JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 17, No. 9 : 1986~1995, Sep. 2013

퍼지 알고리즘을 이용한 전자정보의 펄스 내 변조 인식

김영민*

ELINT Intra-pulse Modulation Recognition using Fuzzy Algorithm

Young-min Kim*

Agency for Defense Development, Yuseong PO.Box 35, Daejeon, 305-600, Korea

요 약

수집된 전자 정보 신호를 분석하여 활동 중인 레이더를 식별하는 ELINT 시스템은 현대 전자전에서 매우 중요한 역할을 담당한다. 수집된 신호로부터 추출할 수 있는 여러 레이더 운용 변수 중 펄스 내 변조 방식은 점점 고도화되는 레이더의 식별에 필수적인 정보이다. 본 논문은 퍼지 알고리즘을 이용하여 수집 신호에 적용된 펄스 내 변조 방식을 인식하는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 신호를 특징짓기 위한 퍼지 멤버십 함수와 이를 이용하여 적용된 변조 방식을 추론하기 위한 퍼지 추론 규칙을 정의한다. 실험 결과는 제안된 기법이 SNR 10dB 이상의 수집 환경 하에서 95% 이상의 변조 방식 인식률을 보장함을 보인다.

ABSTRACT

The ELINT system which derives intelligence from electromagnetic radiations plays an important role in modern electric warfares. Among radar characteristics inferred from the signals, intra-pulse modulation scheme is a useful feature to identify modern radars. This paper proposes the method to classify intra-pulse modulation schemes such as UM, PSK, BFSK, QFSK, LFM and NLFM based on the fuzzy algorithm. The proposed method defines fuzzy membership functions to characterize input signals, and then it calculates accordance rates for each modulation scheme with fuzzy inference rules. The experimental results show that the probability of correct recognition is more than 95% for SNR > 10dB.

키워드 : ELINT, 레이더 신호, 펄스 내 변조

Key word : ELINT, Radar Signals, Intra-pulse Modulation

접수일자 : 2013. 07. 17 심사완료일자 : 2013. 08. 24 게재확정일자 : 2013. 09. 06

* **Corresponding Author** Young-min Kim(E-mail:ymkim1019@add.re.kr, Tel:+82-42-821-2780)
Agency for Defense Development, Yuseong PO.Box 35, Daejeon, 305-600, Korea

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.9.1986 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

레이더는 전쟁 시 적의 타격 감지 또는 미사일의 목표물 추적을 가능하게 하는 현재 전쟁의 필수 장비이다. 레이더에 사용되는 기술이 고도화되고 레이더의 분포가 조밀해짐에 따라 방사된 전자 신호의 특징을 분석하여 활동 중인 레이더를 식별하는 ELINT (Electronics Intelligence) 시스템의 중요성은 점점 커지고 있다.

초기 ELINT 시스템은 수집된 전자 신호로부터 추출한 주파수, 펄스폭, 펄스반복주기, 위치 등의 기본적인 운용 변수들을 통해 레이더를 식별하였으나 신호의 피탐 율을 감소시키기 위한 펄스 압축 및 변조 등의 기법들이 레이더에 적용됨에 따라 기존 식별 변수만으로는 레이더 식별 과정에서 모호성이 발생하기 쉽다. 반면 디지털 수신기 및 고감도의 신호 수신 안테나를 사용하는 ELINT 시스템의 개발은 신호 포락선의 형태 및 펄스 내부에 적용된 변조 기법 분석을 가능하게 하였으며 이러한 정보는 레이더를 식별하고 그 용도를 파악하는데 유용하게 사용된다.

일반적으로 변조 기법 인식 알고리즘은 수집된 신호로부터 변조 형태를 특징짓는 인자를 추출하는 과정과 이를 분류기의 입력으로 전달하여 적용된 변조 기법을 추론하는 과정으로 이루어진다. 추출된 특징인자들을 분류할 수 있는 분류기로는 의사결정트리 [1, 2], 최소거리분류기(Min Distance Classifier : MDC) [3], Support Vector Machines (SVM) [4, 5], 인공신경망 [6, 7] 등의 기법이 주로 사용된다. SVM과 인공신경망 기법은 예측력이 뛰어난 장점이 있으나 구현이 복잡하고 지속적인 학습에 따라 수행속도가 느리다는 단점이 있다. 반면 의사결정트리와 MDC는 구현이 간단하며 수행속도가 빠르다는 장점이 있다. 그러나 의사 결정 트리는 상위 노드에 위치한 결정 인자의 임계치 설정에 따라 분류기의 성능이 크게 좌우되며 MDC는 클러스터의 평균값을 이용하기 때문에 데이터의 분산이 큰 경우에는 적용이 어렵다는 단점이 있다.

기 구현된 ELINT 시스템의 자동 신호 식별 기능의 문제점 중 하나는 알고리즘을 통해 분석된 신호의 제원이 얼마의 신뢰도를 갖는지 평가하기 어렵다는 것이다. 만약 분석 결과의 신뢰도를 수치화 할 수 있다면 시스템 운용자에 의해 정의된 임계치 이하의 신뢰도를 갖는 신호 분석 결과에 대해 전문가에 의한 정밀한 수동 분석을 유도할 수 있고 이는 더욱 가치 있는 전자 정보의 생산을 가능하게 한다.

본 논문은 퍼지 알고리즘을 이용하여 무변조 (UM: Un-modulated) 신호 및 위상천이변조 (PSK: Phase Shift Keying), 2진 주파수천이변조 (BFSK: Binary Frequency Shift Keying), 4진 주파수천이변조 (QFSK: Quadrature Frequency Shift Keying), 선형주파수변조 (LFM: Linear Frequency Modulation), 비선형주파수변조 (NLFM: Non-Linear Frequency Modulation) 기법이 적용된 신호를 식별하는 기법을 제안한다. 식별에 이용되는 특징 인자의 선정은 다양한 변수를 갖는 모의 신호의 생성 및 분석을 통해 이루어졌으며 각 특징인자에 대한 입력 신호 측정값의 크고 작음을 확률적으로 평가하기 위한 퍼지 멤버십 함수가 정의되었다. 퍼지 멤버십 함수를 조합하여 각 변조 방식마다 정의된 퍼지 추론 규칙은 가장 진릿값이 높은 변조 방식을 추론하는데 사용된다. 변조 방식별로 계산된 진릿값의 상대적 크기는 최댓값을 갖는 변조 방식의 신뢰도 평가에 사용된다. 계산된 식별 결과의 신뢰도는 값이 크지 않을 경우 전문가에 의한 수동 분석을 요구하는 등의 방법으로 활용될 수 있다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 다양한 모의 신호의 분석을 통해 펄스 내 변조 방식을 구분하기 위한 특징 인자를 선정하고 특징 인자의 인자 값을 평가하기 위한 퍼지 멤버십 함수를 정의한다. 또한 정의된 멤버십 함수를 이용하여 변조 기법을 추론하는 퍼지 추론 규칙을 기술한다. 3장에서는 모의 신호를 활용하여 신호 수집 환경의 변화가 제안된 기법의 펄스 내 변조 기법 분류 성능에 미치는 영향을 검증하고 마지막으로 4장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 본 론

2.1. 펄스 내 변조 방식

본 절에서는 본 논문에서 다루는 펄스 내 변조 방식에 대해 기술한다.

2.1.1. 무변조 신호 (Un-Modulated: UM)

UM 신호는 변조 기법이 적용되지 않은 신호로서 반송 주파수 f_c를 갖는 사인 형태를 나타낸다. 무변조 신

호는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t), 0 \le t \le T_{PW} \quad (1)$$

여기서 A_c는 신호의 진폭, f_c는 반송 주파수, T_{PW}는 펄스가 전송되는 구간을 의미한다. 그림 1은 f_c가 10MHz인 UM 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 UM 신호는 노이즈에 의해 약간의 주파수 오프셋이 발생하지만 대체로 주파수가 반송주파수 f_c 주변에 좁게 분포 되어있는 것을 확인할 수 있다.

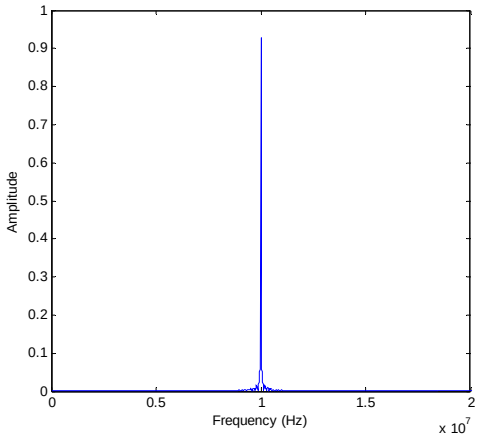


그림 1. UM 신호의 주파수 스펙트럼
Fig. 1 Frequency Spectrum of UM

2.1.2. 위상 편이 변조 신호 (Phase Shift Keying: PSK)

일반적인 PSK 신호는 식(2)와 같이 일정 주파수, 일정 진폭의 반송파 위상을 M등분으로 나누어 송신한다.

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \theta_i), 0 \le t \le T_s \quad (2)$$

여기서 T_s는 한 개의 심벌이 지속되는 시간을 나타내며, M개의 위상은 다음과 같다.

$$\theta_i = 0, \frac{2\pi}{M}, \ldots, \frac{2(M-1)\pi}{M} \quad (3)$$

좀 더 복잡한 위상 편이 변조 기법은 위상의 변조를 Barker, Taylor 코드 등의 정의된 시퀀스에 따라 수행한다. 그림 2는 길이가 13인 Taylor 코드가 적용되었고 M이 4인 PSK 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 위상에 대한 변조만 수행했기 때문에 주파수가 반송주파수 f_c를 중심으로 분포하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 위상의 천이에 따라 주파수 성분이 변하기 때문에 UM 신호보다는 넓은 주파수 대역폭을 갖는 것을 확인할 수 있다.

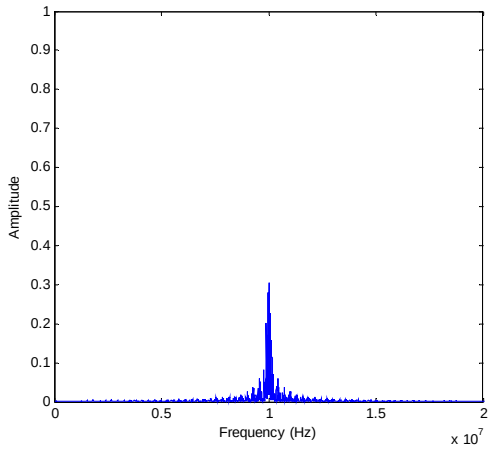


그림 2. PSK 신호의 주파수 스펙트럼
Fig. 2 Frequency Spectrum of PSK

2.1.3. 주파수 편이 변조 신호 (Frequency Shift Keying : FSK)

FSK 신호는 주파수가 시간에 따라 천이하는 변조 형태이며 아래와 같이 표현된다.

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_i t), 0 \le t \le T_s \quad (4)$$

여기서 T_s는 한 개의 심벌이 지속되는 시간을 나타내며, f_i는 식(5)와 같이 정의된 M개의 주파수 값이다.

$$f_i = f_1, f_2, \ldots, f_M \quad (5)$$

FSK 신호에서 사용되는 주파수 천이 값 M은주파수 도메인에서 관찰할 수 있는 주파수 그룹의 수와 일치한다. QFSK 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸 그림 3에서 4개의 f_i를 중심으로 형성된 각각의 주파수 그룹을 확인할 수 있다.

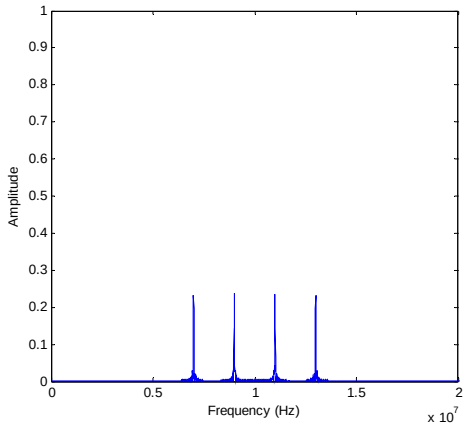


그림 3. QFSK 신호의 주파수 스펙트럼
Fig. 3 Frequency Spectrum of QFSK

2.1.4. 주파수 변조 신호 (Frequency Modulation : FM)

FM 신호는 신호의 순시 주파수가 시간에 따라 동적으로 변하는 형태를 나타내며 주파수 변화의 선형성에 따라 선형 주파수 변조 (Linear FM : LFM)과 비선형 주파수 변조 (Non-Linear FM : NLFM) 신호로 구분된다.

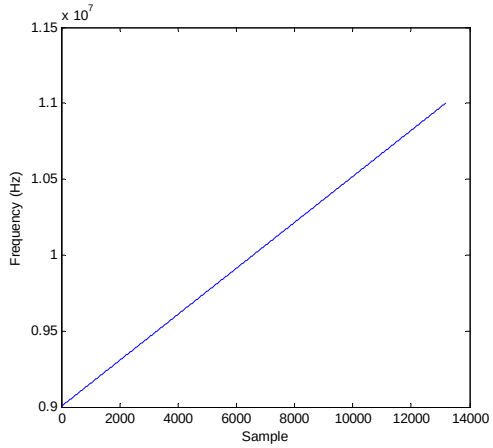


그림 4. LFM 신호(Chirp-up)의 순시 주파수
Fig. 4 Instantaneous frequency of LFM (Chirp-up)

주파수 값의 선형 변화는 증가 (Chirp-up), 감소 (Chirp-down) 또는 삼각형 (Triangle) 형태를 보이며 그림 4는 Chirp-up 형태의 LFM신호를 나타낸다. 반면 NLFM 신호는 그림 5에서 확인할 수 있듯이 비선형의 주파수의 증감 형태를 보인다. 주파수의 비선형 증감은 주로 사인, 2차 다항식 또는 3차 다항식의 형태로 이루어진다. FM 신호는 일정 범위의 주파수 대역을 스윕(sweep)하기 때문에 주파수 스펙트럼에서 다른 종류의 변조 신호에 비해 넓은 신호 대역폭을 보인다.

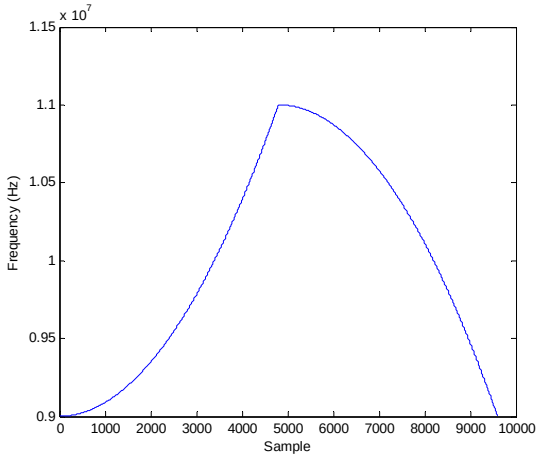


그림 5. NLFM 신호(2차 다항식)의 순시 주파수
Fig. 5 Instantaneous frequency of NLFM (2nd order polynomial)

2.2. 변조 기법 식별 특징 인자

분별력 있는 특징 인자의 선정은 변조 기법 식별 알고리즘의 성능을 좌우한다. 올바른 특징 인자의 선정을 위해 본 논문에서는 실제 수집된 레이더 신호의 특성을 바탕으로 MATLAB 시뮬레이션 코드를 통해 모의 신호를 생성하였다. 모의 신호 생성 시 실제 신호 수집 환경을 고려하여 10dB의 백색잡음 필터를 적용하였으며, 5ns에서 200ns 사이의 펄스폭을 갖는 총 8840개의 모의 신호가 특징 인자 선정에 사용되었다. 모의 신호는 순시 주파수, 신호 포락선, 상성도, 주파수 스펙트럼 등의 분석을 위한 데이터로 변환되며 여기에 다양한 통계적 방법을 적용함으로써 변조 기법을 식별할 수 있는 특징 인자 선정이 가능하다. 본 논문에서는 다양한 데이터 분석 결과 중 주파수 분포 그룹의 수, 순시 주파수의 표준 편차, 순시 주파수 절댓값의 표준 편차, 순시 주파수 변화의 선형성을 분별력이 있는 특징 인자로 선정하여 소개한다. 표 1은 특징 인자 선정을 위한 모의 신호 생성에 이용된 신호 제원의 범위를 나타낸다. 표에서 확인할 수 있듯이 변조기법별로 다양한 세부 파라미터가 적용되었다.

표 1. 모의 신호 제원
Table. 1 Simulated signal parameters

변조 기법	세부 변수	
BFSK QFSK	$\triangle f$(MHz)	5 ~ 10 MHz
PSK	BPSK 순차코드	Barker, Random
	QPSK 순차코드	Taylor, Random
LFM	$\triangle f$(MHz)	5 ~ 40 MHz
	형태	Chirp-up, Chirp-down, Triangle
NLFM	$\triangle f$(MHz)	5 ~ 40 MHz
	형태	2차, 3차, 사인

2.2.1. 주파수 분포 그룹의 수

그림 3에서 확인할 수 있듯이 FSK 처럼 주파수의 분포가 그룹화 되어 있는 변조 기법에서는 주파수 그룹의 수가 식별의 중요 인자로 활용될 수 있다. 그룹의 수는 주파수 스펙트럼에서 임계치를 넘는 꼭짓점의 수를 검출함으로써 계산이 가능하다. 본 논문에서는 주파수의 평균값을 임계치로 이용하는 방법을 적용하였다.

2.2.2. 순시 주파수의 표준 편차

순시 주파수의 표준 편차는 주파수 분포의 집중 정도를 평가하는 인자이다. 그림 6은 각 변조기법에서 관찰할 수 있는 순시 주파수의 표준편차를 나타낸다. 표준편차를 계산하기 전 노이즈의 영향을 최소화하기 위해 중간값 필터를 적용하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 순시 주파수의 표준편차는 주파수 성분이 반송 주파수에 몰려있는 UM, PSK 신호와 주파수 성분의 변화 범위가 넓은 FSK 및 FM 계열의 신호를 구분하는 인자로 사용이 가능하다. 그러나 순시 주파수에 중간값 필터를 적용했기 때문에 UM과 PSK 신호의 미세한 구분에는 어려움이 있다. 반면 중간값 필터를 미적용한 그림 7에서는 UM 신호와 PSK 신호가 명확히 구분되는 것을 알 수 있다. 이는 그림 6에서는 중간값 필터를 적용하였기 때문에 PSK 신호의 위상이 변경되는 부분에서 발생하는 주파수의 첨두가 제거된 반면, 그림 7에서는 주파수의 첨두가 그대로 반영되어 UM 신호에 비해 큰 표준 편차 값을 보이기 때문이다.

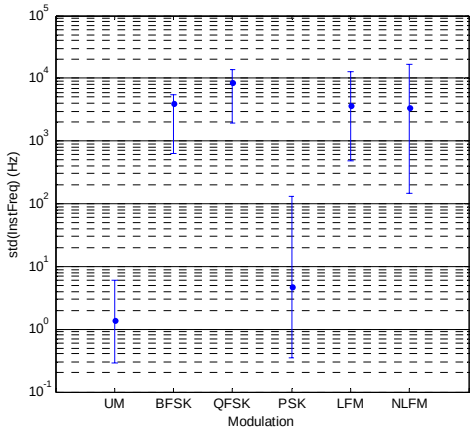


그림 6. 변조 기법 별 순시 주파수의 표준 편차 (중간값 필터 적용)
Fig. 6 Standard deviation of frequency for each modulation scheme (Median filter is applied)

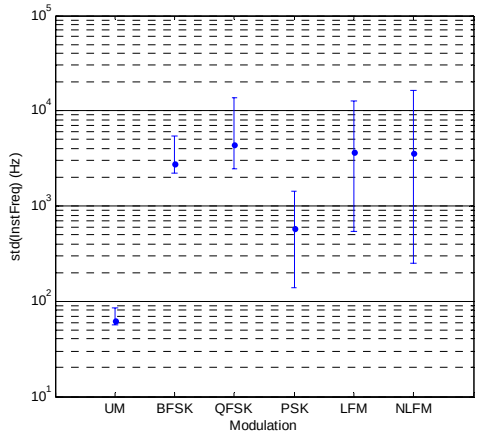
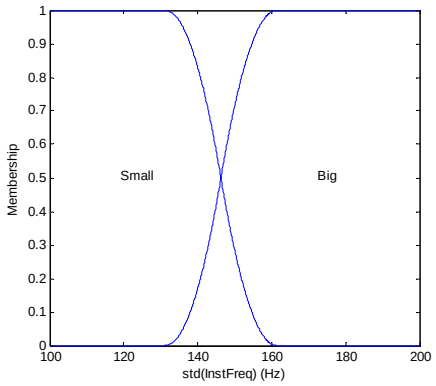
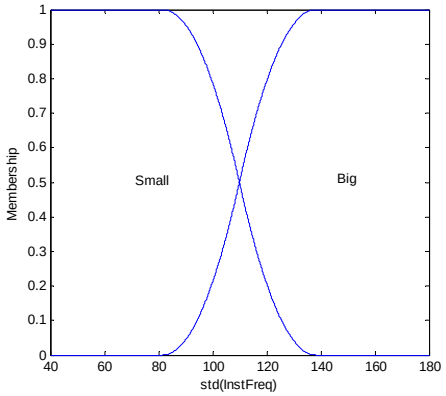


그림 7. 변조 기법 별 순시 주파수의 표준 편차 (중간값 필터 미적용)
Fig. 7 Standard deviation of frequency for each modulation scheme (Median filter is not applied)

수집된 신호의 순시 주파수 표준편차의 크고 작음을 평가하기 위한 퍼지 멤버십 함수는 그림 8과 같으며 그림 6과 그림 7에서 확인할 수 있는 변조 기법별 순시 주파수 표준편차의 경곗값을 이용하여 정의되었다. 제시된 멤버십 함수를 통해 순시 주파수 표준 편차의 크고 작음을 확률적으로 평가할 수 있다.



(a)



(b)

그림 8. 순시 주파수의 표준 편차의 퍼지 멤버십 함수 (a) 중간값 필터 적용 (b) 중간값 필터 미적용
Fig. 8 Fuzzy membership function for standard deviation of instantaneous frequency (a) median filter is applied (b) median filter is not applied

2.2.3. 순시 주파수 절댓값의 표준 편차

일반적으로 BFSK와 같이 2개의 주파수 성분을 가지는 신호의 경우 주파수 히스토그램에서 나타나는 그룹의 수를 이용하여 식별이 가능하다. 그러나 FM 계열의 신호가 한 펄스 안에서 주파수의 증감이 고차 다항식으로 일어날 경우 주파수 분포가 2개로 그룹화된 것처럼 보일 수 있다. 본 논문에서는 BFSK 신호와 FM 계열의 신호를 구분하기 위해 평균값으로 정규화된 순시주파수의 절댓값을 구한 후 이의 표준 편차를 이용한다. BFSK의 경우 정규화된 주파수 값 0Hz에 대칭적으로 각각의 주파수 그룹이 분포해 있다. 따라서 절댓값을 취할 경우 두 그룹이 겹치게 되어 주파수의 표준편차는 극히 적어진다. 반면 FM 계열의 신호는 절댓값을 취하더라도 약 절반의 대역폭이 남아있어 BFSK 신호에 비해 큰 주파수 표준편차를 보인다.

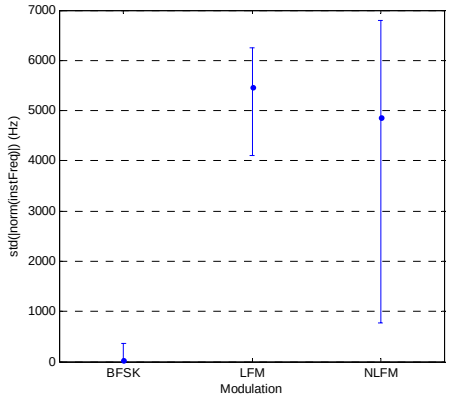


그림 9. 변조 기법 별 정규화된 순시 주파수 절댓값의 표준 편차
Fig. 9 Standard deviation of frequency or each modulation scheme

그림 9는 주파수 그룹이 2개 이상으로 검출되는 BFSK, LFM, NLFM 신호의 정규화된 순시 주파수 절댓값의 표준편차를 나타내고 그림 10은 이를 바탕으로 정의된 퍼지 멤버십 함수를 나타낸다.

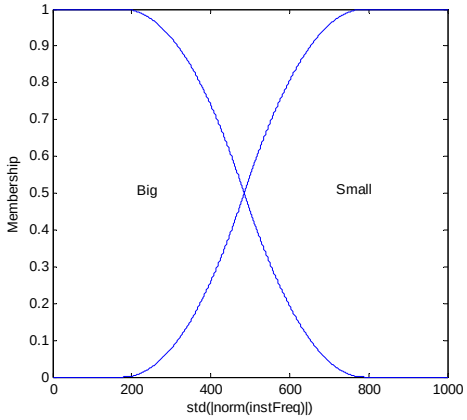


그림 10. 정규화된 순시 주파수의 절댓값 표준편차에 대한 퍼지 멤버십 함수
Fig. 10 Fuzzy membership function for standard deviation of absolute value from normalized instantaneous frequency

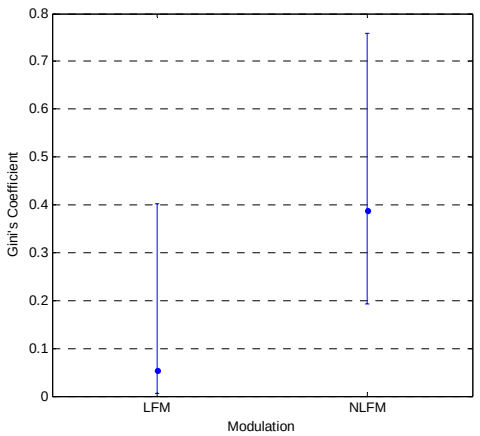


그림 11. LFM, NLFM 신호의 지니 계수 분포 (전체)
Fig. 11 Distribution of Gini's Coefficient for LFM and NLFM signals (Total)

2.2.4. 순시 주파수 변화의 선형성

LFM 신호와 NLFM 신호를 구분하기 위해서는 순시 주파수 변화의 선형성을 평가해야 한다. 본 논문에서는 선형성을 평가하는 방법으로 [8]에서 제안된 주파수 분포에 대한 지니계수를 사용하였다. LFM 신호의 경우 주파수 구간 별 분포가 비슷하여 지니계수가 작은 값을 보이는 반면 NLFM 신호의 경우 주파수 분포의 불균형으로 인해 큰 지니계수 값을 보인다.

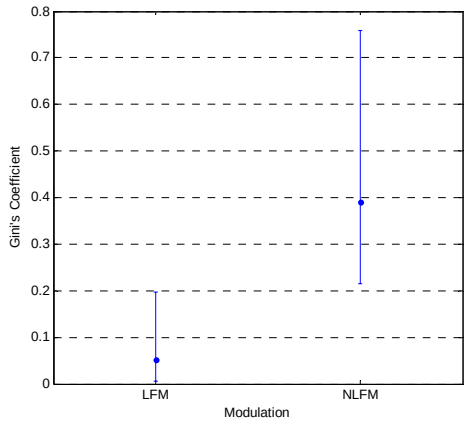


그림 12. LFM, NLFM 신호의 지니 계수 분포 (LFM 상위 1.5%, NLFM 하위 1.5% 제거)
Fig. 12 Distribution of Gini's Coefficient for LFM and NLFM signals (exclusion of the 1.5% upper values from LFM and the 1.5% bottom values from NLFM)

그림 11은 변조 기법에 따른 지니 계수 분포를 나타낸다. 기대한 바와 달리 그림에서는 LFM과 NLFM 신호의 지니계수 분포가 중첩되는 부분이 많아 지니계수를 통한 변조 기법의 구분이 명확하지 않은 것처럼 보인다. 그러나 LFM 신호의 지니계수 값 상위 1.5%와 NLFM 신호의 지니계수 값 하위 1.5%를 제거한 그림 12는 지니계수를 통한 주파수 변화 선형성 판단이 나머지 98.5% 신호에 대해 가능함을 보인다. 이는 노이즈에 민감한 지니계수의 특성에 기인한 것으로서 본 논문에서는 주파수 변화의 선형성 평가를 위해 그림 13과 같이 지니계수에 대한 퍼지 멤버십 함수를 정의하였다.

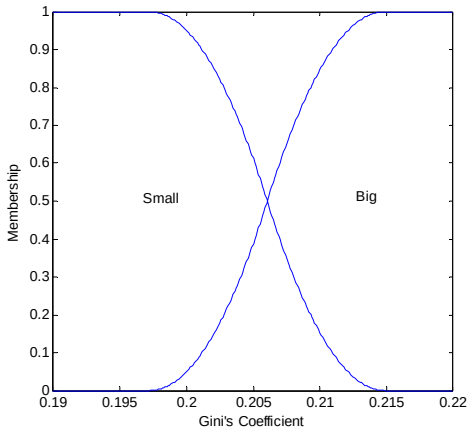


그림 13. 지니계수에 대한 퍼지 멤버십 함수
Fig. 13 Fuzzy membership function for Gini's coefficient of frequency distribution

2.3. 변조 기법의 추론

본 논문에서 제안하는 기법은 Mamdani가 제안한 직접 추론 방법을 사용하였다 [9]. 2.2에서 소개된 특징 인자들은 표 2에 나열되었으며, 표 3은 입력 신호에 대해 각 특징 인자별 멤버십 값이 계산된 후 적용되는 퍼지 추론 규칙을 나타낸다. 각 변조 기법 식별에 사용되는 퍼지 추론 규칙은 해당 변조 기법을 분별력 있게 구분 가능한 특징 인자 멤버십 함수의 결합으로 정의되었다. 퍼지 추론 규칙을 통해 각 변조 기법에 대한 진릿값을 계산할 수 있으며 본 기법에서는 입력 신호에 대해 가장 큰 진릿값을 갖는 변조 기법을 해당 신호에 적용된 변조 기법으로 추정하였다.

만약 각 변조 기법에 대한 진릿값이 모두 0인 경우에는 입력 신호의 변조 기법을 추론할 수 없다고 정의한다. 알고리즘을 통한 자동 변조 기법 식별 결과에 대한 신뢰도는 식 6과 같이 최댓값을 갖는 진릿값과 그 진릿값이 모든 변조 기법의 진릿값의 합계에서 차지하는 비율의 곱으로 계산된다.

$$Validity = T_{\max} \times \frac{T_{\max}}{\sum_{i=1}^{n} T_i} \tag{6}$$

여기서 $T_{\max}$는 각 변조 방식에 대해 계산된 진릿값 중 최댓값이며, T_i는 각 변조 방식의 진릿값이다. 예를 들어 진릿값이 0보다 큰 변조 기법이 UM, PSK 이었고 각각의 진릿값이 0.2, 0.8일 경우 PSK 변조 기법의 식별 결과 신뢰도는 64%라고 정의할 수 있다.

표 2. 특징인자
Table. 2 Features

특징인자	설명
F1	주파수 스펙트럼 그룹의 수
F2	중간값 필터를 미적용한 순시 주파수의 표준편차
F3	중간값 필터를 적용한 순시 주파수의 표준편차
F4	정규화된 순시 주파수 절댓값 표준편차
F5	순시 주파수 분포에 대한 지니계수

표 3. 퍼지 추론 규칙
Table. 3 Fuzzy inference rules

변조기법	추론 규칙
UM	If (F1 is 1) and (F2 is small), then UM
BFSK	If (F1 is 2) and (F4 is small), then BFSK
QFSK	If (F1 is 4), then QFSK
PSK	If (F1 is 1) and (F3 is small) and (F2 is big), then PSK
LFM	If (F1 is 1 or 2) and (F4 is big) and (F3 is big) and (F5 is small), then LFM
NLFM	If (F1 is 1 or 2) and (F4 is big) and (F3 is big) and (F5 is big), then NLFM

Ⅲ. 실험결과

제안된 기법의 성능을 확인하기 위하여 알고리즘을 MATLAB을 이용하여 구현한 후 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 알고리즘의 입력 신호로 사용되는 모의 신호의 제원은 표1을 따르며 특징 인자 선정 시와 달리 신호 대 잡음비(SNR)가 0dB에서 20dB까지 변화하는 AWGN 환경을 가정하여 44200개의 신호를 생성하였다.

그림 14는 SNR의 변화에 따른 변조 인식률을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 제안된 기법은 SNR이 10dB이상인 신호 수집 환경에서 모든 펄스 내 변조 기법에 대해 95% 이상의 변조 인식률을 보인다. 단, SNR에 따른 변조 기법 별 인식율의 변화 경향에는 차이가 있다. UM 신호의 경우 신호 수집환경이 좋지 않으면 노이즈의 영향으로 인해 다른 변조 신호와의 구분이 쉽지 않다. 이는 지니 계수를 통하여 선형성을 판단하는 LFM 신호도 마찬가지이다. 지니계수는 정확한 순시 주파수 값에 기반을 두기 때문에 노이즈 발생에 매우 민감하다. 또한 BFSK 신호는 SNR이 0dB일 경우 정확한 주파수 대역폭 측정이 어려워 NLFM 신호로 분류되는 경향이 있다. 반면 QFSK, PSK, NLFM 신호에 대한 인식률은 SNR의 변화에 대해 큰 영향을 받지 않는 것을 관찰할 수 있다.

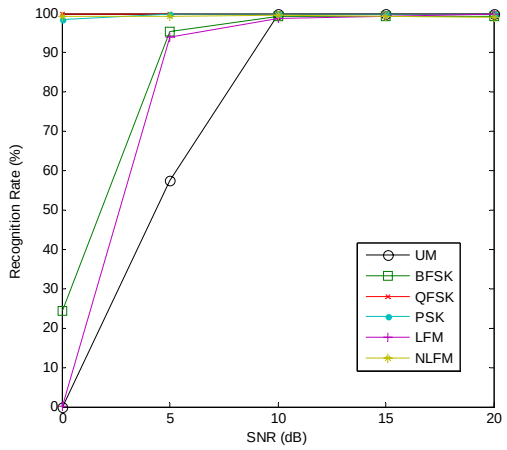


그림 14. SNR의 변화에 따른 변조 기법 인식률
Fig. 14 Modulation recognition rate with varying SNR

표 4는 SNR이 10dB인 수집 환경에서의 상세한 변조 기법 인식률을 나타낸다. 전체적으로 FM 계열의 신호를 제외하면 100%의 변조 기법 인식률을 보이는 것을 확인할 수 있다. FM계열의 신호에서 변조 기법이 잘못 식별된 경우는 그림 11에서 지니계수의 분포가 LFM과 NLFM 사이에 중첩되는 부분에 해당한다.

표 4. SNR 10dB에서의 변조 기법 인식률 (%)
Table. 4 Modulation recognition rate (%) under SNR 10dB

추론 / 입력	UM	BFSK	QFSK	PSK	LFM	NLFM	N/A
UM	100	-	-	-	-	-	
BFSK	-	100	-	-	-	-	
QFSK	-	-	100	-	-	-	
PSK	-	-	-	100	-	-	
LFM	-	-	0.001	-	98.9	0.008	0.002
NLFM	-	-	-	0.001	0.008	99.1	0.001

표 5는 SNR이 10dB 이상인 환경에서 식별 결과의 신뢰도 분포를 보여준다. 결과의 도식화를 위해 신뢰도가 90% 이상인 경우를 '확실', 50% 이상인 경우를 '유력', 50% 미만인 경우 '불확실'로 정의하였으며, 경곗값은 알고리즘 운용자의 판단에 따라 가변적으로 설정이 가능하다. SNR이 10dB 이상인 28464개의 모의 신호에 대해 알고리즘은 약 16.3%인 4639개의 불확실한 판단을 내렸으나 불확실한 판단의 경우에도 약 98.3%의 확률로 올바르게 변조 기법을 추론하였다. 불확실한 판단을 내린 모의 신호 제원을 살펴보면 대부분이 그림 11과 그림 12와 같이 변조 기법의 명확한 구분이 어려운 LFM 및 NLFM 신호에 해당된다.

표 5. SNR 10dB이상에서의 식별 결과 신뢰도 분포
Table. 5 Distribution of test result validity under SNR ≥ 10dB

신뢰도 / 결과	확실	유력	불확실
TRUE	20696	2824	4562
FALSE	273	35	77
계	20966 (73.7%)	2859 (10%)	4639 (16.3%)

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 퍼지 알고리즘을 사용하여 UM, BFSK, QFSK, PSK, LFM, NLFM 펄스 내 변조 기법이 적용된 레이더 신호를 분류하였다. 실험결과는 제안된 기법이 다양한 변조 기법 변수의 조합에도 강인함을 보여준다. 향후 SNR 10dB 미만에서도 높은 인식률을 보이는 기법을 고안하는 것을 목표로 하고 있으며 특히 SNR의 변화에 강인한 특징인자를 발굴하고 이에 대한 멤버쉽 함수를 정의할 예정이다.

REFERENCES

[1] G. López-Risueño, J. Grajal, and Á. Sanz-Osorio, "Digital channelized receiver based on time-frequency analysis for signal interception," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 41, no. 3, pp. 879 – 898, 2005.

[2] Intra-pulse modulation recognition using feature-based decision tree method, in Proceeding of the Institude of Electronics Engineerings of Korea summer conference, pp. 108-109, Jun. 2010.

[3] M. Vastram Naik, R. Bhattacharjee, A. Mahanta and H. B. Nemade, "Blind adaptive recognition of different QPSK modulated signals for software defined radio application," in Proceeding of Communication System Software and Middleware, pp. 1-6, Jan. 2006.

[4] Hussam Mustafa and Milos Doroslovacki, "Digital modulation recognition using support vector machine classifier," in Proceeding of IEEE Conference on Signals, Systems and Computers, pp.2238-2242, Nov. 2004.

[5] Zhilu Wu et al., "Automatic digital modulation recognition based on support vector machine," in Proceeding of IEEE Confence on Neural Networks and Brain, pp. 1025-1028, Oct. 2005.

[6] C. Louis and P. Sehier, "Automatic modulation recognition with a hierarchical neural network," in Proceeding of Military Communications Conference, vol. 3, pp. 713 – 717, Oct. 1994

[7] M. L. D.Wong and A. K. Nandi, "Automatic digital modulation recognition using artificial neural network and genetic algorithm," Signal Process., vol. 84, no. 2, pp. 351 – 365, Feb. 2004.

[8] K. You, J. Won, O. Shin, Y. Han, H. Kim, K. Song, B. Park, and H. Shin, “Radar Modulation Identification Using Gini’s Coefficient”, in Proceeding of International Conference on Systems and Electronic Engineering, Dec. 2012.
[9] H.J. Zimmerman, “FUZZY Set Theory and its Applications”, Dordrecht, Kluwer, 1985.

김영민(Young-Min Kim)

2007년 연세대학교 컴퓨터과학과 공학사
2009년 연세대학교 컴퓨터과학과 공학석사
2009년 ~ 2012년 LG전자 주임연구원
현 국방과학연구소 연구원
※관심분야 : 전자전, 레이더 신호처리