

## 스트리밍 처리에 의한 레이더 신호 특성 추출

김관태<sup>1</sup>, 주영관<sup>2</sup>, 전중남<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(주)빅텍 기술연구소 부장, <sup>2</sup>충북대학교 소프트웨어학과 교수

### Feature Extraction of Radar Signals Using Streaming Process

Gwan-Tae Kim<sup>1</sup>, Young-Kwan Ju<sup>2</sup>, Joongnam Jeon<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Division of Technology-Research, VICTEK

<sup>2</sup>Professor, Department of Computer Science, Chungbuk National University

**요약** 전자전의 레이더 신호식별은 신호수신기가 생성한 PDW(Pule Description Word)를 분석해서 펄스반복 간격(PRI, Pulse Repetition Interval)을 인식하는 기술이다. 일반적으로 여러 개의 PDW를 수집해 한 번에 처리하는 배치처리 방식으로 PRI를 식별한다. 본 논문에서는 스트리밍 프로세스에 기초한 신호 특성 추출 알고리즘을 제안한다. 이 기술은 신호수신기에서 PDW를 생성할 때마다 PDW 군집이 형성되는지 조사하고, 레이더 펄스의 도착시간 차이(difference of TOA(Time of Arrival)) 히스토그램을 만들고, 집중도를 기반으로 프레임 PRI를 구하고, 스테저 단계 수를 결정한다. 실험에 의하여 군집의 크기가 증가함에 따라 안정된 인식 결과를 도출한다는 것을 입증했다.

**주제어** : 레이더 신호, PRI 식별, DTOA 히스토그램, 스트리밍 처리, 집중도

**Abstract** Radar signal identification of electronic warfare is a technology that recognizes the pulse repetition interval (PRI) from a set of pulse description words (PDWs) generated by the signal receiver. Conventionally batch processing is widely used in which a number of PDWs are collected as a unit and identifies PRI from the batch. In this paper, we propose a feature extraction algorithm based on the streaming process. This technique does not wait to form a batch. Whenever a PDW(Pulse Description Word) is generated from the signal receiver, the streaming process tries to form a cluster of PDWs, and makes the DTOA (Difference of Time of Arrival) histogram, finds out the frame PRI based on the concentration ratio, and decides the number of stagger stages. Experiments proved that the proposed algorithm derives stable recognition results as the cluster size increases.

**Key Words** : Radar signal, PRI recognition, DTOA histogram, Streaming process, Concentration ratio

### 1. 서론

현대 전자전(EW: Electronic Warfare)에서 아군이 생존하기 위해서는 레이더 신호 식별 기술이 반드시 필요하다. 전자전 분야는 기능에 따라 전자전지원(ES: Electronic Support), 전자공격(EA: Electronic

Attack), 전자보호(EP: Electronic Protection)로 구분한다. 전자전지원에 속하는 레이더 신호 식별은 수신된 레이더 신호가 어느 방향에서 누가 발생시켰으며, 주파수, 펄스 간격, 방사 시간, 위협 정도, 전파 특징 등을 찾아내는 행위이다[1-4].

\*Corresponding Author : Joongnam Jeon(joongnam@cbnu.ac.kr)

Received November 10, 2020

Accepted December 20, 2020

Revised December 6, 2020

Published December 28, 2020

레이더 신호 식별 과정[10-12]은 데이터 수집, 신호 특성 분석, 신호 식별 단계를 따른다. 데이터 수집 과정에서는 수신한 레이더 펄스를 PDW(Pulse Description Word)로 변환하고 PDW 배치(batch)를 만든다. 한 개의 PDW 배치는 일정한 수의 PDW의 모임으로 신호 특성 분석 단계의 처리 단위이다. 이 단계는 PDW 배치에 속한 레이더 펄스를 군집화 하고, 각 군집에 대하여 펄스반복간격(PRI, Pulse Repetition Interval)을 구한다. 마지막 신호 식별 단계는 PDW 정보와 추출한 PRI를 바탕으로 활동 레이더(active radar)를 식별한다.

신호 특성 분석 단위인 한 개의 PDW 배치는 일정한 수의 PDW 모임이거나 특정 시간 동안에 수집된 PDW이다. PDW 배치는 여러 개의 레이더에서 송출된 PDW들이 섞여 있다. 군집화 과정에서 군집을 형성한 레이더 신호는 식별할 수 있지만 군집 조건을 충족하지 못한 레이더 신호는 식별할 수 없는 단점이 있다. 그리고 PDW 배치 단위로 처리하기 때문에 레이더 신호 인식 과정의 실시간성이 떨어지는 단점도 있다.

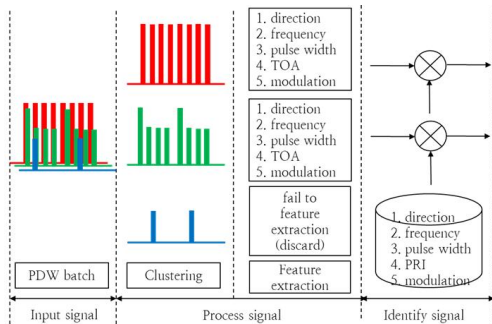


Fig. 1. Batch style radar signal processing

논문은 PDW 펄스에 대한 스트리밍 처리(streaming process) 방법을 제안한다. 이 방법은 PDW 배치를 만들지 않는다. PDW 펄스가 하나 생성될 때마다, 군집이 만들어지는지 검사하고, 군집이 형성된 PDW 펄스열에 대하여 즉시 PRI를 추출한다. 이 방법은 PDW 배치를 만드는 과정을 수행하지 않기 때문에 실시간성이 개선되고, 배치 처리 방식에서 인식하지 못하는 주기가 긴 PRI를 가진 신호도 인식할 수 있는 장점이 있다.

## 2. PDW 배치 처리 과정

레이더 신호 식별 과정은 일반적으로 Fig. 1과 같이

데이터 수집, 특성 추출, 신호 식별로 구성된다.

레이더 신호 수신부에서 레이더 펄스를 PDW로 변환하고, 이것을 모아 처리 단위인 PDW 배치를 형성한다. PDW는 방향(direction), 반송 주파수(frequency), 펄스폭(pulse width), 펄스도착시간(TOA, Time of Arrival), 변조 방식(modulation)과 같은 레이더 펄스의 속성이다. PDW 배치는 특성이 다른 여러 개의 레이더에서 송출된 PDW들과 잡음으로 구성되어 있다.

군집화 단계는 기본적으로 신호 특성에 대한 k-means 알고리즘을 기반으로 한다. 입력 데이터 집합은 크기가  $N$ 인 PDW 배치  $\{PDW_1, PDW_2, \dots, PDW_N\}$ 이다. 이에 대하여 거리를 계산하여  $k$ 개의 군집(cluster)  $\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ 를 구한다. 군집화 기법은 특성 벡터를 적용하는 방법과 거리 척도에 따라 순차 히스토그램[6,12], 연속 스캔 기법[3], 적응형 윈도우 기법[4]등이 있다. 일반적으로 레이더 신호의 PRI에 따라 각 군집에 속하는 PDW의 수가 결정된다. PRI가 짧으면 군집에 속하는 펄스 수가 많고, PRI가 길면 군집에 속하는 펄스 수가 적다.

군집화 다음은 펄스 특성을 추출하는 단계이다. 이 단계에서는 군집에 속하는 펄스열을 대상으로 펄스 도착시간(TOA, Time of Arrival)을 분석하여 PRI 유형(PRI type)을 구한다. 이 과정에서 군집에 속하는 PDW 펄스 수가 특성 추출에 필요한 수보다 적을 때, 그 군집은 특징을 추출할 수 없어 버려진다. PRI 유형의 종류[7-9,14]는 고정주기의 펄스가 반복되는 고정(stable), 일정패턴의 주기가 반복되는 스테거(stagger), 불규칙한 주기패턴을 반복하는 지터(jitter)가 있고, 그 속성으로 펄스반복간격(pulse repetition interval)이 있다. PRI 검출 기법은 순차 탐색(Sequential Search)[3,5], 도착 시간 차이(DTOA, Difference of TOA) 히스토그램(자기상관 식별 기법)[7,14], 주파수 영역으로 처리하는 PRI 변환 방법[11,13,14]이 있다. 이 단계는 PDW 데이터에 있는 레이더 펄스에 대한 방향, 주파수, 펄스폭과 PRI 유형과 변조 방법을 출력한다.

마지막 신호 식별 과정은 기존 레이더 펄스 특성에 대한 라이브러리와 신호 처리 단계의 출력을 비교하여 활동 레이더를 식별한다. 라이브러리에 등록된 것은 식별한 레이더로 운영자에게 보고하고, 등록되지 않은 것은 검출되었으나 알지 못하는 레이더로 보고한다.

PDW 배치 단위 처리 알고리즘의 단점은 다음과 같다. 군집화/PRI 추출 조건을 만족하지 못하는 경우 다음 단계를 진행하지 못하고 PDW 펄스열이 버려진다. 따라서 PRI가 긴 레이더 신호를 인식하지 못할 가능성이 크다. PDW 배치 단위로 신호를 처리하기 때문에, PDW의 누적 특성을 활용하지 못한다.

PDW 배치 데이터가 형성될 때까지 기다린다. 따라서 실시간 처리 가능성이 낮아진다.

### 3. 스트리밍 신호 처리

#### 3.1 스트리밍 처리 구조

Fig. 2는 스트리밍 방식으로 레이더 신호를 처리하는 과정을 보여준다. 제안하는 방법은 레이더 신호 수신부에서 생성한 PDW를 하나씩 처리한다. PDW가 입력되면 분류기(classifier)는 동적으로 PDW를 군집화한다.

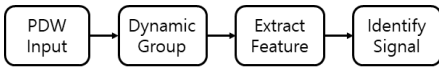


Fig. 2. Streaming style radar signal process.

기존 군집과의 거리를 계산하여 거리가 임계치보다 작으면 해당 군집에 할당하거나, 임계치보다 작은 군집이 없다면 새로운 군집을 생성한다. 처리기(processor)는 군집에 속하는 PDW 수가 일정 수 이상인 군집에 대하여 신호 특성을 추출한다. 이 과정은 TOA에 대한 상관관계를 누적하고, 펄스열에 대한 프레임 PRI( $P_F$ , Frame PRI)를 구하고, PRI 유형을 결정한다. 군집에 속하는 PDW 수가 많아질수록 분석 결과가 정확해지는 효과를 기대할 수 있다.

#### 3.2 동적 군집화

스트리밍 방식의 동적 분류기는 알고리즘(1)과 같이 동작한다. 처리 신호 수신부에서 PDW를 생성할 때마다 기존 군집에 배정할 것인지, 아니면 새로운 군집을 형성할 것인지 판단한다. PDW와 군집 간의 유클리디언 거리를 식(1)로 계산한다.  $f_{PDW}$ 는 입력 PDW의 주파수이고,  $\overline{f_G}$ 는 군집의 중심 주파수이다.  $pw_{PDW}$ 는 입력 PDW의 펄스폭이고,  $\overline{pw_G}$ 는 군집의 중심 펄

스폭이다. 같은 그룹으로 판정하는 정규화 요소( $F$ 와  $PW$ )로 나누어 거리를 구한다.

$$d = \sqrt{\left(\frac{f_{PDW} - \overline{f_G}}{F}\right)^2 + \left(\frac{pw_{PDW} - \overline{pw_G}}{PW}\right)^2} \quad (1)$$

각 입력 PDW와 기존 군집과의 거리를 계산하고, 거리가 임계치( $TH_{distance}$ )보다 작으면 그 군집에 입력 PDW를 배정한다. 그리고 군집의 크기(즉, 군집에 배정된 PDW의 수)가 임계치( $TH_{size}$ )보다 크면, 그 즉시 특성을 추출한다. 만일 입력 PDW가 어떤 PDW 군집에도 배정되지 않는다면, 새로운 군집을 추가한다.

Algorithm 1. Dynamic clustering

```

input: PDW
output: list of cluster.
Algorithm
1) for each of PDW cluster
2)   calculate the distance between PDW and
   cluster center.
3)   if distance <  $TH_{distance}$ ,
4)     assign PDW to cluster.
5)     if size of cluster >  $TH_{size}$ ,
6)       process cluster.
7) if PDW does not assigned to any cluster
8)   make a new cluster.
9)   assign PDW to this cluster.
  
```

각 군집의 상태는 ①검출(detected), ②활동(active), ③정지(sleep) 중 하나입니다. 새로운 PDW가 검출되면 군집이 만들어지고 그 군집은 ①검출 상태이다. 검출 상태에서 계속 같은 특징의 PDW가 추가되어 군집의 크기가 임계치( $TH_{size}$ )보다 커지면, ②활동 상태로 변하고, 활동 상태인 군집에 대하여 군집의 특성을 추출한다. 군집의 검색시간을 줄이기 위해 일정 시간 동안 군집에 속하는 PDW가 입력되지 않는다면, 그 군집은 ③정지 상태로 변한다. 정지 상태에서 다시 PDW가 입력되면 활동 상태로 변한다. 만일 정지 상태에서 일정 시간 동안 PDW가 입력되지 않는다면, 그 군집은 관리 리스트에서 제거된다.

### 3.3 특성 추출

특성 추출 단계에서는 군집에 대한 프레임 PRI와 스택기 단수를 구한다. PRI를 구하는 방법 중 하나가 DTOA 히스토그램이다. 군집에 속한 펄스열에 대한 자기상관함수(autocorrelation)로 DTOA 히스토그램을 구할 수 있고[14], 이것으로부터 PRI를 구할 수 있다. 군집에 속한 PDW 수가  $N$ 이고,  $k$ 번째 펄스의 도착시간을  $\delta(t_k)$ 라고 할 때, 시간 간격이  $\tau$ 인 DTOA 히스토그램  $h(\tau)$ 는 식(2)와 같다.

$$h(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-n-1} \delta(t_n - t_k - \tau) \quad (2)$$

식(2)는  $N$ 개의 PDW 전체를 대상으로 자기상관함수를 계산한다는 것과 경계 효과(boundary effect)에 따라 상관관계 계산에 사용되는 펄스 수가 하나씩 줄어든다는 단점이 있다. 레이더 펄스의 최대 스택기 단수를  $S(S \ll N)$ 로 제한한다면, 식(2)를 개선할 수 있다. 실제로 필요한 것은  $S$ 차 차분이지만, 펄스열에 샘플링 오차가 포함될 수 있으므로 DTOA 히스토그램을  $S$ 의  $K(K$ 는 작은 정수)배만큼 구한다.  $S_K = K \times S$  ( $S_K \ll N$ )라고 하자. 이와 같이 제한할 때, DTOA 히스토그램 공식은 식(3)과 같다.

$$h(\tau) = \sum_{n=0}^{N-S_K} \sum_{k=0}^{S_K-1} \delta(t_n - t_k - \tau) \quad (3)$$

Fig. 3은 주기가 식(2)로 구한 4단 스택기 펄스열에 대한 DTOA 히스토그램이다. 프레임 PRI는 200이다. 프레임 PRI는 스택기 펄스의 반복 주기이다. DTOA 히스토그램은 프레임 PRI에서 피크 값을 갖는다. 누락 및 삽입 잡음이 없을 때 프레임 PRI의 하모닉스에서 히스토그램의 피크 값이 반복해서 나타난다.

Fig. 4의 화살표상  $\tau$ 는 의 시간 간격이다. Fig. 4의 DTOA 히스토그램은  $\delta$ 함수가 0일 때 1을 갖는 성질을 이용해  $\delta$ 함수  $t_{ref+k} - t_{ref}$ 와  $\tau$ 의 차이가 같은 성질을 이용해 시간  $\tau$ 인 신호의 히스토그램  $h(\tau)$ 를 계산한다.

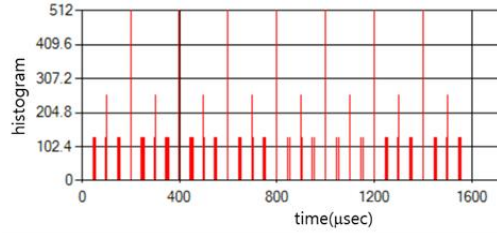


Fig. 3. DTOA histogram of 4-stage stagger signal

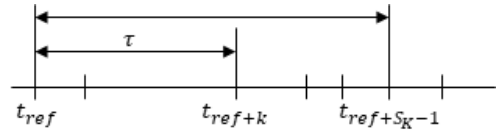


Fig. 4. Dynamic DTOA histogram

식(2)와 식(3)은  $N$ 개의 PDW를 대상으로 한 DTOA 히스토그램 공식이다. 이것을 스트리밍 형태로 개선할 필요가 있다. 알고리즘(1)의 라인 6)에서 군집이 형성되면 군집을 처리한다. 군집 크기  $TH_{size}$ 는  $S_K$ 와 같다. 군집 속한 펄스열의 첫 번째 펄스의 도착 시간이  $t_{ref}$ 이다.  $t_{ref}$  군집에 새로운 펄스가 마지막에 추가되고 첫 번째 펄스는 제거된다. 군집에 PDW가 한 개 추가될 때마다 식(4)로 DTOA 히스토그램을 구한다.

$$h(\tau) = \sum_{k=0}^{S_K-1} \delta(t_{ref+k} - t_{ref} - \tau) \quad (4)$$

식(4)는 Fig. 4와 같이  $t_{ref}$ 를 기준으로  $S_K$ 개의 PDW에 대한 히스토그램을 구한다. 그리고 식(3)의 이중 루프가 단일 루프로 단순해진다.

스트리밍 처리에 의한 특성 추출 과정은 알고리즘(2)와 같다. 군집에 대한 새로운 PDW가 추가될 때마다 식(4)를 계산한다. 그리고 군집의 크기가  $2 \times TH_{size}$ 보다 크면, 그때까지 구한 DTOA 히스토그램을 기반으로 프레임 PRI(Frame PRI)와 스택기 단수를 구한다.

스트리밍 처리 방법으로 구한 DTOA 히스토그램의 특징은 다음과 같다.

$h(0)$ 은 군집의 크기(군집에 속하는 PDW의 수)이다. 항상  $S_K$ 개의 펄스열에 대하여 히스토그램을 계산하므로, 경계선 효과가 생기지 않는다.

만일 샘플링 오차와 잡음이 없다면, 프레임 PRI  $P_F$ 와 그 하모닉스에서 히스토그램 뜻수는  $h(0)$ 와 같고,

그 값은 DTOA 히스토그램 계산에 사용된 PDW의 수와 같다.

Algorithm 2. Dynamic process

input: PDW  
output: DTOA histogram, frame PRI, and number of stagger stages.  
Algorithm  
1) calculate  $h(\tau)$  according to the equation (3).  
2) if size of cluster  $> 2 \times TH_{size}$ ,  
3) decide frame PRI by concentration ratio  
4) decide stagger stages by equation (7)

$$h(0) = h(P_F) = h(2P_F) = \dots = N - S_k \quad (5)$$

식(5)를 만족하는 최소의  $k$ 가 프레임 PRI이다. 이 지수를 집중도(concentration ratio,  $R_F$ )라고 정의한다.

$$R_F = h(P_F)/h(0) = 1 \quad (6)$$

만일 잡음이 있다면, 집중도  $R_F$ 는 1보다 작지만 1에 가까운 값이다. 이때는 임계치를 사용하여 프레임 PRI를 구한다.

만일 군집에 잡음이 포함되어 있지 않고 스테저 단수를  $s$  ( $s \leq S$ )로 가정한다면,  $n$  ( $n < s$ )차 DTOA 히스토그램의 합은  $h(0)$ 와 같다. 프레임 PRI까지 DTOA 히스토그램의 합은  $h(0)$ 의  $n$ 배이다. 식(7)을 스테저 단수의 판정인수(decision factor)로 정의한다.

$$s = \left( \sum_{\tau=1}^{P_F} h(\tau) \right) / h(0) \quad (7)$$

잡음이 없을 때, 식(7)로 계산한 판정인수는 스테저 단수와 같다. 잡음이 있을 때, 천장함수(ceiling function)로 스테저 단수를 결정한다.

$$s = \left\lceil \left( \sum_{\tau=1}^{P_F} h(\tau) \right) / h(0) \right\rceil \quad (8)$$

군집의 크기가 증가할수록 DTOA 히스토그램의 신뢰성이 높아진다. 따라서 잡음이 있더라도 시간이 지날수록 프레임 PRI를 더 정확하게 예측할 수 있다.

#### 4. 성능 비교 및 실험

이 절에서는 동적 군집화의 효과와 PRI 판정 과정을 제시한다. 먼저 혼합신호를 생성하여 동적 군집과 신호 판정 시기를 분석한다.

실험에는 (표 1)과 같이 세 가지 신호와 잡음이 포함된 혼합신호를 사용했다. 배치형 처리와 스트리밍 처리의 효과를 알아보기 위해 평균 DTOA가 짧은 군집1, 중간인 군집2, 그리고 긴 군집3을 혼합했다. PDW 512개 단위로 배치 처리한다면, 한 개의 배치에 군집1은 약 500여개, 군집2는 약 10개, 그리고 군집3은 약 5개의 펄스가 포함된다. 그러므로 배치 처리에서는 군집1을 제외한 나머지는 추출하지 못하는 현상이 발생한다.

Table 1. Characteristics of mixed signals

Cluster	Frequency	Pulse Width	Avg DTOA
Cluster1 (1step)	8 GHz	1.0 $\mu$ sec	10 $\mu$ sec
Cluster2 (8step)	9 GHz	1.5 $\mu$ sec	496 $\mu$ sec
Cluster3 (1step)	10 GHz	2.5 $\mu$ sec	1,030 $\mu$ sec

Table 2. Cluster and extraction time

Cluster	Clustering Time	Feature Extraction
Cluster1 (1step)	33 (316 $\mu$ sec)	66 (666 sec)
Cluster2 (8step)	1958 (20,166 $\mu$ sec)	3978 (40,846 $\mu$ sec)
Cluster3 (1step)	4060 (41,696 $\mu$ sec)	8216 (84,507 $\mu$ sec)

스트리밍 처리 방법에서 3.3절에서 제시한 최대 스테저 단수  $S=8$ , 군집의 크기  $S_k=32$ 라고 정하고, 군집의 크기가 64일 때 군집의 특성을 추출한다. 최대 스테저 단수를 기준으로 최소 8주기의 데이터가 모인 후 특성을 분석하도록 이와 같이 정했다. (표 2)는 군집형성 시기와 특성 추출 시기를 혼합신호의 PDW 수와 시간으로 표현한 것을 보여준다. 스트리밍 방식은 군집의 평균 DTOA의 편차가 심한 펄스열이 섞여 있더라도 신호의 특성을 추출할 수 있음을 보여준다.

이번에는 스트리밍 처리 방식에서 PRI를 인식하는 과정과 그 효과를 검증하기 위하여 실험한 과정과 결과를 제시한다. 실험에 사용한 파라미터는 다음과 같다.

최대 스테저 단수  $S=8$ 로 가정한다. DTOA 히스토그램을 구하기 시작하는 군집의 크기는 32이다. 군집의 크기가 64이상일 때부터 특성을 추출한다.

실험에 사용하는 군집의 PDW 수는 544개이다. 그 이후는 신호특성의 변화가 없기 때문이다. 프레임 PRI가 200인 4단 스테저와 410인 8단 스테저 펄스열을 사용한다. 프레임 PRI 자체는 성능과 관련이 없고, 최대 단수로 가정된 8단 스테저가 잡음의 영향을 가장 많이 받는다.

0%부터 2%씩 10%까지 잡음을 추가한다. 잡음의 받은 누락 펄스이고 받은 추가 펄스이다.

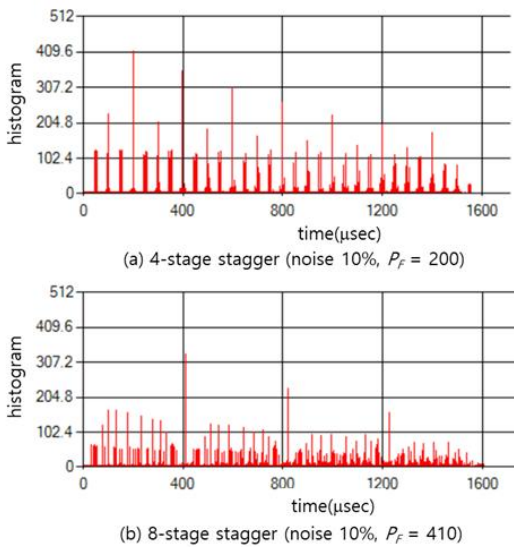


Fig. 5. DTOA histogram

실험을 통하여 다음 두 가지를 분석한다.

식(6) 집중도( $R_F = h(k)/h(0)$ )의 변화

식(7) 스테저 단수 판정인수(s)의 변화

Fig. 5는 잡음이 10%일 때 군집의 PDW를 모두 처리한 후 DTOA 히스토그램을 제시한 것이다. 히스토그램의 최대치가 나타나는 곳이 프레임 PRI  $P_F$ 이다. 프레임 PRI에서 최대점을 형성하는 것을 확인할 수 있다. 잡음으로 인하여  $P_F$ 의 하모닉스에서 히스토그램 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 실험 데이터에 대한 집중도와 판정인수의 변화를 보여준다. 가로 축은 DTOA 히스토그램을 구하는데 사용된 PDW 수이다. PDW 수가 적을 때는 불안

한 값을 보이다가 PDW 수가 증가하면서 안정적인 결과를 보여주고 있다.

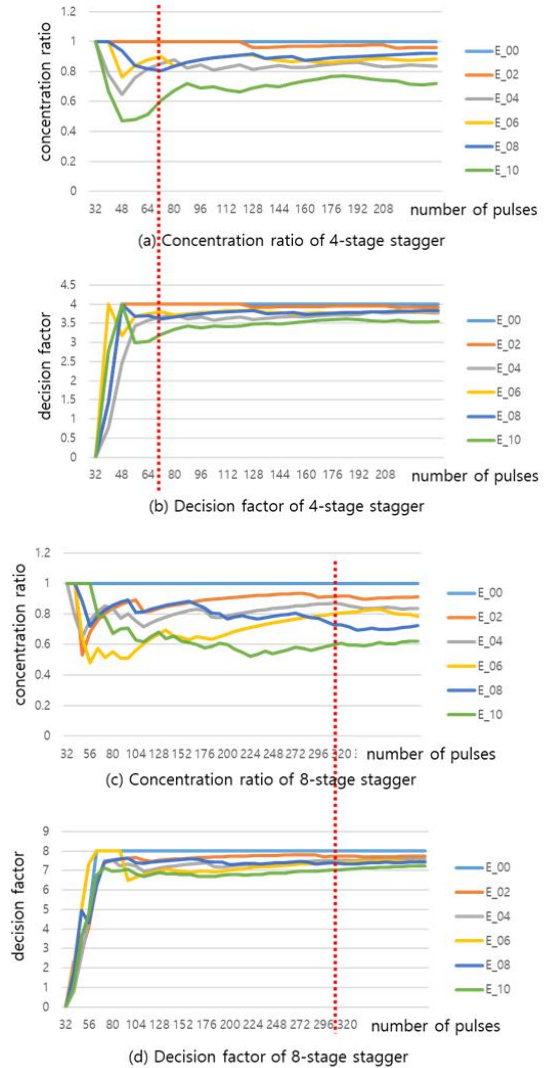


Fig. 6. Concentration ratio and stagger decision factor

잡음 비율이 10%일 때, 4단 스테저는 PDW가 72개 이상부터 식(8)의 판정인수 값이 4로 결정되어 안정적으로 4단 스테저로 판정한다. 8단 스테저는 PDW가 304개 이상부터 식(8)로 계산한 판정인수가 8이 되어 8단 스테저로 판정한다. 이때의 집중도는 0.6 정도이다.

### 5. 결론

논문은 스트리밍 처리에 의하여 레이더 신호 특성을

분석하는 방법을 제안했다. 기존 방법은 배치 단위로 군집화, 특성 추출, 신호 식별을 처리하므로, 군집에 속하는 PDW 수에 따라 특성 인식 결과의 신뢰성이 다르다. 심지어 군집을 제대로 형성하지 못하는 경우에 특성을 추출하지 못하는 단점이 있다. 스트리밍 처리 방식은 신호처리부에서 PDW를 생성할 때마다 동적으로 군집을 형성하고, 군집에 대한 DTOA 히스토그램에서 집중도에 의해 프레임 PRI를 구하고, 스테거 단수를 구하는 알고리즘을 제안했다. 실험에 의하여 잡음이 있는 환경에서도 군집에 속하는 PDW 수가 증가할수록 점차적으로 안정된 분석 결과를 나타낸다는 것을 입증했다.

연구 결과를 실무에 적용하기 위하여 펄스도착시간의 샘플링 오차에 대한 대책이 필요하다. 그리고 레이더 신호의 스테거 단수까지 구하였으나, 프레임 PRI를 구성하는 펄스들의 도착시간 간격을 파악하여 레이더 신호 패턴을 분류하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

## REFERENCES

- [1] D. R. Wilkinson & A.W. Watson, (1985). Use of metric techniques in ESM data processing, *IEE proceedings on F Communications radar and signal processing*, 132(4), 229-232.  
DOI : 10.1049/ip-f-1.1985.0055
- [2] H. K. Mardia, (1998). Adaptive Multi-Dimensional Clustering for ESM. In *IEE Colloquium on signal processing for ESM systems* (pp. 5-1). IET.
- [3] D. W. Lee, J. W. Han & W. D. Lee, (2008). Adaptive radar pulses clustering based on density cluster window. In *ITC-CSCC: International Technical Conference on Circuits Systems, Computers and Communications* (pp. 1377-1380).
- [4] J. W. Han, K. H. Song, D. W. Lee & S. C. Lye, (2007). A novel clustering algorithm of radar pulses based on the adaptive cluster window, *International Symposium on Computer and Information Sciences*.
- [5] H. K. Mardia, (1989). New technique for the deinterleaving of repetitive sequence, In *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)* (Vol. 136, No. 4, pp. 149-154). IET Digital Library.  
DOI : 10.1049/ip-f-2.1989.0025.
- [6] Y. W. Kim & H. W. Yang, (2002). An Algorithm for Estimating Pulse Repetition Intervals of Stagger PRI Pulse Train Using 2D-TDOA Histogram, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 8(8), 673-681.  
DOI : 10.5302/J.ICROS.2002.8.8.673
- [7] Y. J. Ryu, K. H. Song & W. W. Kim, (2007). Recognition of PRI modulation types of radar signals using the autocorrelation, *IEICE transactions on communications*, 90(5), 1290-1294.  
DOI : 10.1093/ietcom/e90-b.5.1290
- [8] J. S. Lim, K. H. Hong, G. S. Jun, S. C. Moon, C. J. Lee & S. H. Suh, (2008). Analysis of PRI Pattern with the Second Deviation of LASER Pulse Train, *The Journal of the Korea Contents Association*, 8(4), 63-70.  
DOI : 10.5392/JKCA.2008.8.4.063
- [9] J. S. Lim, K. H. Hong, D. Y. Lee, D. H. Shin & Y. H. Kim, (2009). A De-interleaving Method of Frequency Agility Radar Signals in Comparison with PRI's of radars. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 10(8), 1832-1838.  
DOI : 10.5762/KAIS.2009.10.8.1832
- [10] J. S. Lim, K. H. Hong, D. Y. Lee, D. H. Shin & Y. H. Kim, (2009). An Identify of Two Step Stagger Signals Using the Second Deviation of Pulse Train, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 10(7), 1536-1541.  
DOI : 10.5762/KAIS.2009.10.7.1536
- [11] Y. K. Ju & J. N. Jeon, (2020). Extraction of Pulse Repetition Interval for Radar Signals Using Kernel Function based DTOA Histogram, *The Institute of Electronics and Information Engineers*, 57(2), 81-87.  
DOI : 10.5573/ieie.2020.57.2.81
- [12] J. T. Lee, Y. K. Ju, G. T. Kim & J. N. Jeon, (2014). A Clustering Technique of Radar Signals using 4-Dimensional Features. *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 51(10), 137-144.  
DOI : 10.5573/ieie.2014.51.10.137
- [13] S. H. Park, Y. K. Ju, G. T. Kim & J. N. Jeon, (2016). A Detection Algorithm for Pulse Repetition Interval Sequence of Radar Signals based on Finite State Machine, *The Institute of Electronics and Information Engineers*, 53(7) 85-91,  
DOI : 10.5573/ieie.2016.53.7.085
- [14] G. T. Kim, Y. K. Ju & J. N. Jeon, (2018). A Detection Algorithm for Modulation Types of Radar Signals Using Autocorrelation Comparison Ranges, *Journal of Convergence for Information Technology*, 8(5), 137-143.,  
DOI : 10.22156/CS4SMB.2018.8.5.137

김 관 태(Gwan-Tae Kim) [정회원]



- 2011년 8월 : 충북대학교 컴퓨터 과  
학과 석사
- 2020년 2월 : 충북대학교 컴퓨터과  
학과 박사
- 관심분야: 실시간 신호처리, 전자전  
신호탐지
- E-Mail : gtkima@naver.com

주 영 관(Young-Kwan Ju) [정회원]



- 1999년 2월: 청주대학교 컴퓨터정  
보공학과 학사
- 2004년 2월: 충북대학교 전자계산  
학과 석사
- 2009년 2월: 충북대학교 전자계산  
학과 박사
- 충북대학교 전자정보대학 초빙교수
- 관심분야 : 임베디드 시스템, 안드로이드, 클라우드 컴퓨  
팅 등
- E-Mail : juyoungkwan@gmail.com

전 중 남(Joongnam Joen) [정회원]



- 1990년 연세대학교 전자공학과 박  
사
- 1996~1998년 미국 Texas A&M  
연구교수
- 충북대학교 전자정보대학 교수
- 컴퓨터정보통신 연구소 연구원
- 관심분야: 컴퓨터구조, 임베디드 시스템, 신호처리
- E-Mail : joongnam@cbu.ac.kr