하기 때문에, 관찰

가능한 대역이 매우 협소하더라도 충분한 패턴 일치 정보를 확보할 수 있음을 보여준다.

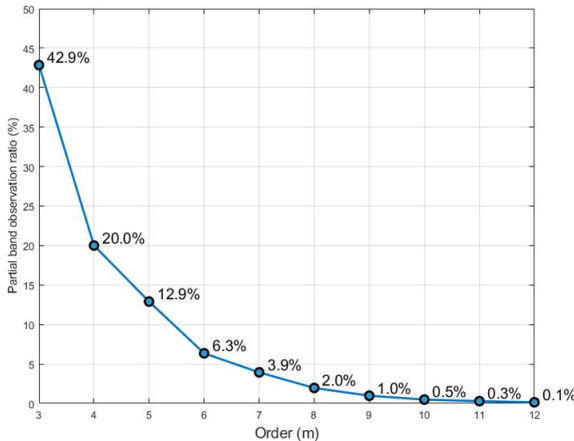


그림 5. 필요 최소 부분대역 비율
Fig. 5. Minimum required partial band ratio

표 1에는 PN 시퀀스 생성 다항식의 차수 변화에 따른 정확한 추정을 위한 최소 도약 관찰 개수 N_{min} 을 표기하였다. 표 1로부터 저차수 구간에서는 $N_{min} \approx n$ 인 반면, 고차수로 갈수록 $N \approx n/2$ 의 관계를 가짐을 알 수 있다. 이러한 선형적 패턴은 앞서 살펴본 부분대역 관찰 비율과 맞물려, 전체 대역폭을 상징하는 도약 패턴 길이 L 이 2의 거듭제곱에 따라 기하급수적으로 커지는 것에 비해 N_{min} 는 선형적으로 증가하기 때문에 P 가 2^{-n} 형태로 급격히 감소하는 것으로 분석된다. 즉, LFSR 차수가 하나 증가할 때마다 전체 시퀀스 길이는 두 배로 늘어나지만, 최소 관찰해야 할 도약 수는 한두 개만 늘어나므로 부분대역 비율은 지수적으로 감소한다.

표 1. 필요 최소 관찰 도약 개수
Table 1. Minimum required partial band observation

Order (n)	Minimum hop observation (N_{min})
3	3
4	3
5	4
6	4
7	5
8	5
9	5
10	5
11	6
12	6

이 같은 분석은 두 가지 실용적 시사점을 제공한다. 첫째, 생성 다항식의 차수 n 이 작은 경우 정확한 추정을 위해 $N_{min} \approx n$ 만큼 충분한 도약 구간을 포함해야 한다.

반면에 고차수 환경으로 갈수록 신호의 대역폭이 증가하지만 추정에 필요한 도약 구간은 지수적으로 감소하므로 적은 관찰만으로 안정적인 추정이 가능해진다. 결과적으로, 제한된 추정 알고리즘을 사용할 경우, 생성 다항식의 차수를 높일수록 관찰 부분대역 요구치는 극적으로 완화되므로, 비협력 수신기 설계 시 목표 차수에 맞춰 하드웨어 필터 대역폭과 처리 자원을 크게 줄일 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 비협력 상황에서 FHSS 신호의 부분 대역만을 이용하여 도약 패턴을 결정하는 PN 시퀀스를 효과적으로 추정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이를 위해 수신 신호에서 전체 도약 패턴의 한 주기를 추출하고, 잡음과 유의미한 도약을 구분한 후 시간순으로 정렬하여 제한된 주파수 대역 내에서 도약 패턴을 재구성하였다. 이후, 재구성된 도약 패턴과 PN 시퀀스의 결정적 특성을 활용하여 후보 시퀀스 중 가장 유사한 후보를 선택함으로써 도약 패턴 생성에 사용된 PN 시퀀스를 추정하였다. 컴퓨터 모의실험을 통해 제안하는 PN 시퀀스 추정 알고리즘이 정확한 추정을 위해 요구하는 최소 주파수 대역의 관찰 범위를 분석하였으며, 부분 대역만으로도 도약 패턴을 정확히 복원할 수 있음을 입증하고, 제한된 관찰 대역 환경에서도 높은 추정 성능을 보장하기 위한 최소 대역폭을 제시하였다. 향후에는 보다 경량화된 알고리즘을 통해 실시간 적용 가능성을 높이는 연구가 필요할 것이다.

References

[1] B. Sklar, "Spread-Spectrum Techniques", Digital Communications: Fundamentals and Applications, Prentice-Hall, pp. 741-823, Feb. 2020.
[2] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B.

- K. Levitt, "A Spread-Spectrum Overview", Spread Spectrum Communications Handbook, McGraw-Hill, pp. 3-40, Apr. 1994.
- [3] R. L. Peterson, D. E. Borth, and R. E. Ziemer, "Introduction to Spread Spectrum Systems", An Introduction to Spread-Spectrum Communications, Prentice-Hall, pp. 47-89, Mar. 1995.
- [4] I. Jee, "A study on the bandwidth efficiency of MC-CDMA system", International Journal of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 21, No. 6, pp.43-48, Dec. 2021. <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.6.43>.
- [5] S. Jung and B. Park, "Development of anti-drone in Korea at the center of drone war", International Journal of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 24, No. 3, pp.163-169, Jun. 2024. <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.3.163>.
- [6] G. Burel and C. Boudier, "Blind estimation of the pseudo-random sequence of a direct sequence spread spectrum signal", Proc. MIL COM 21st Century Mil. Commun. Archit. Technol. Inf. Superiority, Los Angeles, CA, USA, pp. 967-970, Oct. 2000. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2000.904074>.
- [7] D. Kim, Y. Jang, and D. Yoon, "Blind estimation of spreading code using inherent linear relation in non-cooperative contexts", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 61, No. 4, pp. 10904-10912, Aug. 2025. <https://doi.org/10.1109/TAES.2025.3551684>.
- [8] Y. Choi, D. Kim, M. Jang, and D. Yoon, "Spreading sequence blind estimation in DSSS system using gradient ascent method", Proc. Int. Telecommun. Netw. Appl. Conf., Melbourne, Australia, pp. 76-79, Dec. 2023. <https://doi.org/10.1109/ITNAC59571.2023.10368541>.
- [9] C. Boudier, S. Azou, and G. Burel, "Performance analysis of a spreading sequence estimator for spread spectrum transmissions", J. Franklin Inst., Vol. 341, No. 7, pp. 595-614, Nov. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2004.07.006>.
- [10] D. Kim, Y. Choi, and D. Yoon, "Blind estimation of a scrambler in Long-code direct sequence spread spectrum systems", Proc. Int. Conf. Service Oper. Logist. Informat., Singapore, pp. 1-6, Dec. 2023. <https://doi.org/10.1109/SOLI60636.2023.10425498>.
- [11] D. Kim, J. Song, and D. Yoon, "On the estimation of synchronous scramblers in direct sequence spread spectrum systems", IEEE Access, Vol. 8, pp. 166450-166459, Sep. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3023425>.
- [12] Y. Choi, D. Kim, and D. Yoon, "Deep learning-based blind estimation for the number of users in multi-user DSSS systems", Proc. Int. Conf. Signal Process. Commun. Syst., Surfers Paradise, Australia, pp. 1-4, Dec. 2024. <https://doi.org/10.1109/ICSPCS63175.2024.10815845>.
- [13] A. Kanaa and A. Z. Shaameri, "A robust parameter estimation of FHSS signals using time frequency analysis in a non-cooperative environment", Phys. Commun., Vol. 26, pp. 9-20, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2017.10.013>.
- [14] D. Zhang, Y. Shang, X. Liang, and J. Lin., "Efficient blind estimation of parameters for multiple frequency hopping signals via single channel", Proc. Int. Conf. Autom. Electron. Electr. Eng., Shenyang, China, pp. 1063-1069, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1109/AUTEEE56487.2022.9994298>.
- [15] P. Thiele, L. Bernadó, D. L'oschenbrand, B. Rainer, C. Sulzbachner, M. Leitner, and T. Zemen, "Machine learning based prediction of frequency hopping spread spectrum signals", Proc. Annu. Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun., Toronto, ON, Canada, pp. 1-6, Sep. 2023. <https://doi.org/10.1109/PIMRC56721.2023.10293939>.
- [16] G. Jeon, Y. Choi, and D. Yoon, "Blind estimation for the generation polynomial of FHSS signals using time frequency analysis", Proc. Int. Conf. Inf. Netw., ChiangMai, Thailand, pp. 1-5, Jan. 2025. <https://doi.org/10.1109/ICOIN63865.2025.10993178>.
- [17] B. Levitt, M. Simon, A. Polydoros, and U. Cheng, "Partial-band detection of frequency-hopped signals", Proc. IEEE Global Telecommun. Conf.,

Houston, TX, USA, Vol. 4, pp. 70-76, Aug. 2002.
<https://doi.org/10.1109/GLOCOM.1993.318431>.

- [18] E. G. Strangas, S. Aviyente, and S. S. H. Zaidi, "Time-frequency analysis for efficient fault diagnosis and failure prognosis for interior permanent-magnet AC motors", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, No. 12, pp. 4191-4199, Dec. 2008. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2007529>.

저자소개

전 강 혁 (Ganghyuk Jeon)



2023년 2월 : 한양대학교
융합전자공학부(공학사)
2023년 3월 ~ 현재 : 한양대학교
융합전자공학부 석박사통합과정
관심분야 : 무선 및 이동통신
시스템, 머신러닝, 신호정보

최 윤 철 (Yooncheol Choi)



2022년 2월 : 한양대학교
융합전자공학부(공학사)
2022년 3월 ~ 현재 : 한양대학교
융합전자공학부 석박사통합과정
관심분야 : 무선 및 이동통신
시스템, 머신러닝, 신호정보

윤 동 원 (Dongweon Yoon)



1989년 2월 : 한양대학교
전자통신공학과(공학사)
1992년 2월 : 한양대학교
전자통신공학과(공학석사)
1995년 8월 : 한양대학교
전자통신공학과(공학박사)
1995년 3월 ~ 1997년 8월 :

동서대학교 조교수

1997년 9월 ~ 2004년 2월 : 대전대학교 부교수

2004년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 융합전자공학부
석학교수

관심분야 : 통신이론, 위성 및 우주통신, 추정 및 검출