

# 자기상관 비교 범위를 활용한 레이더 신호의 펄스 변조 형태 검출 알고리즘

김관태, 주영관, 전용남\*  
충북대학교 전자정보대학 소프트웨어학과

## A Detection Algorithm for Modulation Types of Radar Signals Using Autocorrelation Comparison Ranges

Gwan-Tae Kim, Youngkwan Ju, Joongnam Jeon\*  
Department of Computer Science, Chungbuk National University

요 약 일반적으로 레이더는 신호 탐지를 회피하기 위해 신호를 변조해 송신한다. 전자전에서는 수신된 레이더 펄스를 분석하여 신호를 방사한 레이더의 체원을 식별한다. 본 논문에서는 자기상관계수를 활용하여 레이더 신호 변조 형태를 식별하는 알고리즘을 제안한다. 레이더 신호의 펄스반복주기 특성에 따라 자기상관을 계산할 때 비교 범위를 다르게 적용한다. 고정 펄스반복주기와 스테거 펄스반복주기에 대하여 좁은 오차 범위를 적용하고, 지터 펄스반복주기에는 넓은 오차 범위를 적용하여 자기상관계수를 계산한다. 실험에 의하여 제안하는 알고리즘은 고정 펄스반복주기, 스테거 펄스반복주기, 지터 펄스반복주기를 정확하게 구분함과 동시에 스테거의 레벨도 정확히 찾을 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 자기상관, 펄스반복주기, 고정 PRI, Stagger PRI, Jitter PRI, PDW

**Abstract** Generally, a radar signal is modulated and transmitted in order to avoid signal detection. In electronic warfare, the specification of a radar is recognized by analysing the received radar pulses. In this paper, we propose an algorithm to recognize the PRI (Pulse Repetition Interval) type of radar signals. This algorithm uses the autocorrelation technique applying different comparison ranges according to the PRI type. It applies a short comparison window to stable and staggered PRI, and a relatively large comparison range to jittered PRI. The experiment shows that the proposed algorithm can discriminate the PRI type of radar pulses correctly. For the more, it can find out the stagger level of staggered type of radar signals.

**Key Words** : Autocorrelation, PRI(Pulse Repetition Interval), Fixed PRI, Stagger PRI, Jitter PRI ,PDW(Pulse Description Word)

### 1. 서론

전자전 지원 시스템(Electronic Warfare Support System)은 레이더 신호를 탐지하여, 신호를 방사한 신호원의 체원을 식별하여 피아를 구분하는 기능을 수행함으로써 무기체계에서 승패의 좌우하는 중요한 요소가 되고 있다 [1]. 근래의 레이더 시스템은 레이더 신호에 대한 노출을 최소화하기 위해 방사 신호의 펄스 형태를 변조하고 있

다. 이러한 레이더 시스템을 인식해야하는 전자전 지원 시스템은 다양한 신호 변조 형태(Signal Modulation Type)를 검출하여 피아 식별을 수행해야 한다[1,2,3]. 초기의 레이더의 방사 신호는 아주 단순한 형태의 신호 변조를 사용했으나, 최근 레이더의 방사 신호는 복잡한 형태의 PRI(Pulse Repetition Interval) 패턴을 사용하고 있다. 레이더의 복잡한 PRI를 검출하는 대표적 관련 연구를 살펴보면, PRI의 인식을 위해 통계적 히스토그램, 신

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

Received September 18, 2018  
Accepted October 20, 2018

Revised October 2, 2018  
Published October 31, 2018

경망, 자기상관 기법 등을 활용하고 있다[7-10,12-13].

기존의 연구[7-10,12-13]에서 PRI 변조를 검출하는 기법들은 수집한 신호를 기반으로 통계를 추출하기 위해 많은 데이터를 요구하고, 많은 데이터를 처리하기 위해 많은 시간을 필요로 한다.

본 연구에서는 기존 펄스반복주기 연구에서 시도되지 않은 자기상관 기법의 변형된 형태와 간단한 통계 기법을 병합한 새로운 PRI 검출 알고리즘을 제안한다. 이 방법은 기존의 알고리즘에 비해 적은 펄스를 사용해 정확한 PRI 변조 형태를 검출할 수 있어, 보다 더 신속하고 정확한 레이더 식별을 가능하게 만든다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 통계를 이용한 히스토그램 검출[7,8,10]

PRI 형태는 시간 순서대로 정렬된 펄스열을 대상으로 직전 PDW와 현재 PDW의 도착 시간 차이(DTOA: Difference Time of Arrival)로 계산하여 펄스 간격별로 누적된 형태를 분석하여 찾는다. 고정 PRI는 DTOA가 모두 동일한 펄스간격 값을 갖고 있어 Fig. 1(a)와 같이 DTOA 누적히스토그램에 한 개의 성분만 표시된다. 스테거 PRI(Stagger PRI)는  $n$  개의 DTOA가 주기적으로 반복하여 Fig. 1(b)과 같이  $n$  개의 펄스간격 값이 균등하게 누적된다. 지터 PRI(Jitter PRI)는 일정한 패턴이 없고, 기준 DTOA를 중심으로  $\pm$  변위값( $\delta$ )을 더한 펄스간격 값으로 표시된다. 지터의 DTOA 누적히스토그램은 기준  $\text{DTOA} \pm \delta$  만큼의 여러 펄스간격이 분산되어 Fig. 1(c)과 같이 누적된다.

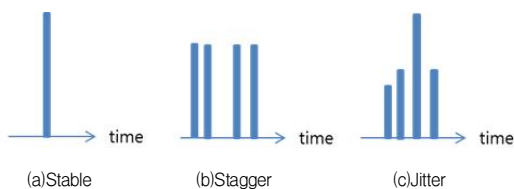


Fig. 1. PRI Patterns and DTOA histograms

CDIF(Cumulative Difference Histogram)와 SDF(Sequential Difference Histogram) 히스토그램[4] 기법은 펄스열의 첫번째 TOA (Time Of Arrival)에서 마지막 TOA까지 차분 레벨을 증가시키면서 히스토그램을

만든 후 각 차분 레벨에서 구해진 히스토그램 값과 정의된 문턱값을 비교하여 PRI 변조를 검출하였다.

### 2.2 신경망 응용 PRI 검출 기법

신경망을 이용한 은닉마코프모델 기반 PRI 변조 형태 검출은 레이더 신호의 펄스의 TOA(Time Of Arrival) 정보를 이용하여 가속도 코드를 생성하고, 그 가속도 코드를 각 변조형태별 설계된 은닉마코프모델(HMM)에 적용하여 PRI 형태를 검출하는 기법이다[10]. PRI 변조 형태로 SVM(Support Vector Machine)을 생성하고, SVM을 PRI 형태별로 훈련시킨다. 이후 수집된 펄스의 TOA(Time Of Arrival) 정보로부터 특징벡터를 추출하고, 추출된 특징벡터를 SVM에 입력하여 PRI 형태를 검출하는 기법이다[12]. 신경망을 이용한 PRI 변조형태 검출기법은 수집한 신호의 펄스도착시간의 차분과 signum 함수로 누적 합을 생성하고, 일부는 후전파(back-propagation)에 의한 다층 퍼셉트론(Multi-layer Perceptron)에 입력되도록 신경망을 구성하여 학습된 PRI 구분인자에 가까운 PRI 변조 형태를 인식한다. 신경망을 이용한 기법에는 은닉마코프모델 기반 PRI 인식, SVM(Support Vector Machine) 기반 PRI 인식 기법이 있고, 이러한 신경망 기법은 각각의 PRI 변조 특성에 대한 충분한 정보와 학습에 많은 시간이 필요하다.

### 2.3 자기상관 기법(Autocorrelation Method)

자기상관 기법을 활용한 PRI 변조형태 검출 기법[6]은 펄스반복주기가 배수마다 피크가 형성되는 주기성을 갖는 특징을 이용해 RPI 형태를 구분하였다. Jitter PRI가 아닌 경우에는 가장 큰 피크에 해당하는 인덱스와 PRI 순서를 활용해 PRI 변조주기를 추정하고 특정 배수에서 피크가 반복되는지를 조사해 변조형태를 검출한다. PRI 변조 형태 검출 기법은 자기상관 관계를 활용해 신호의 주기성을 찾을 수 있을 정도로 많은 신호를 제공해야한다. 이때 필요한 신호는 적어도 1000개 이상의 신호를 필요로 하였다.

## 3. PRI 형태 검출 알고리즘

### 3.1 PRI별 자기상관 계수

제안하는 알고리즘은 PDW(Pulse Description Word)

의 그룹이 완성된 후, 그룹에 저장된 PDW 배열을 활용하여 PRI 형태를 구분한다. 이 논문에서 다루는 PRI 형태는 고정 PRI, 스테저 PRI, 지터 PRI로 정하였고 스테저는 8단, 지터율은 15%로 범위를 한정하였다. 자기상관 계수는 일반적으로 두 개의 펄스가 일치하는 정도를 나타내는 확률로 사용되고 있다. 이 논문에서는 두 개의 펄스열 중 펄스가 일치하는 개수를 계산한 값으로 정의한다. 이 절에서는 고정 PRI, 스테저 PRI, 지터 PRI의 자기상관 계수의 계산을 설명한다. 고정 PRI의 자기상관 계수는 두 개의 펄스열을 놓고 한 펄스 간격만큼 시간을 오른쪽으로 이동하고 같은 시간(위치)에 위치하는 펄스를 센다. Fig. 2는 첫 펄스에서 시작해서 변위값( $\delta$ ) 8인 펄스열 8개를 표시한 고정 PRI 이다.

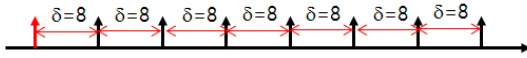


Fig. 2. Fixed PRI Pulse Train

Fig. 3(a)는 자기상관 계수인  $C$ 와 괄호안의 18는 변위 8만큼을 한번 시간 이동한 것을 의미하고 우측에 숫자는 자기상관 계수를 의미한다. Fig. 3의 시각형은 펄스의 오차를 고려해 같은 펄스로 인식하는 범위를 표시한 것이다. 고정 PRI의 오차범위를  $\pm 1\%$ 로 설정한다. Fig. 3(a)은 8만큼 한번 이동(18)한 경우 펄스가 같은 시간에 겹치는 자기상관계수가 7로 나타나고, Fig. 3(b)는 8만큼 두번 이동(26)한 경우 자기상관 계수가 6으로 나타난다. Fig. 3(c)는 8만큼 세번 이동(36)한 경우 자기상관 계수가 5로 나타난다.

고정 PRI에 잡음 성분이 포함된 신호의 경우에는 정해진 간격을 이루는 펄스열은 자기상관 계수가 큰 값을 갖고 잡음 성분은 자기상관계수가 작은 값을 갖는다.

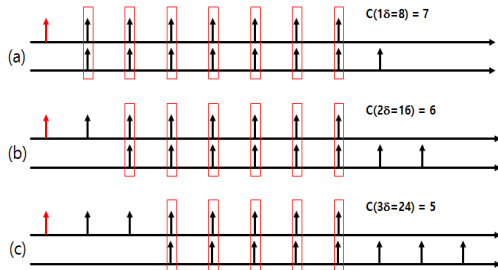


Fig. 3. Fixed PRI Autocorrelation Coefficient

Fig. 4(a)는 잡음이 포함된 고정 PRI 신호를 도시한 것이다. Fig. 4(b)는 잡음 성분인 펄스를 기준으로 자기상관계수를 계산한 예로 첫 펄스만 시간이 중첩되고 나머지 펄스는 중첩되지 않아 자기상관계수가 1로 나타난다. Fig. 4(c)는 고정 PRI의 정상 자기상관 계수를 갖는다.

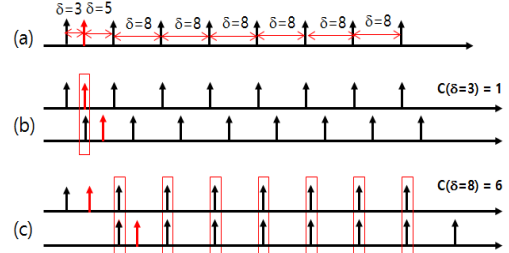


Fig. 4. Fixed PRI With Noise Autocorrelation Coefficient

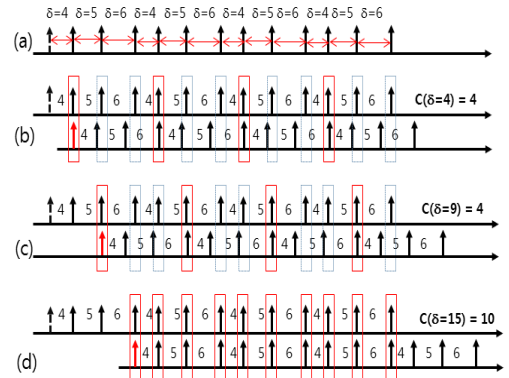


Fig. 5. Stagger PRI Autocorrelation Coefficient

스테저 PRI는 몇 개의 변위( $\delta$ )가 반복되는 특징이 있다. Fig. 5(a)가 4, 5, 6변위( $\delta=4, 5, 6$ )를 갖는 펄스로 구성된 스테저 PRI를 나타낸 것이다. Fig. 5(b)은 첫 번째 변위( $\delta=4$ )만큼 이동해 자기상관 계수를 계산해 4로 표시된다. Fig. 5(c)는 변위( $\delta=4, \delta=5$ )만큼 이동해 총 변위( $\delta=9$ )가 되고, 변위( $\delta=9$ )만큼 이동한 펄스열의 자기상관 계수는 4로 표시된다. Fig. 5(d)는 변위( $\delta=4, \delta=5, \delta=6$ )만큼 이동해 총 변위( $\delta=15$ )가 되고, 변위( $\delta=15$ )만큼 이동한 펄스열의 자기상관 계수는 10로 표시된다.

지터 PRI는 펄스가 생성되는 변위( $\delta$ ) 기준 펄스의 최대 15% 까지인 펄스열로 구성된다. 지터 PRI의 자기상관 계수를 계산하기 위해 펄스열의 일치하는 범위를 변위( $\delta$ )와 변위를 기준으로  $\pm 15\%$ ( $\alpha$ )를 더하여 설정한다. Fig. 6(a)는 8 변위( $\delta=8$ )인 펄스를 기준 펄스로 정하고 점

선으로 표시한다. 지터 펄스는 변위와 변위를 기준으로 오차를( $\delta \pm \alpha$ )를 더하여 위로 향하는 화살표로 표시한다. Fig. 6(b)은 두 번째 펄스가 첫 펄스에서 7 변위( $\delta=7$ )만큼 떨어져 있어 7 변위( $\delta=7$ )만큼 이동해 자기상관 계수를 계산해 9로 표시된다. 이때 펄스의 일치를 판단하는 사각형의 범위를 기준 펄스의  $\pm 15\%$ ( $\alpha$ )를 더하여 설정한다. 펄스의 일치로 판단하는 범위는 고정 PRI, 스테거 PRI에서 기준 펄스의  $\pm 1\%$  설정하고 지터는 기준 펄스의  $\pm 15\%$ 로 설정해 지터가 기준 펄스에서 많이 좌우로 변경되는 경우에도 같은 펄스로 인식할 수 있도록 고려한다. Fig. 6(c)은 세 번째 펄스가 첫 펄스에서 7 변위, 10 변위( $\delta=7, \delta=10$ )만큼 떨어져 있어 총 17 변위( $\delta=17$ )만큼 이동해 자기상관 계수를 계산해 8로 표시된다. Fig. 6(d)은 네 번째 펄스가 첫 펄스에서 7 변위, 10 변위, 7 변위( $\delta=7, \delta=10, \delta=7$ )만큼 떨어져 있어 총 24 변위( $\delta=24$ )만큼 이동해 자기상관 계수를 계산해 9로 표시된다.

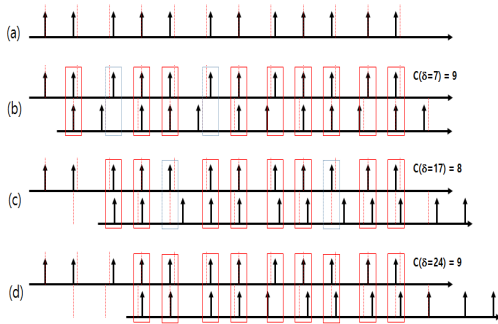


Fig. 6. Jitter PRI Autocorrelation Coefficient

### 3.2 PRI 특징 검출

각 PRI는 그룹을 분류하는 과정을 거쳐 분류된 그룹의 PDW를 대상으로 처리한다. 이때 각 그룹은 고정 PRI, 스테거 PRI, 지터 PRI 중 하나로 식별되고 각 PRI는 펄스열은 N개로 구성되어 있다고 가정한다. 각 그룹은 특정 PRI로 식별하는 과정에서 자기상관계수를 사용한다. 자기상관 계수를 계산할 때, 오차의 범위에 따라 두 가지 계수로 구분한다. 오차의 범위가 기준 펄스의  $\pm 1\%$ 인 고정 PRI, 스테거 PRI의 자기상관 계수는 CS(autoCorrelation Stable & stagger coefficient)로 정의하고, 기준 펄스의  $\pm 15\%$ ( $\alpha$ )인 지터의 자기상관 계수는 CJ( autoCorrelation Jitter coefficient)로 정의한다.

PRI 특징은 PRI의 자기상관계수의 관찰을 통해 고정 PRI, 스테거 PRI, 지터 PRI를 구분하는 파라미터를 도출

하였다. 먼저 고정 PRI의 자기상관 계수는 테스트하는 펄스의 개수 N 만큼의 계수가 최대값을 갖고 점점 줄어드는 특징을 보인다. 스테거 PRI의 자기상관 계수는 스테거 프레임 주기에 최대값을 갖는 특징을 보인다. 고정 PRI, 스테거 PRI는 CS 자기상관 계수와 CJ 자기상관 계수를 사용하면 두 계수가 같은 추이를 보인다. 지터의 PRI는 CS 자기상관 계수를 사용하면 계수가 작은 값을 나타낸다.

```
// Calculate autoCorrelation coefficient
MR = CS/N;
JMR = CJ/N;
SC = CS/CJ
// PRI Detect logic
Find (SC=100) && (MR=JMR)
      && (MR>TH_STABLE)
nFrames : Num.of matching PRI = num. of frames
lastMatching = k; // last matching sample
// stable PRI Detect
If (nFrames == 1)
    Decide Stable
// stagger PRI 검출
If (nFrames > 3) // when minimum 3 frames
    nStage = lastMatching/nFrames
    Calculate FramePRI
    FramePRI[k]=TOA_ORG[nStage + k] - TOA_ORG[k]
Else
    Not enough Sample
// jitter PRI Detect
If (Average JMR > TH_JITTER(90%))
    && (Average MR < TH_NSTABLE(50%))
    Decide Jitter
Else
    Unknown
```

Fig. 7. PRI Detection Algorithm

그러나 CJ 자기상관 계수를 사용하면 N개의 펄스에 가까운 최대값을 얻는 특징이 있다. 각 PRI의 특징을 기반으로 각 PRI는 아래와 같은 알고리즘을 인식할 수 있다. Fig. 7의 PRI 검출 알고리즘은 그룹 PDW의 인접한 펄스의 차이를 계산한다. 생성된 펄스열이 N개 있다고 가정하고 자기상관 계수인 CS, CJ를 계산한다. CS와 CJ의 유사 정도를 SC(Stable Coefficient)로 계산한다. 고정 PRI, 스테거 PRI는 SC가 100이고 MR(Matching Rate)와 JMR(Jitter Matching Rate)와 같이 일정하다. 그러므로 CS/CJ는 고정 PRI와 스테거 PRI를 판단하는 척도로 PRI

검출 논리로 적용한다. 그리고 M단 스테거는 Frame PRI에 대해서 MR과 JMR이 1로 나타난다. 지터 PRI는 펄스열의 간격이 일정하지 않아서 자기상관 계수 CS와 CJ에 큰 차이를 보이고 CJ가 큰값을 갖는지로 검출하고 추가적으로 MR도 JMR보다 작고 JMR은 1에 가까운 값을 갖는다. 제안하는 PRI 검출 알고리즘은 자기상관 비교 범위를 다르게 설정해 자기상관 계수를 계산하여 비교한 결과를 기반으로 고정 PRI, 스테거 PRI, 지터 PRI를 정확하게 검출할 수 있는 지를 실험을 통해 확인하였다.

#### 4. 시뮬레이터 구현 및 성능평가

이장은 제안한 자기상관 비교 범위를 활용한 레이더 신호의 펄스 변조 형태 검출 알고리즘의 검증을 위해 시뮬레이터를 구현하였다. 시뮬레이터의 개발환경은 CPU I7 3.4GHz, RAM 8G, 256G 바이트의 저장 장치로 구성된 하드웨어와 운영체제 Win8.1, 개발 도구 Visual Studio 2010의 소프트웨어를 사용하였다.

시뮬레이터의 검증을 위하여 고정 PRI, 스테거 PRI, 지터 PRI는 생성 개수, 시작 TOA(Time Of Arrival), DTOA(Differential Time Of Arrival)을 매개 변수로 자동 생성하도록 구현하여 입력하였다.

구현한 시뮬레이터 입력은 고정 PRI, 스테거 PRI, 지터 PRI 3종류이다. 고정 PRI의 생성은 매개변수인 생성 개수 20, 시작 TOA 1200, DTOA 평균 320을 입력하여 Fig. 8과 같이 생성하였다. 스테거 PRI의 매개변수는 생성 개수 21개, 시작 TOA 3000, 스테거의 레벨의 단수 4를 입력해 Fig. 9와 같이 생성하였고, 지터 PRI의 매개변수는 생성 개수 40, 시작 TOA 2070, DTOA 평균 450를 입력해 Fig. 10과 같이 생성하였다.

Fig. 11은 생성한 고정 PRI를 입력하여 자기상관 계수를 계산하는 과정으로 입력한 고정 PRI의 간격이 AvgDTOA로 계산된 320이 출력되고 CS와 CJ의 Window와 JitterWindow 오차 범위는 AvgDTOA \* 2 \* 오차(고정, 스테거:1%, 지터:15%)로 계산해 설정하였다.

Fig. 12는 고정 PRI를 분석한 결과를 표시한 화면으로 CS, CJ가 일치하는 정도를 표시하는 SC가 100으로 계산되었고 결과화면에 고정 PRI는 Stage =1, Frame PRI 319가 계산되었다. 이 결과는 1개의 고정값 319의 DTOA가 반복되는 고정 PRI를 검출하였음을 나타낸다.

```
TOA_ORG [111200 [211300 [311520 [411840 [512160 [612480 [712800 [813121 [913442
[1013762 [1114080 [1214402 [1314720 [1415040 [1515362 [1615682 [1716002 [1816322
[1916640 [2016960
```

Fig. 8. Fixed PRI Screen

```
TOA_ORG [113000 [213311 [313762 [414080 [514420 [614732 [715180 [815501 [915840
[1016152 [1116600 [1216920 [1317261 [1417572 [1518021 [1618341 [1718682 [1818990
[1919440 [2019761 [2110102
```

Fig. 9. Stagger PRI Screen

```
TOA_ORG [112070 [212565 [313011 [413411 [513866 [614343 [714806 [815238 [915657
[1016107 [1116570 [1217065 [1317461 [1417929 [1518375 [1618852 [1719320 [1819765
[1910161 [20110670 [2111070 [22111529 [23111997 [24112434 [25112879 [26113320
[27113779 [28114243 [29114661 [30115134 [31115606 [32116065 [33116479 [34116920
[35117370 [36117852 [37118284 [38118716 [39119184 [40119652
```

Fig. 10. Jitter PRI Screen

```
TOA_ORG [111200 [211300 [311521 [411840 [512162 [612480 [712802 [813121 [913442
[1013761 [1114082 [1214400 [1314721 [1415041 [1515361 [1615681 [1716002 [1816321
[1916642 [2016962
DTOR [11100 [21221 [31319 [41322 [51318 [61322 [71319 [81321 [91319
[101321 [111318 [121321 [131320 [141320 [151320 [161321 [171319 [181321
[191320
SORT [11100 [21221 [31318 [41318 [51319 [61319 [71319 [81319 [91320
[101320 [111320 [121320 [131321 [141321 [151321 [161321 [171321 [181322
[191322
AvgTOA=320, Window=6, JitterWindow=96
SHIFT1 [111200 [211421 [311740 [412062 [512380 [612702 [713021 [813342 [913661
[1013982 [1114300 [1214621 [1314941 [1415261 [1515581 [1615902 [1716221 [1816542
[1916862
DIFF1 [11100 [21100 [31100 [41100 [51100 [61100 [71100 [81100 [91100
[101100 [111100 [121100 [131100 [141100 [151100 [161100 [171100 [181100
[191100
AC(1)=1, JC(1)=1
```

Fig. 11. Fixed PRI Autocorrelation Coefficient Calculation Screen

```
DIFF7 [11100 [21100 [31100 [41100 [51100 [61100 [71100 [81100 [91100
[101100 [111100 [121100 [131100 [141100 [151100 [161100 [171100 [181100
[191100
AC(7)=12, JC(7)=12
SHIFT8 [111200 [211519 [311840 [412158 [512479 [612799 [713119 [813439 [913760
[1014079 [1114400 [1214720
DIFF8 [11100 [21100 [31100 [41100 [51100 [61100 [71100 [81100 [91100
[101100 [111100 [121100 [131100 [141100 [151100 [161100 [171100 [181100
[191100
AC(8)=11, JC(8)=11
SHIFT9 [111200 [211521 [311839 [412160 [512480 [612800 [713120 [813441 [913760
[1014081 [1114401
DIFF9 [11100 [21100 [31100 [41100 [51100 [61100 [71100 [81100 [91100
[101100 [111100 [121100 [131100 [141100 [151100 [161100 [171100 [181100
[191100
AC(9)=10, JC(9)=10
SHIFT10 [111200 [211518 [311839 [412159 [512479 [612799 [713120 [813439 [913760
[1014080
DIFF10 [11100 [21100 [31100 [41100 [51100 [61100 [71100 [81100 [91100
[101100 [111100 [121100 [131100 [141100 [151100 [161100 [171100 [181100
[191100
AC(10)=9, JC(10)=9
Result
n= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
N= 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10
CS= 1 17 16 15 14 13 12 11 10 9
CJ= 1 17 16 15 14 13 12 11 10 9
MR= 5 94 94 93 93 92 92 91 90 90
JMR= 5 94 94 93 93 92 92 91 90 90
SC=100 100 100 100 100 100 100 100 100 100
nFrames=9, AvgMR=92, AvgJMR=92
==Stagger: stage=1, FramePRI= 319 ==
```

Fig. 12. Fixed PRI Detection Result Screen

Fig. 13은 Fig. 9의 스테거 PRI 입력을 시뮬레이터에서 분석한 결과를 표시한 화면이다. 펄스열을 오른쪽으로 이동하면서 겹치는 N개를 대상으로 자기상관 계수 CS, CJ, SC, MR, JMR를 계산한 결과화면이다.

```

SHIF19 [1]3000 [2]3448 [3]3768 [4]4109 [5]4420 [6]4869 [7]5189 [8]5530 [9]5838
[10]6288 [11]6609 [12]6950
DIFF9 [1] 0 [2] 137 [3] 6 [4] 29 [5] 0 [6] 137 [7] 9 [8] 29 [9] 2
[10] 136 [11] 9 [12] 30
ACI[9]=4, JC[9]=9

SHIF10 [1]3000 [2]3320 [3]3661 [4]3972 [5]4421 [6]4741 [7]5082 [8]5390 [9]5840
[10]6161 [11]6502
DIFF10 [1] 0 [2] 9 [3] 101 [4] 108 [5] 1 [6] 9 [7] 98 [8] 111 [9] 0
[10] 9 [11] -98
ACI[10]=3, JC[10]=8

Result
n= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
N= 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11
CS= 5 6 5 17 4 4 4 13 4 3
CJ= 15 13 14 17 12 11 11 13 9 8
MR= 25 31 27 100 25 26 28 100 33 27
JMR= 75 68 77 100 75 73 78 100 75 72
SC= 33 46 35 100 33 36 36 100 44 37
nFrames=2, AvgMR=46, AvgJMR=88
==Stagger: stage=4, FramePRI= 1420 ==

```

Fig. 13. Stagger PRI Detection Result Screen

스태거 PRI는 CS, CJ가 framePRI에서 일치하여 SC가 100으로 표시되었다. 이 결과화면에서 framePRI 1420의 단위로 4단계마다 펄스열이 정확히 일치하는 결과를 보이고 있다. 결과화면 마지막에 Stagger Stage=4, Frame PRI 1420가 계산되었다.

```

[19] 0 [20] -5
ACI[20]=2, JC[20]=19

Result
n= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19
20
N= 39 38 37 36 35 34 33 32 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21
20
CS= 7 7 7 2 5 6 2 3 7 2 10 2 4 4 2 1 1 4 5 3
2
CJ= 38 37 37 35 34 33 32 31 30 29 28 26 25 25 24 23 21 20
19
MR= 17 18 5 13 17 5 9 21 6 33 6 14 14 7 4 4 17 22 14
10
JMR= 97 97 100 97 97 97 96 96 96 96 100 100 96 96 100 100 95 95
95
SC= 18 18 5 14 17 6 9 22 6 34 6 14 15 8 4 4 17 23 15
10
nFrames=0, AvgMR=13, AvgJMR=102
==JITTER: FramePRI=448==

```

Fig. 14. Jitter PRI Detection Result Screen

Fig. 14는 Fig. 10의 지터 PRI를 입력하여 시뮬레이터가 입력된 지터 펄스열을 오른쪽으로 이동하면서 겹치는 N개를 대상으로 자기상관 계수 CS, CJ, SC, MR, JMR를 계산한 결과화면이다. 지터 PRI는 CS의 값을 N으로 나눈 MR 값이 1보다 0에 근접하는 작은 값을 나타내고, 상대적으로 CJ의 값이 큰값을 가지므로 N으로 나눈 JMR 값이 1에 근접하는 값을 나타낸다. 시뮬레이터의 실험을 통해 얻은 결과를 정리하면 고정 PRI는 CS, CJ에 거의 일치하므로 MR, JMR, SC가 모두 1에 근사값을 갖는다. 지터 PRI는 JMR만 1에 근사값이고 MR와 SC가 0에 근사값을 갖는다. 마지막으로 스태거 PRI는 framePRI에서 MR, JMR, SC가 모두 1에 근사값을 갖는 것을 실험을 통해 확인하였다. 특히, 스태거 PRI는 framePRI이므로 스태거 레벨을 나타내므로 MR, JMR, SC의 값이 1에 근사값을 갖는 간격을 조사한 결과 정확하게 일치하는 것을 확인하였다. 실험을 통해 각 PRI의 판단 기준을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. PRI Detection Criteria

Type	MR (Matching Rate)	JMR (Jitter Matching Rate)	SC (Stable Coefficient)
Stable	1	1	1
Jitter	<< 1 (Approx. to 0)	1	<< 1 (Approx. to 0)
Stagger	At frame PRI 1 Otherwise << 1	At frame PRI 1 Otherwise << 1	At frame PRI 1 Otherwise << 1

## 5. 결론

기존의 연구에서 PRI 변조를 검출하는 기법들은 수집한 신호를 기반으로 통계를 추출하기 위해 많은 데이터를 요구하고, 많은 데이터를 처리하기 위해 많은 시간이 필요로 하였다. 본 연구에서는 기존 펄스반복주기 연구에서 시도되지 않은 자기상관 기법의 변형된 형태와 간단한 통계 기법을 병합한 새로운 자기상관 범위를 활용한 레이더 신호의 펄스 변조 형태 검출 알고리즘을 제시하였다. 이 방법은 기존의 알고리즘에 비해 적은 펄스를 사용해 정확한 PRI 변조 형태를 검출할 수 있어, 보다 빠른 응답과 정확한 신호 식별을 수행하였다. 레이더 신호 검출 알고리즘은 펄스열의 시간차이를 자기상관기법을 적용하는 시점에 비교할 펄스열이 겹쳐지는 오차를 조정해 CS, CJ 자기상관 계수를 계산하였다. 이 계수를 바탕으로 SC, MR, JMR의 결정 기준을 제시함으로써 보다 정확하게 PRI 형태를 식별할 수 있었다. 그리고 식별 입력 신호에 스태거 PRI의 단수가 N인 경우 스태거 PRI의 4 배수인 4N개의 펄스가 있으면 PRI의 검출이 가능하였다. 실험을 통해 기존의 신호분석에는 많은 입력이 필요했으나 제안한 기법은 스태거 PRI의 단수의 4배정도면 PRI를 검출할 수 있으므로 빠르고 정확하게 PRI 형태를 검출할 수 있고 스태거 PRI의 레벨을 정확하게 찾을 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안하는 신호 처리의 실용화를 위해서는 실제 환경에서 수집된 레이더 신호를 실험데이터로 입력하여 여러 임계치의 적정 값을 설정하는 연구가 추가적으로 필요하다.

## REFERENCES

- [1] C. Benson, M. R. Frater & M. J. Ryan. (2007). Tactical Electronic Warfare. USA: ArgosPress.

- [2] D. W. Lee, J. W. Han & W. D. Lee . (2008, Jul). Adaptive radar pulses clustering based on density cluster window. *ITC-CSCC* 2008, pp 1377-1380.
- [3] Y. S. Lee, J. S. Lim & J. S. Lim. (2015). An Algorithm for De-Interleaving of Wobble and Sinusoidal PRIs for Unidentified Radar Signals. *The Journal of the Institute of Electromagnetic engineering and science*, 26(12), 1100-1107.  
DOI: 10.5515/KJKIEES.2015.26.12.1100
- [4] S. H. Lee, J. H. Kim & H. I. Jung. (2002). A Study on Deinterleaving the Pulse Trains in Mutiple Signal Environment. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 5(4), 38-48.
- [5] J. W. Han, K. H. Song & D. W. Lee. (2006, Oct). An adaptive clustering scheme for ES. *Proceedings of the KIEE Conference*.(pp.366-368). Seoul: The Korean Institute of Electrical Engineers.
- [6] Y. J. Ryoo & W. W. Kim. (2006). Recognition of PRI modulation types of radar signals using the autocorrelation. *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, 43(3), 61-67.
- [7] 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
- [8] J. S. Lim & G. S. Chae. (2012). A Novel Algorithm for Deinterleaving of D&S PRI and Stagger PRI Signals from the EP Radar. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 13(11), 5371-5378.  
DOI:10.5762/KAIS.2012.13.11.5372
- [9] 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 control, automation and systems engineering*, 8(8), 673-681.  
DOI: dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2002.8.8.673
- [10] Y. W. Kim & H. W. Yang. (2003). The Identificaton of Pulse Repetition Intervals Modulation using Markov Models Approach. *The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 52(6), 372-377.
- [11] 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:dx.doi.org/10.5573/ieie.2014.51.10.137
- [12] J. W. Han & J. H. Jin. (2017, Jun). A novel method of

recognizing PRI modulation type of radar signal based on Support Vector Machine.

*Proceedings of the IEIE Conference*.(pp.679-682). Seoul: The Institute of Electronics and Information Engineers.

- [13] S. M. Lim, D. K. Sim & C. Y. Lee. (2014). Estimation Method of Single Stagger PRI and Future TOA for Active Cancellation. *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 51(8), 34-142.  
DOI:dx.doi.org/10.5573/ieie.2014.51.3.034

김 관 태(Gwan-Tae Kim)

[정회원]



- 2011년 8월 : 충북대학교 컴퓨터 과학과 석사
- 2014년 2월 ~ 현재 : 충북대학교 컴퓨터과학과 박사 과정
- 관심분야 : 실시간 신호처리, 전자 전 신호탐지

· E-Mail : gtkima@naver.com

주 영 관(Youngkwan Ju)

[정회원]



- 2004년 2월 : 충북대학교 전자계 산학과 석사
- 2009년 2월 : 충북대학교 전자계 산학과 박사
- 충북대학교 전자정보대학 초빙교 수

· 관심분야 : 임베디드 시스템 등

· E-Mail : rainbow@cbnu.ac.kr

전 중 남(Joong-Nam Joen)

[정회원]



- 1990년 : 연세대학교 전자공학과 박사
- 1996년 ~ 1998년 : 미국 Texas A&M 연구교수
- 현재 : 충북대학교 전자정보대학 교수, 컴퓨터정보통신 연구소 연구원

· 관심분야 : 컴퓨터구조, 임베디드 시스템

· E-Mail : joongnam@cbnu.ac.kr