

FSK 변조 레이더 신호 인식 기술

Identification of FSK Radar Modulation

임 하 영* · 유 경 진* · 신 현 초†

(Ha-Young Lim · Kyung-Jin You · Hyun-Chool Shin)

Abstract - This paper presents a novel method for identification of FSK modulated radar signal. Three features which measure the number of frequency tones, the regularity of the frequency shifting, and the diversity of power spectrum of detected radar signal, are introduced. A Two-step combined maximum likelihood classifier was used to identify the details of the detected FSK signal; the modulation order and the use of Costas code. We attempted to divide FSK signal into binary FSK, ternary FSK, 8-ary FSK, and FSK with Costas code of length 7. The simulation results indicated that the proposed methods achieves an averaged identification accuracy was 99.93% at a signal-to-noise of 0 dB.

Key Words : Radar modulation, Frequency shift keying, Electronic warfare

1. 서 론

병력 중심의 재래식 소모전 양상을 보인 과거의 전쟁과는 다르게, 현대전은 정보와 지식 기반의 통합, 속도전을 통한 인명피해 및 경제적 손실의 최소화와 조기종전을 지향한다. 따라서 개전 초기에 적 지휘통제 및 통신체계의 무력화를 통해 전쟁의 주도권을 장악하고 아군의 효율적인 전략수립과 신속한 작전수행 및 대응을 위한 혁신적인 전자전 능력 확보의 중요성이 크게 강조되고 있다.

전자전 지원은 적군이 방사하는 각종 전자파를 탐색, 감청, 식별하고 방사위치 및 제원을 탐지하기 위하여 취해지는 제반 활동을 의미한다. 전자전 지원을 통해 수집된 정보를 통하여 효과적인 대응책과 효율적인 전략 수립을 하는데 활용할 수 있으므로, 우수한 전자전 지원 능력의 보유는 승패를 좌우하는 핵심적인 요소라고 할 수 있다[1].

본 연구에서는 전자전 지원의 중요한 요소인 레이더 변조 인식 기술의 개발을 목표로 한다. 기존 변조 인식 기술 연구[2~4]에서는 레이더 신호를 주로 주파수편이변조(FSK), 위상편이변조(PSK), 진폭편이변조(ASK), 주파수변조(FM) 등의 변조 형식으로만 인식하는 것을 목표로 하였다. 이에 비하여 각 변조 방식의 파라미터에 따른 세부 변조 방식까지의 인식은 자주 다루어지지 않았다. 그중 Yu 등[5]은 M-FSK 변조 신호의 진폭스펙트럼에서 관찰되는 첨두로부터 변조 차수(M=2,4,8,16,32)를 추정하기 위하

여 지역최대값 및 첨두간동일간격을 이용하였다. 그러나 분류 과정에서 내정 임계치와 신호의 대역폭 정보를 필요로 하는 한계가 존재한다. Ahn과 Seo[6]는 [5]의 방법에서 요구되는 임계치를 신호의 스펙트럼으로부터 정할 수 있도록 보완하였다. Wang 등[7,8]은 페이딩 및 부가백색잡음 환경에서 M-FSK 신호의 1차 순환 정상성을 이용하여 변조 차수(M=2,4,8)를 추정하였으나, 변조 차수 추정을 위한 첨두치 인식을 위해 내정 임계치가 사용된 한계점이 있었다. Park 등[9]은 ASK, FSK, PSK의 변조 차수(M=2,4) 인식을 위해, 신호의 웨이블릿 변환 계수를 특징인자로 사용하고, 다양한 분류기에 따른 인식 성능을 보였다. 그러나 SNR 0 dB 이상에 대한 실험결과만을 보였으며, 모의실험에 사용된 변조 파라미터가 제시되지 않은 한계점을 보였다. 또한 기존의 FSK 세부 변조 인식 연구[5~8]에서는 Costas와 같은 주파수 도약 코드가 사용된 FSK 변조를 대상으로 삼지 않았다.

본 논문에서는 FSK 레이더 변조신호를 인식에 사용될 시간-주파수 분석 기반의 세 종류의 특징인자를 소개한다. M-FSK 변조 신호의 심볼 수를 인식하기 위한 톤 개수(FT: frequency tones), 신호의 주파수 도약 패턴의 간격변화 특성을 감지하는 도약특성(FH: frequency hopping), 그리고 신호의 전력성분 배분특성과 관련된 주파수 엔트로피(FE: frequency entropy)이다. 이상의 세 특징인자들을 조합하여, 미지의 FSK 변조 신호에 대한 변조 차수와 주파수 도약 코드의 사용여부를 추정하는 방법을 제안한다. 본 연구의 인식 대상 FSK 변조 신호는 총 4종으로, 2-FSK, 3-FSK, 8-FSK, FSK with Costas 7 code이며 제안하는 방법의 성능은 모의실험을 통해 확인하였다.

2장에서는 FSK 변조 레이더 신호의 특성에 대하여 설명한다. 3장에서는 FSK 변조 파라미터를 추정하는 세 특징인자와 분류기를 소개한다. 4장에서는 제안하는 방법을 적용한 모의실험을 통해 인식 성능을 분석하고, 5장에서 결론을 맺는다.

† Corresponding Author : Dept. of Electronic Engineering, Soongsil University, Korea.
E-mail: shinhc@ssu.ac.kr

* Dept. of Electronic Engineering, Soongsil University, Korea.

Received : July 7, 2016; Accepted : January 26, 2017

2. FSK 변조 레이더 신호

FSK 변조는 변조 대상인 각 심볼이 이산적으로 분리된 고유의 주파수에 대응되도록 하는 디지털 변조 방식으로, 변조된 신호는 일정시간마다 불연속적인 주파수 편이를 갖는 것이 특징이다. 심볼의 총 개수, 즉 변조 차수 M에 따라 M-FSK 변조로 통칭되며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = A \exp[j(2\pi F_{(k \bmod M)+1} t + \phi_k)] , \quad \sum kT_s \leq t \leq (k+1)T_s , k = 0, 1, 2 \dots \quad (1)$$

여기에서 A는 신호의 진폭, t와 k는 각각 시간 인덱스와 심볼 인덱스이다. T_s, φ_k는 변조 파라미터로, 각각 심볼 길이와 심볼 별 위상을 의미한다. 편이된 주파수 F₁, ..., F_M은 변조 차수에 따라 다음과 같이 정해진다.

$$F_{(k \bmod M)+1} = F_c - \frac{1}{2} F_\Delta (M - 2k + 1) \quad (2)$$

여기에서 F_c와 F_Δ는 변조신호의 중심 주파수와 주파수 간격을 의미한다.

군용 레이더에서 주로 운용되는 M-FSK 변조 방식은 2-FSK, 3-FSK, 8-FSK이다. 펄스 내에서 편이 주파수가 순차적으로 증가하는 M-FSK 변조 방식과 달리, 편이 주파수가 도약하는 FSK 변조 방식도 존재한다. 주로 사용되는 도약 시퀀스는 길이가 7인 Costas 코드 시퀀스(4, 7, 1, 6, 5, 2, 3)이다. 이 시퀀스와 결합된 FSK의 편이 주파수는 F_{(k mod 7)+1}로부터 F₄, F₇, F₁, F₆, F₅, F₂, F₃의 순서로 결정된다[10]. 본 연구의 변조 인식 대상은 3종의

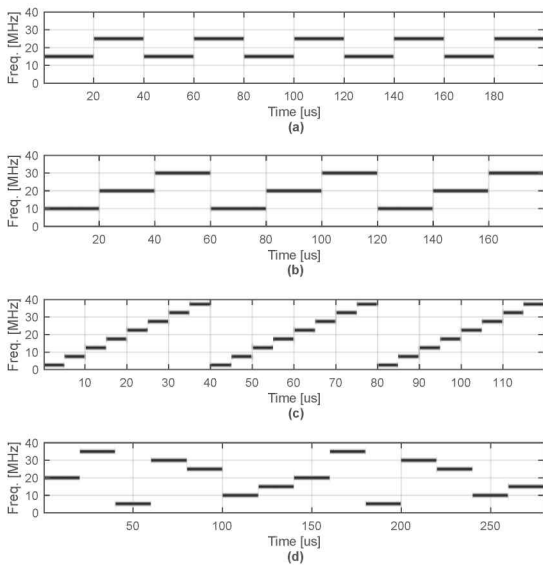


그림 1 다양한 FSK 변조 레이더 신호의 스펙트로그램 예 (a) 2-FSK (b) 3-FSK (c) 8-FSK (d) FSK-C

Fig. 1 Spectrogram examples of various types of FSK modulated radar signals

M-FSK(2-FSK, 3-FSK, 8-FSK)와 FSK with Costas 7 code (FSK-C)로 총 4종으로 하였다.

그림 1은 부가백색잡음 환경 하에서 신호 대 잡음비(SNR)가 10 dB일 때, 다양한 FSK 변조 신호의 시간-주파수 특성을 나타낸다. 그림 1(a)~(c)에서는 M-FSK(M=2,3,8)의 편이 주파수가 순차적으로 증가하며 펄스 단위로 반복됨을 보이고 있다. 그림 1 (d)에서는 FSK-C의 편이 주파수가 Costas 코드의 시퀀스에 따라 비순차적으로 변화하는 특징이 확인된다.

3. 제안 알고리즘

수신된 FSK 변조신호의 파라미터를 추정을 위하여 세 종류의 특징인자를 개발하였다. 변조 차수를 인식하기 위한 톤 개수, 주파수 도약 코드의 사용여부를 판단할 도약특성, 그리고 주파수축에서의 전력성분 배분특성인 주파수 엔트로피이다. 또한 인식 대상 FSK 변조신호들에 대한 세 특징인자의 확률모델을 생성하고, 신호 인식을 위한 두 단계의 분류기를 설계하였다.

3.1 톤 개수

M-FSK 변조에서는 단일 펄스가 포함하는 편이 주파수들이 각각 심볼에 대응되므로, 수신된 레이더 신호가 포함하는 톤의 개수를 인식하면 변조 차수를 효과적으로 추정할 수 있다.

변조 차수를 추정하는 방법은 다음과 같다. 국소 푸리에 변환(STFT)을 통해 각 시점에서 최대치 전력을 갖는 주파수를 선별한다 [그림 2(a),(b)].

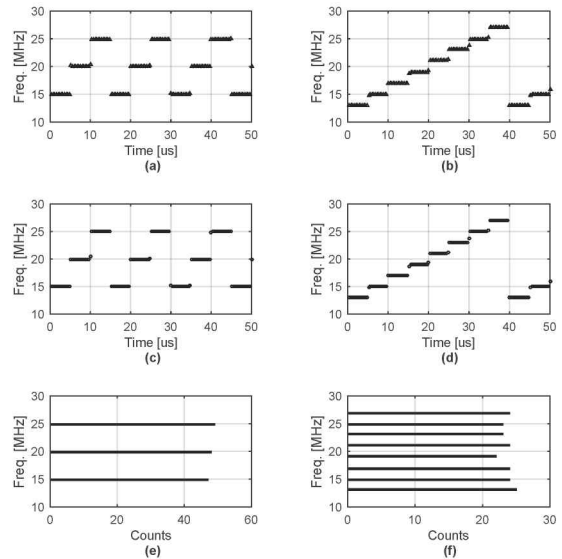


그림 2 3-FSK (a, c, e) 및 8-FSK (b, d, f)의 FT 산출 과정 (a,b) 최대치 파워에 해당하는 주파수 (c, d) 중앙치 필터링된 추정 순시 주파수 (e, f) 추정 순시주파수의 출현 횟수를 나타내는 히스토그램

Fig. 2 Process of calculation of FT for 3-FSK and 8-FSK.

STFT의 분석시점 내에 심볼의 경계 시점이 존재하는 경우 또는 심한 잡음 환경 하에서는 선별된 주파수가 실제 순시주파수와 무관할 수 있으므로, 길이 3의 중앙치 필터링을 통해 이상치를 갖는 것을 방지하고 추정 순시주파수를 얻는다 [그림 2(c),(d)].

추정 순시주파수들의 출현빈도를 히스토그램을 통해 산출한다. 적절한 임계점을 설정하여 노이즈 성분에 의한 출현빈도는 제외한다. 남겨진 주파수 성분의 개수가 톤 개수(FT)이다 [그림 2 (e),(f)].

3.2 도약특성

주파수 도약 코드를 포함하는 FSK 변조 신호의 특징은, 편이 주파수의 반복패턴이 일반적인 M-FSK 변조신호와 상이하다는 것이다. 그림 3(a)와 (e)의 스펙트로그램에서 보이는 것과 같이 3-FSK는 주파수 편이 간격이 F_{Δ} 로 일정하게 나타나는 반면에 FSK-C는 편이 간격이 일정하지 않다. 이 차이점을 이용하면 FSK 변조 과정 내 도약 코드의 포함 여부를 확인할 수 있다.

편이 간격을 계산하기 위해서는 심볼 경계의 탐지가 선행되어야 한다. 파워스펙트럼의 대조비(contrast ratio)를 이용하면 주파수 편이에 의한 파워스펙트럼 변화 시점을 검출할 수 있다. 시점 w 에서의 대조비 C_w 는 파워스펙트럼 $S_w(f)$ 으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$C_w = \frac{m_w}{s_w}, \quad m_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_w(f_i), \quad s_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_w(f_i) - m_w)^2 \quad (3)$$

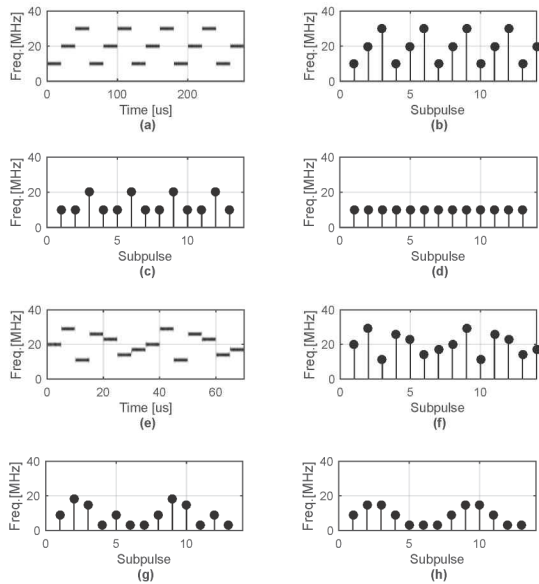


그림 3 3-FSK 및 FSK-C의 특징인자 FH 산출 과정. (a,e) 스펙트로그램 (b,f) 심볼 별 중앙치 (c,g) 편이 주파수 차분값의 절대치 (d,h) 중앙치 필터링된 편이 주파수 차분값과 FH. 3-FSK의 FH: 1.08, FSK-C의 FH: 0.67

Fig. 3 Process of calculation of FH for 3-FSK (1.08) and FSK-C (0.67).

여기에서 i 는 주파수성분 인덱스, N 은 주파수성분 개수이다. 한 심볼이 지속되는 동안 신호의 파워스펙트럼은 변화하지 않으며 대조비 수치 역시 지속된다. 반면에 심볼이 변화하는 시점에서 파워스펙트럼은 두 개의 톤을 포함하게 되고, 표준편차는 감소, 대조비는 증가하게 된다. 따라서 대조비의 상승 시점을 심볼 경계로 간주할 수 있다. 각 심볼에 해당되는 시점들에서 최대전력에 해당하는 주파수들의 중앙치를 대푯값으로 취한 뒤 [그림 3(b), (f)], 이 값들의 차분연산의 절대치를 구하면 편이간격이 된다 [그림 3(c), (g)]. 이 때, 펄스 경계에서의 값은 인접 심볼 간의 차이가 아니므로 길이 3의 중앙치 필터링을 통해 이상치를 배제한다 [그림 3(d), (h)]. 필터링된 편이간격들의 균일성을 regularity[11]로 정량화한 것을 도약특성(FH)으로 정의한다. 편이간격 Δ_q 를 내림차순으로 정렬한 $\hat{\Delta}_q$ 에 대하여 다음과 같이 계산한다.

$$FH = \sqrt{\frac{3 \sum_{q=1}^Q q^2 \hat{\Delta}_q^2}{Q^2 \sum_{q=1}^Q \hat{\Delta}_q^2}} \quad (4)$$

여기에서 Q 는 편이간격의 총 개수이다. 도약 코드가 사용되지 않는 일반적인 M-FSK 변조신호의 편이간격은 균일하므로 FH는 1에 가까운 값으로 계산되나, FSK-C 변조 신호의 경우 FH는 0에 가까운 값이 된다.

3.3 주파수 엔트로피

변조 차수에 따라 대역 내 주파수 성분의 비율이 서로 다르다. 그림 4(b)가 보이는 3-FSK 파워스펙트럼에서는 3개의 주파수 성분에서 파워가 크게 나타나고, 그림 4(d)가 보이는 차수 7의 FSK-C는 7개의 주파수 성분에서 파워가 크게 나타난다. 이는 어떤 주파수 성분이 관측될 확률은 변조 차수에 따라 다르다는 것

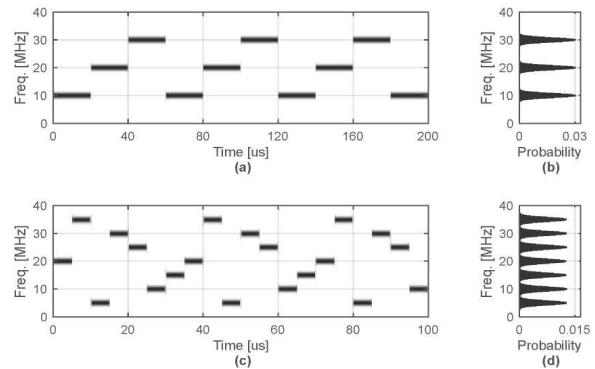


그림 4 3-FSK 및 FSK-C의 FE 산출 과정. (a,c) 스펙트로그램 (b,d) 파워스펙트럼 3-FSK의 FE: 6.58, FSK-C의 FE: 7.84

Fig. 4 Process of calculation of FE for 3-FSK (6.58) and FSK-C (7.84).

을 의미한다. 확률변수의 불확실성 척도인 샤논 엔트로피를 이용하여 주파수별 파워의 편중성을 정량화할 수 있다. 정규화된 파워스펙트럼 $p(f_j) = S(f_j) / \sum_{i=1}^N S(f_i)$ 에 대한 샤논 엔트로피를 주파수 엔트로피(FE)로 정의한다.

$$FE = \frac{1}{\log N} \sum_{i=1}^N p(f_i) \log \frac{1}{p(f_i)} \quad (5)$$

변조 차수가 낮을수록 수신신호가 포함한 전체 주파수 성분에서 확률의 편중이 심하므로 FE는 작은 값이 된다.

3.4 확률모델 및 분류기 구조

변조 방식 별 각 특징인자의 확률모델을 생성한다. 다량의 변조신호 데이터로부터 추출된 특징인자의 평균, $\mu_{j,l}$ 와 분산, $\sigma_{j,l}^2$ 을 이용하는 가우시안 분포를 확률모델로 사용한다.

$$f_j(v;l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{j,l}^2}} \exp\left(-\frac{(v-\mu_{j,l})^2}{2\sigma_{j,l}^2}\right) \quad (6)$$

j 는 특징인자의 종류, v 는 해당 특징인자의 값, l 은 변조 방식의 종류를 의미한다.

특징인자 벡터, $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots]$ 에 대한 확률모델 $f(\mathbf{v}; l)$ 은 벡터를 이루는 각 특징인자 확률모델 간의 곱으로 정의한다.

$$f(\mathbf{v}; l) = \prod_j f_j(v; l) \quad (7)$$

FSK 세부 변조방식의 인식은 그림 5에서 보이는 것과 같이 두 단계로 이루어진다. 우선 FH와 FE 모두를 특징벡터로 갖는 분류기를 이용하여 도약 코드의 사용 여부를 확인한다. 미지의 FSK 변조신호에 도약 코드가 사용되었다고 판단되면 FSK-C로 인식 과정을 종료하고, 사용되지 않았다고 판단되면 다음 단계로 이동한다. 두 번째 단계에서는 FT만을 특징벡터로 갖는 분류기를 이용하여 변조 차수 M 을 추정한다. 각 분류에는 최대우도분류기를 사용하였다.

$$\hat{l} = \operatorname{argmax}_l f(\mathbf{v}; l) \quad (8)$$

\hat{l} 는 분류된 변조 방식 종류에 해당된다.

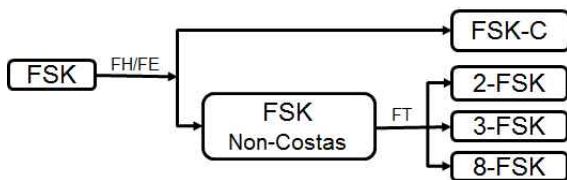


그림 5 FSK 세부 변조 인식 순서

Fig. 5 Flowchart of identification of FSK modulation

4. 실험 결과

모의실험을 위한 신호 생성에 사용된 변조 파라미터 설정은 표 1에 나타내었다. 변조 파라미터로는 중심 주파수(F_c), 주파수 편이 간격(F_Δ), 심볼 길이(T_s), 펄스 폭(T_p), 심볼별 위상(ϕ_k)이 있으며, 수치는 각 구간 내에서 무작위로 결정되도록 하였다. 변조 방식 별 특징인자의 확률모델이 다양한 신호 수신 환경에서의 신호 특성을 반영할 수 있도록, 변조 신호는 -10 dB에서 10 dB 까지 5 dB 간격의 SNR 당 200개씩 총 1000개의 신호 데이터를 생성하였다.

이와 같이 다양한 변조 파라미터의 조합으로부터 생성되는 변

표 1 모의실험을 위한 파라미터 설정

Table 1 Simulation parameters

Modulation	Parameter [unit]	Value
	Sampling frequency [MHz]	160
2-FSK,	F_c [MHz]	[-20, 20]
3-FSK,	F_Δ [MHz]	[2, 5]
8-FSK,	T_s [μ s]	[1, 5]
FSK-C	T_p [μ s]	[20, 200]
	ϕ_k [rad.]	[0, 2π]

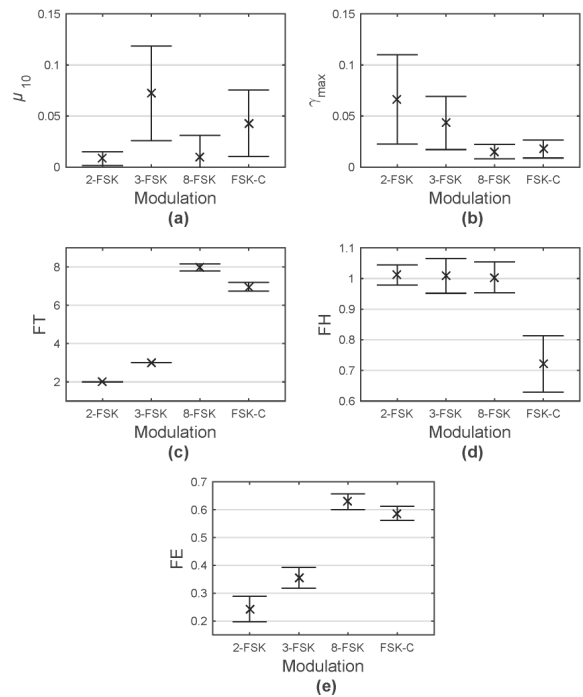


그림 6 다양한 FSK 변조 파라미터의 조합에 따른 FSK 세부변조 방식별 특징인자 분포 (a) μ_{10} (b) γ_{max} (c) FT (d) FH (e) FE

Fig. 6 Dispersion of values of the conventional and the proposed features, versus FSK modulation

표 2 변조 인식 결과의 혼동행렬

Table 2 Confusion matrix for FSK modulated radar signals

SNR=10 dB		Actual			
		2-FSK	3-FSK	8-FSK	FSK-C
Classified	2-FSK	99.90			
	3-FSK		100		
	8-FSK	0.10		99.20	1.10
	FSK-C			0.80	98.90

SNR=0 dB		Actual			
		2-FSK	3-FSK	8-FSK	FSK-C
Classified	2-FSK	99.90			
	3-FSK		99.90		
	8-FSK	0.10		98.40	0.90
	FSK-C		0.10	1.60	99.10

SNR=-5 dB		Actual			
		2-FSK	3-FSK	8-FSK	FSK-C
Classified	2-FSK	99.80			
	3-FSK		99.80		
	8-FSK	0.20		97.10	1.40
	FSK-C		0.20	2.90	98.60

SNR=-10 dB		Actual			
		2-FSK	3-FSK	8-FSK	FSK-C
Classified	2-FSK	89.20			
	3-FSK	7.90	89.10		
	8-FSK	0.90	5.50	88.70	2.00
	FSK-C	2.00	5.40	11.30	98.00

조 신호들로부터 산출된 기존 연구[2]의 특징인자 μ_{10} 및 γ_{max} 와, 제안하는 특징인자 FT, FH, FE의 수치의 평균과 표준편차를 그림 6에 나타내었다. 두 종류의 기존 특징인자의 경우 변조방식 간 수치의 중첩이 존재하여 변조방식 구별에 적합하지 않음을 그림 6(a)와 (b)가 보인다. 그림 6(c)은 FT의 수치를 보이며, 2-FSK와 3-FSK의 평균 변조 차수가 2와 3으로 정확하였으며, 8-FSK와 FSK-7의 평균 변조 차수는 각각 7.98과 6.97로 측정되었음을 보인다. 그림 6(d)은 도약 코드가 사용된 FSK-C의 평균 FH 수치가 M-FSK 방식들의 그것에 비하여 낮음을 보인다. 그림 6(e)은 상대적으로 변조 차수가 낮은 2-FSK와 3-FSK의 FE가 8-FSK와 FSK-C의 FE보다 낮게 계산됨을 보인다. 변조차수가 낮을수록 확률의 편중이 심하고 파워의 불균형 정도가 크기 때문이다.

표 2는 SNR이 각각 10 dB, 0 dB, -5 dB, -10 dB일 때의 혼동행렬을 보인다. SNR이 10 dB일 때 평균 인식 성공률은 99.95%이며 각 변조 방식별 오인식률은 1% 가량이였다. 0 dB에서는 모든 변조인식 대상에 대하여 98% 이상의 성능을, -5 dB에서는 97% 이상의 성능을 보인다. -10 dB에서도 2-FSK와 3-FSK의

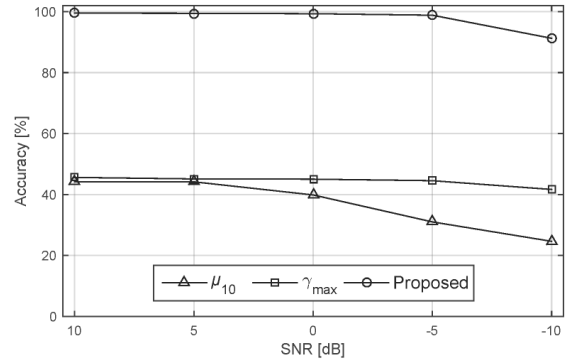


그림 7 기존 특징인자 및 제안 특징인자를 이용한 변조 인식의 평균 인식 성공률 비교

Fig. 7 Classification performance of the conventional and the proposed method for FSK modulated radar signals, versus SNR

인식 성공률은 89% 이상으로 나타났다. SNR이 낮아질수록 인식 성공률이 하락하는 것은 파워 스펙트럼 상의 노이즈 성분을 편이 주파수 성분으로 잘못 인식하여 각각의 편이 주파수를 명확하게 검출하지 못하였기 때문이다.

그림 7은 기존 연구[2]에서 사용된 특징인자인 μ_{10} 및 γ_{max} 와, 제안하는 방법에 의한 각 변조 인식 성공률을 SNR 별로 비교하여 나타낸다. 인식 대상 신호로는 표 1에서의 변조 파라미터 조합 방식에 의해, 10 dB에서 -10 dB까지 5 dB의 간격의 SNR 별로 1000개씩 총 5000개를 생성하였으며, 분류기를 위한 확률모델은 별개로 생성된 1000개의 신호 데이터로부터 생성하였다. 기존 특징인자를 사용한 인식 최대 성능은 50%에 미치지 못하지만, 제안하는 방법에 의한 성능은 SNR이 0 dB일 때 평균 인식 성공률은 99.33%였다.

5. 결 론

이 논문에서는 FSK 레이더 변조 신호의 자동 변조 인식 기법에 대한 연구 내용을 기술하였다. FSK 변조 방식들을 구분할 수 있는 새로운 특징인자들을 도출하고 2단계의 최대우도분류기를 설계하였고, 이를 적용하여 FSK 변조 신호를 인식하였다.

기존 연구에서는 FSK 변조 신호를 다른 변조 신호와 구분해내는 데에 그치거나 도약 코드의 사용을 배제하였지만, 본 논문에서는 FSK 변조 신호의 특징을 면밀하게 분석하여 신호의 변조 차수와 Costas 코드의 사용 여부까지 인식하는 알고리즘을 설계하였다.

변조 파라미터의 무작위 조합으로 생성된 충분한 수의 데이터를 통하여 모의실험한 결과, SNR이 0 dB일 때 99.33%의 평균 인식 성공률을, SNR이 -5 dB일 때 98.83%의 높은 성공 인식률을 보였다.

감사의 글

This work was supported by the Technology Innovation Program (10051134, Middle Range Radar(150m) Development for Euro NCAP AEB) funded by the Ministry of Trade, industry & Energy (MI, Korea).

References

- [1] C. Park, "Strategic Meaning of US Overseas Army Relocation Plan," Sea Captain, No. 24, pp. 43-52, 2005.
- [2] J. Lunden and V. Koivunen. "Automatic radar waveform recognition,"IEEE J.Select. Topics Signal Process., vol. 1, no. 1, pp. 124-136, June 2007.
- [3] O. A. Dobre, A. Abdi, Y. Bar-Ness, and W. Su, "Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends," IET Commun, vol. 1, no. 2, pp. 137-156, 2007
- [4] S. Seo, Y. Yoon, Y. Jin, Y. Seo, S. Lim, J. Ahn, C. Eun, W. Jang, S. Nah, "Automatic recognition of analog and digital modulation signals," The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences 30(1C), pp. 73-81, Jan 2005.
- [5] Z. Yu, Y. Q. Shi, and W. Su, "M-ary frequency shift keying signal classification based-on discrete Fourier transform," in Military Communications Conference IEEE, vol. 2, pp. 1167-1172, 2003
- [6] W. Ahn, B. Seo, "An Efficient Peak Detection Algorithm in Magnitude Spectrum for M-FSK Signal Classification", Journal of Broadcast Engineering, vol. 6, no. 6, Dec 2014.
- [7] H. Wang, O. A. Dobre, C. Li, and R. Inkol, "Experimental results for M-FSK signal classification and parameter estimation," in Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International, no. 2, pp. 1786-1789, 2013.
- [8] H. Wang, O. A. Dobre, C. Li, and R. Inkol, "M-FSK signal recognition in fading channels for cognitive radio," in Radio and Wireless Symposium (RWS), 2012 IEEE, pp. 375-378, 2012.
- [9] C.-S. Park, S.-P. Nah, J.-W. Yang, J.-H. Choi, "Automatic recognition of digital modulation types using Wavelet transformation," The Institute of Electronics Engineers of Korea - Telecommunications vol. 45, no. 4, pp. 22-30, April 2008.
- [10] P. E. Pace, Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar, 2nd ed., Artech House, 2009.
- [11] M. C. Tjepkema-Cloostermans, F. B. van Meulen, G. Meinsma and M. J. van Putten, "A cerebral recovery index (CRI) for early prognosis in patients after cardiac arrest," Critical care, vol. 17, 2013.

저 자 소 개



임 하 영(Ha-young Lim)

2016년 송실대학교 정보통신전자공학부 졸업, 2016~현재 FADU Corporation 연구원



유 경 진 (Kyung-Jin You)

2008년 송실대학교 정보통신전자공학부 졸업, 2010년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사), 2010년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정



신 현 출 (Hyun-Chool Shin)

1997년 POSTECH 전자전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전자전기공학과 졸업(석사), 2004년 동 대학원 전자전기공학과 졸업(공학박사), 2004-2007년 Johns Hopkins School of Medicine 박사후연구원, 2007년~현재 송실대학교 전자정보공학부 부교수