

## 2차원 TDOA 히스토그램을 이용한 스테저 PRI 펄스열의 펄스반복주기 탐지 알고리즘

### An Algorithm for Estimating Pulse Repetition Intervals of Stagger PRI Pulse Train Using 2D-TDOA Histogram

김 옹 우, 양 해 원  
(Yong-Woo Kim and Hai-Won Yang)

**Abstract** : This paper presents a new algorithm for estimating pulse repetition intervals (PRIs) of stagger PRI pulse trains using a 2 dimensional TDOA histogram. The PRI transform algorithm can remove harmonics of stable and jitter PRI pulse trains in a TDOA histogram. But, it is impossible for the algorithm to detect stagger PRI pulse trains because it regards frame PRIs of stagger pulse trains as harmonics of stable PRI pulse trains. A new algorithm of this paper has an ability to distinguish stagger pulse trains from harmonics of other pulse trains and to estimate frame PRIs of detected pulse trains.

**Keywords** : RADAR, EW, PRI, TOA, TDOA, histogram

#### I. 서론

본 논문에서는 레이더 펄스의 펄스반복주기(PRI ; Pulse Repetition Interval)를 탐지하는 방법에 대하여 다루기로 한다. 레이더는 펄스 형태의 전자파를 일정한 시간 간격으로 발사하여 주변 물체에 반사되어 돌아오는 신호를 수신한다. 이 때 펄스가 되돌아오는 시간을 이용하여 물체와의 거리를 계산한다. 반면, 레이더 신호를 수신하여 분석하는 전자전(電子戰 ; Electronic Warfare) 장비는 이 레이더 펄스의 각종 특성을 분석하여 주변에 있는 레이더의 위치, 수량, 종류 등을 탐지하고, 레이더를 사용하는 무기의 공격정후 및 전장의 전술 상황을 파악하여 적절한 대응을 하는데 이용한다. 이와 같은 상황에서 분석하여야 할 레이더의 특성으로는 펄스의 주파수, 펄스폭, 펄스세기 등 RF적 특성과, 펄스도착방향, 펄스도착시간(TOA ; Time Of Arrival) 등과 같은 시공간적 특성이 있으며, 스캔 주기, 펄스반복주기(이하 PRI), 주파수변조특성 등 여러 펄스에 걸쳐 분석되어야 할 특성 등 다양한 것들이 있다. 그 중에서 PRI는 주파수 값과 더불어 레이더의 중요한 특성 중 하나로 알려져 있다. 그러나 레이더들은 전자전 장비에게 자신을 노출시키지 않기 위해서 다양한 대전자전(對電子戰 ; Electronic Protect) 방법을 사용한다. PRI값을 분석 당하지 않기 위한 여러 가지 방법이 있는데, 그 중의 하나가 스테저(Stagger) PRI를 사용하는 방법이다. 스테저 PRI는 몇 개의 PRI값을 사용하여 펄스 간격을 변경해서 사용하는 방법으로서, 원래는 MTI(Moving Target Indicator)레이더의 blind-speed를 제거하기 위해서 개발된 방법[1][2]이지만, 전자전 장비가 레이더의 펄스 특성을 분석하기 어렵게 하는

효과도 갖는다. 본 논문에서는 2차원 펄스 도착시간 간격(TDOA ; Time Difference Of Arrival) 히스토그램을 이용하여 스테저 PRI를 탐지하는 방법을 제안하였으며, 모의실험을 통해서 그 효과를 입증하였다.

#### II. 펄스반복주기(PRI)

##### 1. 고정(Constant) PRI

어떤 레이더가 일정한 시간간격  $P$ 로 펄스를 방사한다고 하면,  $k$ 번째 펄스의 방사 시각  $y_k$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y_k = kP + \phi, \quad k \geq 0 \quad (1)$$

또는

$$y_k = \begin{cases} \phi, & k=0 \\ y_{k-1} + P, & k>0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서 일정시간간격  $P$ 가 이 펄스열(Pulse Train)의 PRI가 된다.  $\phi$ 는 첫 번째 펄스의 방사시각이며, 이 펄스열의 위상(Phase)이 된다[3]. 일반적으로  $\phi$ 의 값은  $[0, P)$ 의 범위내에 있다. 이런 펄스열을 Constant PRI를 갖는 펄스열, 또는 간단히 고정 펄스열이라고 한다.

##### 2. 지터(Jitter) PRI

펄스 방사시각  $y_k$ 에 random한 오차가 더해진 펄스열을 Jitter PRI를 갖는 펄스열 또는 지터 펄스열이라고 한다. 지터는 대전자전(對電子戰)을 위한 의도적 지터도 있고, 레이더의 노후화 및 부정확성에 의한 비의도적인 지터도 있다. 또한, 펄스발생시각의 오차가 다음 펄스의 발생시각에 누적되는 Cumulative jitter(CJ)와 누적되지 않는 Non-cumulative jitter(NCJ)로 구분할 수 있다. NCJ의 경우  $y_k$ 는 다음 식과 같

논문접수 : 2002. 2. 15., 채택확정 : 2002. 6. 26.

김옹우 : 국방과학연구소 전자전 체계부(ywkim63@add.re.kr)

양해원 : 한양대학교 전자컴퓨터 공학부(hwyang@email.hanyang.ac.kr)

※ 본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구 소 주관으로 수행되었음(과제번호 : 99-중기-03).

이 표현될 수 있다.

$$y_k = kP + \phi + v_k \quad (3)$$

여기서  $v_k$ 는 분산이  $\sigma_v^2$ 이고, 평균이 0인 백색 가우시안 잡음(White Gaussian Noise)으로 모델링된다. 반면, CJ의 경우에는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$y_k = \begin{cases} \phi + v_0, & k=0 \\ y_{k-1} + P + v_k, & k>0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $\rho_k = \sum_{i=0}^k v_i$  로 정의하면

$$y_k = kP + \phi + \rho_k \quad (5)$$

이 된다. 이때 가우시안 잡음  $\rho_k$ 는 백색(white)도 아니고, stationary도 아니다[3].

3. 스테거(Stagger) PRI

$n$ 개의 PRI  $P_0, P_1, \dots, P_{N-1}$ 를 차례로 사용하여 펄스를 방사하는 경우를  $N$ 단 Stagger PRI를 갖는 펄스열(간단히,  $N$ 단 스테거 펄스열)이라고 한다. 그리고  $P_0, P_1, \dots, P_{N-1}$ 를 Stagger element PRI라고 하며, 그들의 합인  $P$ 를 Frame PRI라고 하며 다음과 같다.

$$P = \sum_{n=0}^{N-1} P_n \quad (6)$$

또한, 스테거 펄스열에서  $k$ 번째 펄스의 출력시각  $y_k$ 는 다음과 같다.

$$y_k = \begin{cases} \phi, & k=0 \\ y_{k-1} + P_n, & k>0, (k-1 \bmod N) = n \end{cases} \quad (7)$$

이 외에도 다양한 형태의 PRI가 있으나, 본 논문에서 다루지 않으므로 언급하지 않는다.

III. TDOA 히스토그램

1. Autocorrelation 방식

여러 레이더에서 방사된 펄스들이 섞여 있는 경우, 특정 레이더의 PRI를 계산하고 추출해 내는 것은 쉬운 일이 아니다. 이런 상황에서 레이더의 PRI값을 계산해 내기 위한 많은 방법들이 제안되었다[4]-[12]. 그 중에서 TDOA 히스토그램을 이용하는 방법이 비교적 좋은 방법으로 알려져 있다 [5][6]. PRI가 특정 레이더에서 방사된 펄스열의 통계적 펄스 간격을 의미하는 것과는 달리 TDOA란 임의의 두 펄스 사이에서 계산된 시간 간격을 의미한다.

$T$ 시간동안  $K$ 개의 펄스를 수집했다고 가정한다. 만일  $K$ 개의 펄스가 모두 한 레이더에서 방사된 펄스들이고 누락 펄스나 잡음펄스가 없으며, 고정 PRI를 갖는다고 가정하면 각 펄스의 도착시각  $t_k$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$t_k = kP + \phi \quad k=0, \dots, K-1 \quad (8)$$

여기서  $t_k$ 는  $k$ 번째 펄스의 TOA이고,  $P$ 는 PRI이며  $P = T/(K-1)$  이다. 그러나, 여러 레이더의 신호가 혼재되어 있고, 누락펄스나 잡음 펄스가 섞여 있는 경우는 이와 같이 간단히 PRI를 계산할 수 없다. 이런 경우, 다음과 같은 TDOA 히스토그램을 이용하면 펄스열 내에서 레이더의 PRI를 찾을 수 있다.

수집한 펄스열은 다음과 같이 단위 임펄스 (unit impulse)의 합으로 모델링 될 수 있다[2, p.185].

$$f(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - t_n) \quad (9)$$

펄스열  $f(t)$ 에 autocorrelation을 취하면 다음의 히스토그램 식을 얻을 수 있다.

$$h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t-\tau)dt = \int_{-\infty}^{\infty} (\sum_n \delta(t - t_n)) (\sum_k \delta(t - t_k - \tau))dt \quad (10)$$

이 식은  $t - t_n = 0$ 와  $t - t_k - \tau = 0$ 를 만족할 때만 값을 갖는다. 즉, 모든  $n$ 과  $k$ 에 대하여  $\tau = t_n - t_k$  인 경우에  $h(\tau)$ 의 값이 주어진다. 위 식은 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$h(\tau) = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=0}^{n-1} \delta(t_n - t_k - \tau) \quad (11)$$

여기서 함수  $h(\tau)$ 는 TDOA 히스토그램의 특정 위치인  $\tau$ 에서의 값이다.

히스토그램 전체는 다음의 수식으로 표현된다.

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} h(\tau) d\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=0}^{n-1} \delta(t_n - t_k - \tau) d\tau \quad (12)$$

이때  $\tau_1$ 과  $\tau_2$ 는 유효한 PRI의 최소치와 최대치이다. 그림 1은 PRI가 각각 1030, 1350, 1720인 3개의 고정 펄스열이 혼재된 펄스열의 TDOA 히스토그램이다.

3개의 PRI에 해당되는  $h(\tau)$ 값들에 peak가 생긴다. 그러나

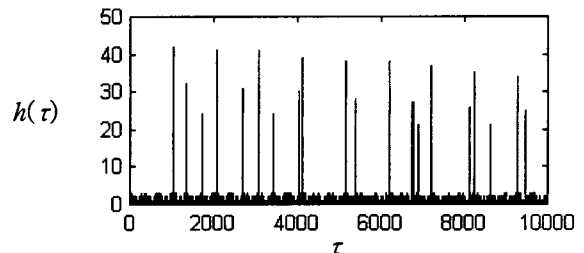


그림 1. Autocorrelation 방법으로 계산한 3개의 고정 PRI 펄스열의 TDOA 히스토그램.

Fig. 1. TDOA histogram of three constant PRI pulse trains using autocorrelation.

단순한 autocorrelation으로 계산된 이러한 TDOA 히스토그램에는 하모닉스(harmonics) PRI에 해당되는 여러 위치에 peak들이 생기므로, TDOA 히스토그램을 이용한 PRI 분석을 어렵게 만든다. 특히, 그림 1과 같이 여러 펄스열이 혼재되어 있는 경우에는 히스토그램 결과만으로 어느 peak가 PRI이고 어느 peak가 하모닉스인지 구분하기 어렵다. 스테저 펄스열의 element PRI는 히스토그램상에서 하모닉스 TDOA를 만들지 않기 때문에 임의의  $\tau_0$ 에 대해서  $h(\tau_0)$ 의 peak가 형성되었다고 해서  $h(2\tau_0)$ 나  $h(3\tau_0)$  등의 peak가 반드시  $h(\tau_0)$ 의 하모닉스라고 말할 수는 없다. 이러한 autocorrelation방식의 문제점을 해결하기 위해서 고안된 알고리즘이 아래의 PRI 변환 알고리즘이다[12].

2. PRI 변환(Transform) 알고리즘

PRI 변환 개념은 하모닉스 없는 TDOA 히스토그램을 얻기 위하여 Nelson 에 의해서 제안되었다[2, p.246].

(9)로 표현되는 펄스열  $f(t)$ 에 다음과 같은 적분 변환을 취한다.

$$D(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t-\tau)\exp(2\pi i t/\tau)dt \tag{13}$$

(13)을 (10)과 비교해보면 적분항에  $\exp(\cdot)$ 이 추가되어 있는 것을 알 수 있다. (9)를 (13)에 대입하면

$$D(\tau) = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=0}^{n-1} \delta(t_n - t_k - \tau) \exp(i\theta) \tag{14}$$

이 되며, PRI 변환 알고리즘으로 계산한 TDOA 히스토그램은 다음과 같다.

$$\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} |D(\tau)|d\tau \tag{15}$$

여기서  $\tau_{\min}$ 과  $\tau_{\max}$ 는 PRI로서 의미가 있는 최소와 최대 TDOA값이다.  $\theta \equiv 2\pi t_n/(t_n - t_k)$ 를 펄스열  $f(t)$ 의 위상(phase)이라고 정의한다. 복소수 단위 원으로 표현되는 두 개의 위상  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 가 있을 때  $\exp(i\theta_1) = \exp(i\theta_2)$  혹은  $\theta_1 \bmod 2\pi = \theta_2 \bmod 2\pi$ 이면 간단히  $\theta_1 = \theta_2$ 라고 표현하기로 한다.

$n$ 번째 펄스의 TOA와  $k$ 번째 펄스 TOA의 간격을  $I_{kn} = t_n - t_k$ 라고 하면  $t_n$ 과  $t_k$ 의 TDOA에 의한 펄스  $n$ 의 위상  $\theta_{kn}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_{kn} = 2\pi(t_n \bmod I_{kn})/I_{kn} \tag{16}$$

이  $\theta_{kn}$ 이 어떻게 하모닉스 PRI를 제거하는지 그림으로 설명한다.  $I$ 가 실제 PRI인 경우(그림 2의 (a))와 실제 PRI의 2차 하모닉스인 경우(그림 2의 (b)), 그리고 3차인 경우(그림 2의 (c))로 나누어 생각하기로 한다.

먼저,  $I=PRI$ 인 경우는  $k = n-1$ 인 모든  $I_{kn}$ 에 대해서  $\theta_{kn} = \theta = \text{constant}$ 가 된다. 그러나, 그림 2의 (b)의 경우와 같

이  $I=2*PRI$ 인 경우에는  $\theta_{kn} (k = n-2)$ 은  $\theta_0$ 과  $\theta_1$ 의 두 값으로 나뉘게 되며, 두  $\theta$ 는 다음과 같이 180도의 위상차이를 갖게 된다.

$$\theta_1 = \theta_0 + I/2 \tag{17}$$

마찬가지로 그림 2의 (c)의 경우에는  $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ 의 세 값을 갖게 되며, 각각은 120도의 위상차이를 갖는다. 따라서, 다음의 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_0 + I/3 \\ \theta_2 &= \theta_1 + I/3 \end{aligned} \tag{18}$$

여기서 각 위상  $\theta$ 들이 다음과 같은 식을 만족한다는 점이 중요하다. 즉, 그림 2의 (b)와 (c)의 경우는 각각

$$\begin{aligned} \exp(i\theta_0) + \exp(i\theta_1) &= 0 \\ \exp(i\theta_0) + \exp(i\theta_1) + \exp(i\theta_2) &= 0 \end{aligned} \tag{19}$$

가 되며,  $H > 1$ 인 모든  $H$ 차 하모닉스 PRI에 대해서

$$\sum_{k=0}^{H-1} \exp(i\theta_k) = 0 \tag{20}$$

가 된다. 따라서, 하모닉스 PRI에 해당되는  $\tau$ 값에서 (14)의  $D(\tau)$ 는 0이 된다. 그러나, 하모닉스가 아닌 기본 PRI에 해당되는 곳에서는 위상이 한 개의  $\theta$ 값을 가지므로  $D(\tau)$ 는 0이 되지 않으며,  $|D(\tau)|$ 는 (11)의 결과와 같은 값을 갖게 된다.

그림 1의 펄스열을 PRI 변환 알고리즘으로 계산하면 그림 3과 같이 하모닉스 PRI가 제거된 히스토그램을 얻을 수 있다.

3. 변형된 PRI 변환 알고리즘

PRI 변환 알고리즘을 이용하여 히스토그램에서 하모닉스 PRI를 제거할 수 있음을 확인하였다. 그러나 이 알고리즘은

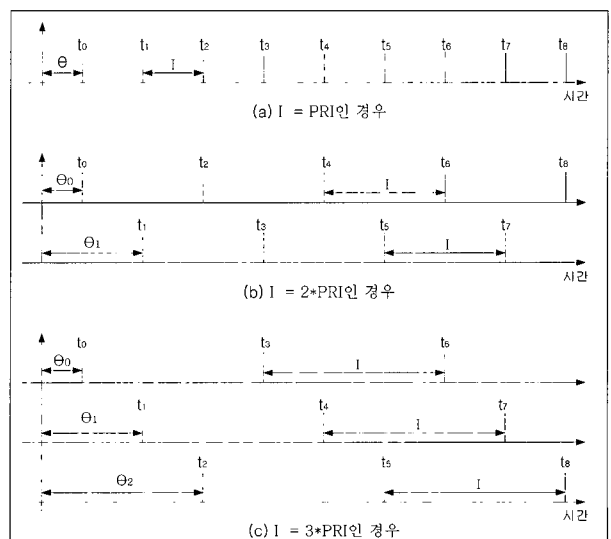


그림 2. PRI 변환 알고리즘 설명을 위한 펄스열. Fig. 2. Pulse train to explain PRI transform algorithm.

지터 잡음에 취약한 단점이 있다. 지터가 있는 경우는 TDOA들의  $\theta$ 들이 오차로 인하여 각각 다른 값을 갖게 되므로, (19) 또는 (20)처럼  $D(\tau)$ 가 0이 되지 않는다. 또한, 동일한 상수의  $\theta$ 를 가져야할 실제 PRI의 위상도 지터 오차로 인하여 분산되므로,  $D(\tau)$ 값의 감소를 가져온다. 따라서, 지터가 있는 펄스열에 PRI 변환 알고리즘을 적용하면 그림 4와 같이 PRI의 peak가 없어지거나 하모닉스 PRI 위치에 peak가 사라지지 않는 결과가 나올 수 있다.

따라서, 이런 단점을 보완하기 위하여 Nishiguchi와 Kobayashi가 변형된 PRI 변환 알고리즘[12]을 제안하였다. 이 알고리즘에서는 TOA값이 증가함에 따라 누적되어 증가하는 위상 오차를 보완하기 위해서 시간축의 원점을 이동 (shifting time origin)하는 방법을 사용하였으며, 지터에 의한 오차를 보완하기 위해서 중첩된 PRI bin(overlapped PRI Bins)을 사용하는 방법을 제안하였다. 이러한 보완된 알고리즘으로 인하여 지터에 의한 문제점은 어느 정도 해결되었으나, 개선된 알고리즘도 스테거 PRI를 탐지하지 못한다는 단점을 가지고 있다.

이 알고리즘은 스테거 펄스열의 Frame PRI와 고정 펄스열의 하모닉스 PRI를 구분하지 못하며, 스테거 element PRI들은 위상이 단위원 전체에 분포되어 서로 상쇄된다. 그림 5는 PRI 변환 알고리즘으로는 스테거 펄스열의 히스토그램을 만들지 못한다는 것을 보여주기 위한 것이다. 잡음 펄스 및 지터오차가 없는 2단 스테거 펄스열을 그림 5(a)의 autocorrelation 방식과 그림 5(b)의 PRI 변환을 이용하여 TDOA 히스토그램을 그렸다. 그림 5(a)에서는 element PRI, Frame PRI와 하모닉스 PRI가 그대로 그려진다. 그러나 그림 5(b)의 경우는 Frame PRI의 값만 조금 남고 element PRI와 하모닉스 PRI 들은 모두 없어졌음을 확인할 수 있다.

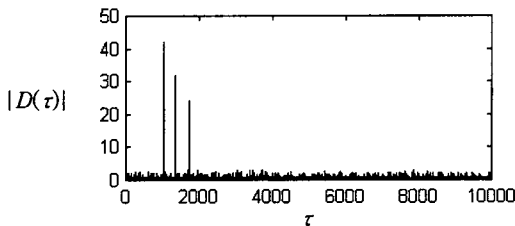


그림 3. PRI 변환 알고리즘을 적용한 3개의 고정 PRI 펄스열의 TDOA 히스토그램.

Fig. 3. TDOA histogram of three constant PRI pulse trains using PRI Transform Algorithm.

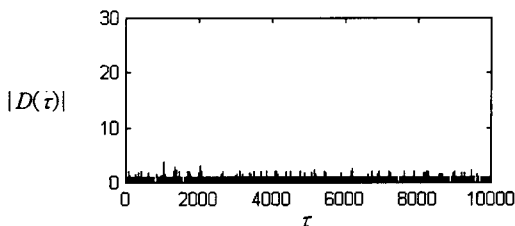


그림 4. 지터 5%의 PRI를 갖는 펄스열에 PRI변환 알고리즘을 적용한 TDOA 히스토그램.

Fig. 4. TDOA histogram of 5% jittered PRI pulse train using PRI transform algorithm.

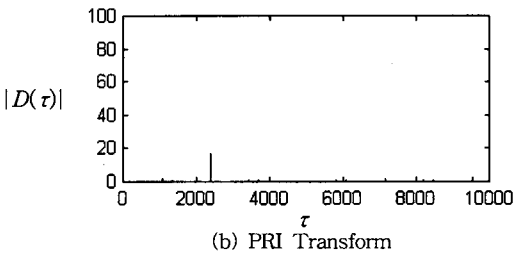
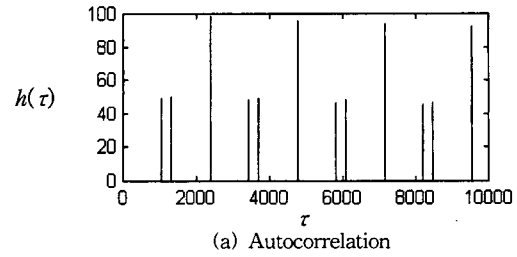


그림 5. 2단 스테거 펄스열의 TDOA 히스토그램.

Fig. 5. TDOA histograms of two elements stagger PRI pulse train.

IV. 스테거 PRI 탐지 알고리즘

1. 스테거 PRI와 하모닉스 PRI

그림 6에서 (a)는 PRI가  $P$ 인 고정 펄스열이고 (c)는 PRI가  $P_0$ 과  $P_1$ 인 2단 스테거 펄스열이다. 그리고, (b)에서의  $I$ 값은 (a)의 2차 하모닉스이며, (d)에서의  $I$ 값은 (c)의 Frame PRI이다. 그림 (b)와 (d)는 모두 두 개의 위상  $\theta_0, \theta_1$ 을 갖는다. 고정 펄스열의  $N$ 차 하모닉스 PRI와  $N$ 단 스테거 펄스열의 Frame PRI는  $\theta_0$ 부터  $\theta_{N-1}$ 까지 모두  $N$ 개의 위상 값을 갖는다. 이는 같은 값이나, 다음과 같은 차이점을 가지고 있다. 그림 6의 (b)와 같은 2차 하모닉스인 경우  $I=2P$ 이므로  $\theta_0$ 과  $\theta_1$ 은 (17)과 같은 관계에 있다. 따라서 180도의 위상차이를 가지며, PRI 변환을 이용하는 경우 (19)또는 (20)과 같이 벡터 합이 0이 된다.

그러나, 그림 6의 (d)와 같은 2단 스테거의 경우는

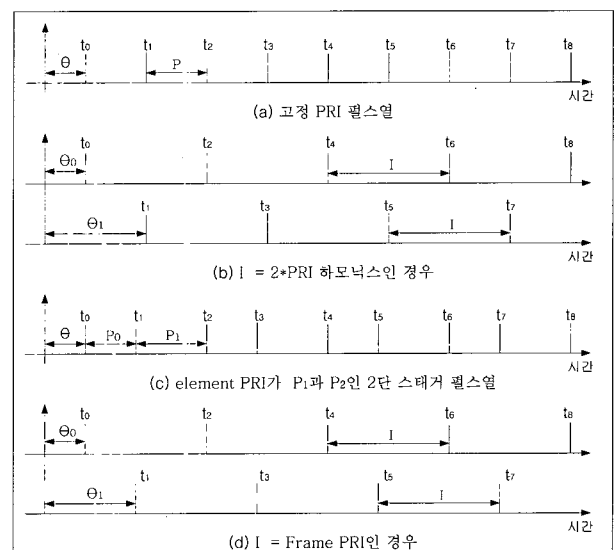


그림 6. 하모닉스 PRI와 스테거 PRI의 차이.

Fig. 6. Difference of harmonics PRI and Stagger PRI.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_0 + P_0 \\ \theta_0 &= \theta_1 + P_1 \end{aligned} \quad (21)$$

이지만,  $P_0 \neq P_1$ 이므로  $\theta_0$ 과  $\theta_1$ 의 위상차이가 180도가 아니며, 벡터 합도 0이 되지 않는다. 그러나  $P_0$ 과  $P_1$ 의 크기가 유사한 경우  $\theta_0$ 과  $\theta_1$ 의 벡터 합은 매우 작아질 수 있다. 그림 5의 (b)가 이런 경우이다.

일반적으로 스테거 펄스열은 한 Frame 주기 내에서 같은 PRI를 다시 사용하지 않는다. 따라서,  $N$ 단 스테거의 경우 각 element PRI는 다음의 관계를 갖는다.

$$P_i \neq P_j \quad (i, j=0 \dots N-1, i \neq j) \quad (22)$$

2. 2차원 TDOA 히스토그램

본 논문에서는 TDOA  $\tau$ 와 위상  $\theta$ 를 파라미터로 하는 2차원 TDOA 히스토그램을 다음과 같이 제안한다.

$$D(\tau, \theta) = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=0}^{n-1} \delta(t_n - t_k - \tau) \delta(\theta_{kn} - \theta) \quad (23)$$

이 히스토그램은 아래의 연산을 거치면 (14)의 PRI 변환과 동일한 값을 얻을 수 있다.

$$D(\tau) = \int_0^{2\pi} D(\tau, \theta) \exp(i\theta) d\theta \quad (24)$$

또한,

$$h(\tau) = \int_0^{2\pi} D(\tau, \theta) d\theta \quad (25)$$

와 같은 연산을 거치면 (11)과 같은 기존의 auto-correlation 방식의 히스토그램을 얻을 수도 있다. (26)은 2차원 TDOA 히스토그램을 TDOA 방향에서 투영한 형태, 즉, 최대값의 형태를 갖는다.

$$D_{\max}(\tau) = \max \{ D(\tau, \theta) \mid 0 \leq \theta < 2\pi \} \quad (26)$$

2차원 TDOA 히스토그램의 특징을 알아보기 위해서 고정 펄스열과 2단 및 3단 스테거 펄스열의 2차원 TDOA 히스토그램을 각각 그림 7~9에 보였다. 이 그림들로부터 다음과 같은 특징을 알 수 있다.

(1) 고정 PRI의 경우:  $\tau$ 축상에서  $\tau = P$ 인 위치에는 1개의 peak가 있으나,  $\tau = hP$  ( $h > 1$ )인 위치에는  $\theta$ 축으로  $h$ 개의 peak가 존재하며, peak의 높이는  $1/h$ 로 감소해 간다. 여기서  $P$ 는 고정 펄스열의 PRI를 의미한다.

(2) 2단 스테거의 경우:  $\tau$ 축상에서  $\tau = P$ 인 위치에는 2개의 peak가 있고,  $\tau = hP$  ( $h > 1$ )인 위치에는  $\theta$ 축으로  $2h$ 개의 peak가 존재하며, 그 높이는  $1/2h$ 로 감소해 간다. 여기서  $P$ 는 스테거 펄스열의 Frame PRI이다.

(3) 3단 스테거의 경우:  $\tau$ 축상에서  $\tau = P$ 인 위치에 3개의

peak가 있고,  $\tau = hP$  ( $h > 1$ )인 위치에는  $\theta$ 축으로  $3h$ 개의 peak가 존재하며, peak의 높이는  $1/3h$ 로 감소해 간다.

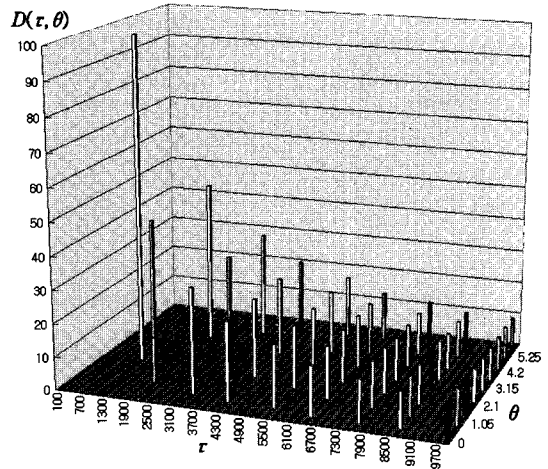


그림 7. 고정 PRI 펄스열의 2차원 TDOA 히스토그램.  
Fig. 7. 2D-TDOA histogram of constant PRI pulse train.

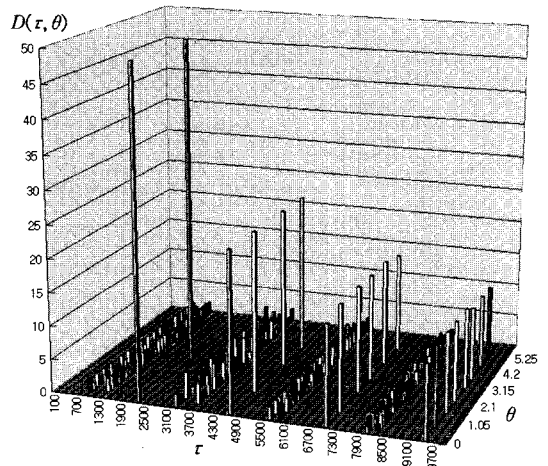


그림 8. 2단 스테거 PRI 펄스열의 2차원 TDOA 히스토그램.  
Fig. 8. 2D-TDOA histogram of two elements stagger PRI pulse train.

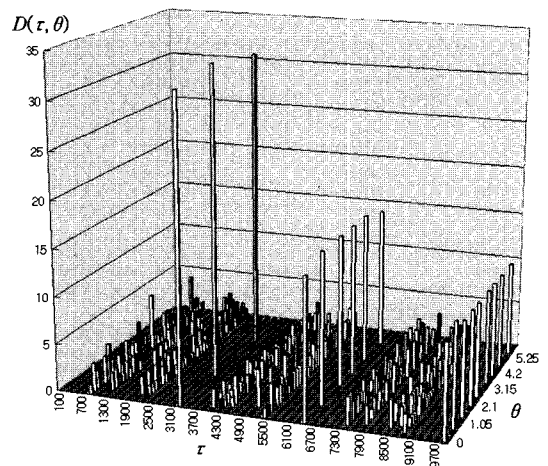


그림 9. 3단 스테거 PRI 펄스열의 2차원 TDOA 히스토그램.  
Fig. 9. 2D-TDOA histogram of three elements stagger PRI pulse train.

그림 10은 그림 7의 고정 PRI 히스토그램을 (25)와 (26)으로 계산한 두 가지 히스토그램을 비교한 것이다. 그림 10의 (a)에서는 기본 PRI와 하모닉스 PRI의 그래프 높이가 거의 같으나, (b)에서는  $1/h$ 로 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 11의 2단 스테저 펄스열에서는 (a)에서 나타났던 element PRI의 히스토그램이 (b)에서 거의 사라지고, Frame PRI 및 그 하모닉스만 남는 것을 알 수 있다. 그리고 각 히스토그램의 높이가  $1/2h$ 로 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

임의의 TDOA값  $\tau$ 에서  $h(\tau)$ 와  $D_{max}(\tau)$ 의 비율을 peak ratio라하고  $R_p(\tau)$ 로 표기한다.

$$R_p(\tau) \equiv \text{ROUND} \left[ \frac{h(\tau)}{D_{max}(\tau)} \right] \quad (27)$$

그러면, 이 값은 (28)과 같이 된다.

$$R_p(\tau) = h * N \quad (28)$$

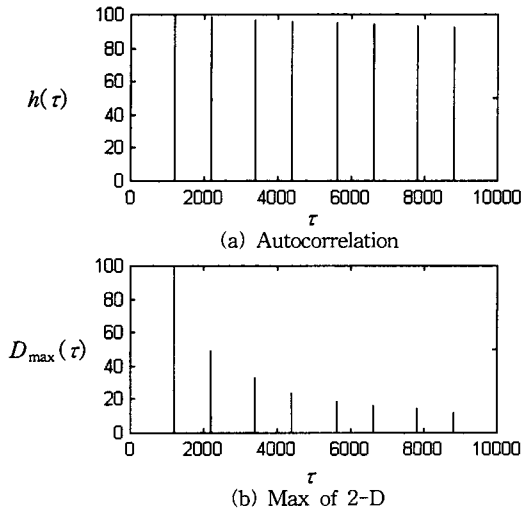


그림 10. 고정 PRI 펄스열의 히스토그램.  
Fig. 10. Two histograms of stable PRI pulse train.

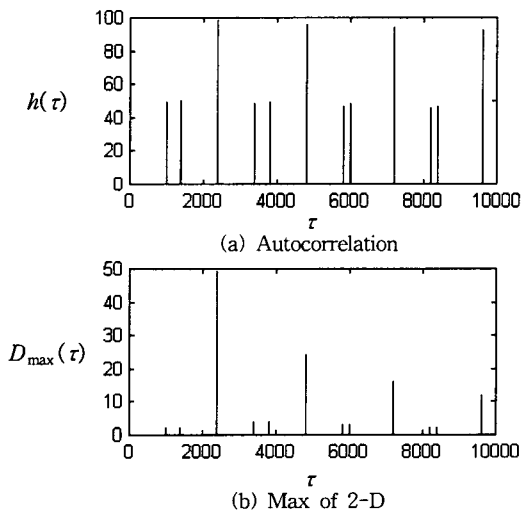


그림 11. 2단 스테저 펄스열의 히스토그램.  
Fig. 11. Two histograms of two elements stagger PRI pulse train.

여기서,  $h$ 는 하모닉스 차수이며  $N$ 은 스테저 단수를 의미한다. 만일  $R_p(\tau)=1$ 이 계산되었다면,  $h=1$ 이고  $N=1$ 이므로 이것은 고정 펄스열의 PRI 이다. 그러나, 만일  $R_p(\tau)=2$ 라면 이것은 고정 펄스열의 2차 하모닉스일 수도 있고, 2단 스테저의 Frame PRI일 수도 있다. 이것을 구분하기 위하여 여기서 (24)의 방법으로  $D(\tau)$ 를 계산한다. 만일  $|D(\tau)| > \epsilon$ 이면 2단 스테저의 Frame PRI로 인정하고, 그렇지 않으면 고정 펄스열의 2차 하모닉스로 판단한다. 여기서  $\epsilon$ 은 하모닉스와 스테저를 구분하는 경계값으로서, 이론적으로는 0의 값을 가져야 하지만, 실제 펄스열에서는 누락펄스, 측정오차, 양자화 오차, 그리고 잡음신호등 여러 요인으로 인하여 0이 될 수는 없다. 실험에 의한 분석치로  $h(\tau)$ 의 약 10%정도가 적절하다.

3. 스테저 탐지 알고리즘

지금까지의 내용을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1단계 : 수집된 펄스열 데이터로 2차원 TDOA 히스토그램  $D(\tau, \theta)$ 를 계산한다.
- 2단계 :  $D(\tau, \theta)$ 를 이용해서  $D_{max}(\tau)$  히스토그램과  $h(\tau)$  히스토그램을 구한다.
- 3단계 :  $D_{max}(\tau)$  히스토그램에서 주요 peak들에 대해서만 다음 단계를 적용한다.
- 4단계 :  $R_p(\tau_0)$ 를 계산한다.
- 5단계 :  $R_p(\tau_0)=1$ 이면,  $\tau_0$ 는 고정펄스열의 PRI이고, 만일  $R_p(\tau_0) > 1$ 이면 6단계로 간다.
- 6단계 :  $|D(\tau_0)| > \epsilon$ 이면  $\tau_0$ 는  $R_p(\tau_0)$ 단 스테저의 Frame PRI라고 판정한다.

V. 모의 실험

제안된 알고리즘의 성능을 입증하기 위해서 표 1의 모의 레이더들을 이용하여 모의시험을 한다. 각 레이더에 대해서 100 msec 동안 신호를 수집한 것으로 가정하였다. 따라서, 전체 수집시간동안 중단 없이 펄스가 수신된다고 할 때, 전체 수집시간을  $T$ , PRI를  $P$ 라고 하면, 수집되는 펄스 개수는  $T/P$ 가 된다. 따라서, 수집되는 펄스의 개수는 수집시간에 비례하고, PRI에 반비례한다.

또한, 잡음 펄스와 누락 펄스를 고려하는 경우, 이런 요소도 수집되는 펄스의 수에 영향을 미치게 된다.

첫 번째 모의실험은 고정 PRI 펄스열이 혼재된 경우로서,

표 1. 모의실험용 레이더의 파라미터.

Table 1. Parameters of RADARs for simulation.

레이더 번호	PRI 형식	초기 위상	PRI ( $\mu\text{sec}$ )	Element PRIs ( $\mu\text{sec}$ )
1	고정	0	1030	-
2	고정	630	1350	-
3	고정	170	2520	-
4	2단 스테저	450	1412	662, 750
5	3단 스테저	50	2376	810, 680, 886
6	4단 스테저	200	1917	350, 425, 510, 632

기존의 PRI 변환 방법으로도 PRI를 찾을 수 있는 경우가 있다. 표 1의 1번, 2번, 3번 레이더 펄스열이 혼재된 경우의 실험 결과는 그림 12와 같다. 그림 12에서 (a)와 (b)는 각각 Auto-correlation 방법과 2차원 히스토그램을 TDOA쪽에서 투영한 히스토그램이다. (c)는 PRI를 분석한 결과로서, 고정 펄스열( $N=1$ ) PRI가 3개 있음을 보여준다.

3단 스테저 펄스열인 5번 레이더를 대상으로 실험한 경우, Frame PRI의 위치에서 3단 스테저 펄스열이 탐지되었음을 그림 13의 (c)를 통하여 알 수 있다.

표 1의 6번인 4단 스테저 펄스열의 경우도 Frame PRI값과 스테저 단수가 정확히 탐지되었음을 그림 14의 (c)를 통해서 알 수 있다.

그림 15는 표1의 4번과 5번 레이더 신호가 혼재된 경우로서, 2단, 3단 스테저 펄스열이 혼재된 신호이다. 실험 결과 정확히 스테저 단수를 찾아냄을 알 수 있다.

표 1의 2번과 6번의 고정펄스열과 4단 스테저 펄스열이 혼재된 경우, 그림 16에 나타난 실험결과에서 고정 펄스열의 PRI와 4단 스테저 펄스열의 Frame PRI를 정확하게 찾아냈지만, 고차 하모닉스 부분에서 두 개의 잘못된 결과가 나타났다.

다음은 그림 15의 실험과 같은 신호에 10%의 잡음 펄스를 추가한 실험이며, 결과는 그림 17과 같다. 추가된 잡음 펄스는 히스토그램 상에서 주로 잡음성분으로 나타나므로 PRI 및 하모닉스의 TDOA 히스토그램의 형태는 잡음 펄스가 없는 그림 15의 결과와 거의 유사하게 나타난다. 실험 결과 2단과 3단 스테저를 정확히 탐지하였다.

마지막 실험은 누락 펄스가 존재하는 펄스열의 경우이다. 4번과 5번의 스테저 신호에서 10%의 펄스를 누락시켰다. 잡음 펄스와 달리 누락펄스는 하모닉스 TDOA에 직접적인 영

향을 준다. 따라서, 그림 18에 나타난 실험결과 2단 스테저의 2차, 3차, 4차 하모닉스가 제거되지 않고 PRI값으로 해석되는 오류가 발생하였다. 이런 결과는 누락 펄스의 발생 정도 및 위치에 따라서 조금씩 다르게 나타난다.

실험 결과, 본 논문에서 제안한 방법이 여러 펄스열이 혼재된 상태에서도 스테저 펄스열의 탐지가 가능함을 확인하였다.

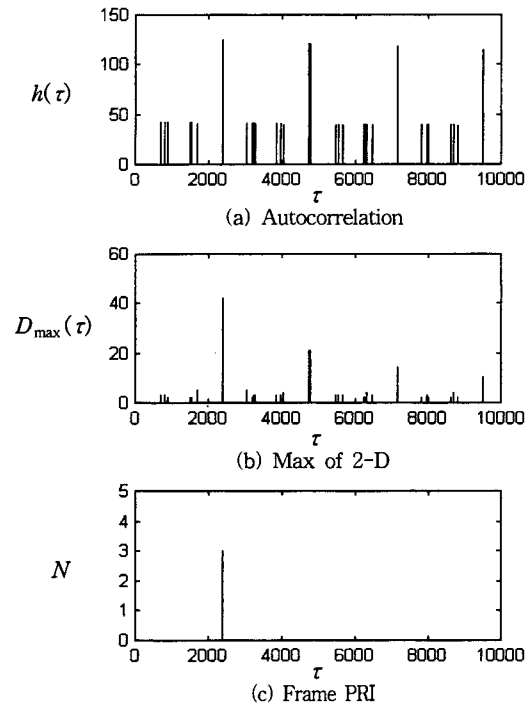


그림 13. 실험결과(3단 스테저).  
Fig. 13. Simulation result(three element staggerer).

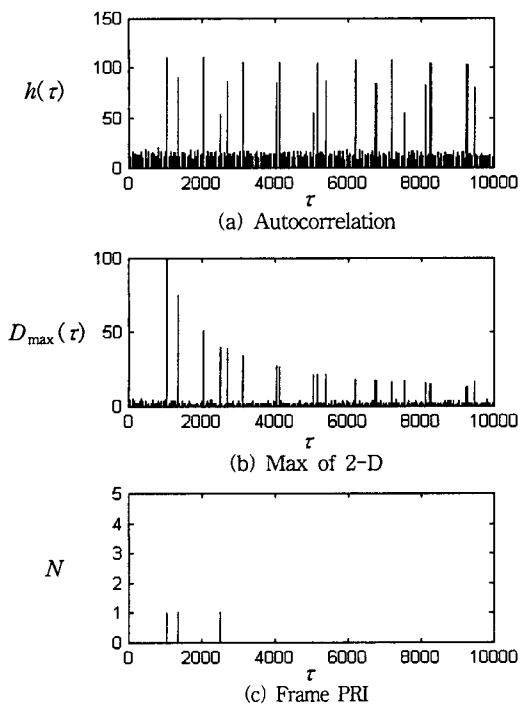


그림 12. 실험결과(3개의 고정 PRI 펄스열).  
Fig. 12. Simulation result(three stable PRI pulse trains).

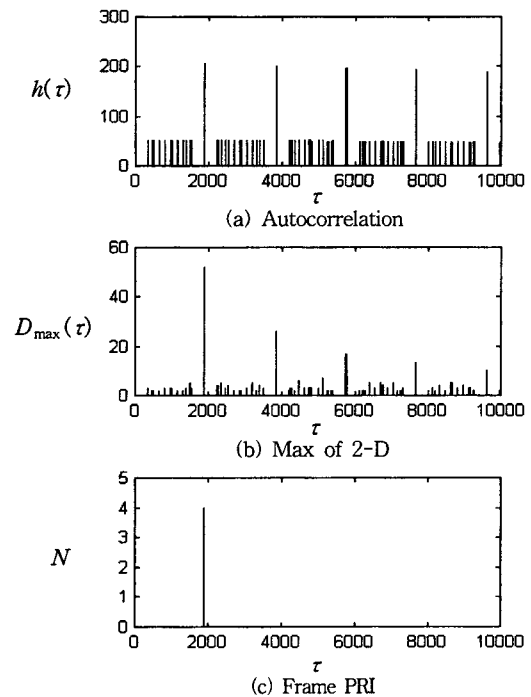


그림 14. 실험결과(4단 스테저).  
Fig. 14. Simulation result(four element staggerer).

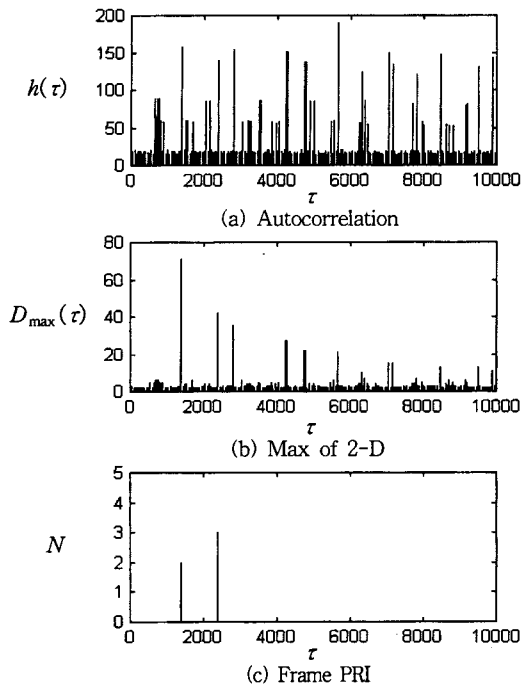


그림 15. 실험결과(2단+3단 스테거).  
 Fig. 15. Simulation result(interleaved pulses of two and three element stagger pulse trains).

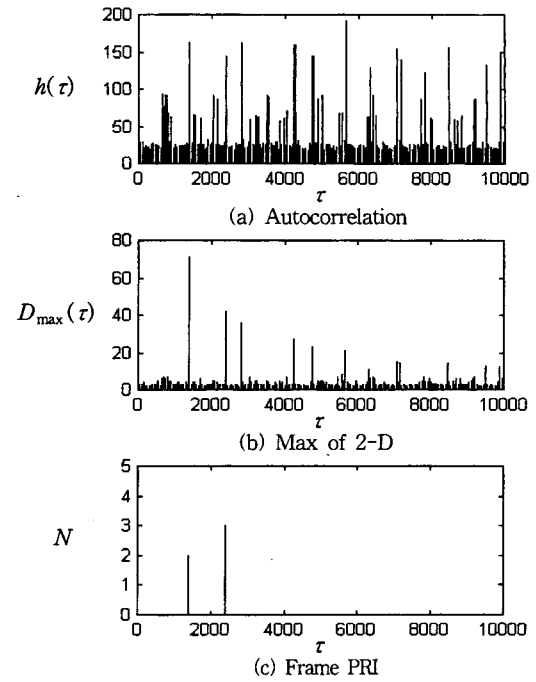


그림 17. 실험결과(2단+3단 스테거 + 10%의 잡음펄스).  
 Fig. 17. Simulation result(interleaved pulses of two and three element stagger pulse trains with 10% of outlier pulses).

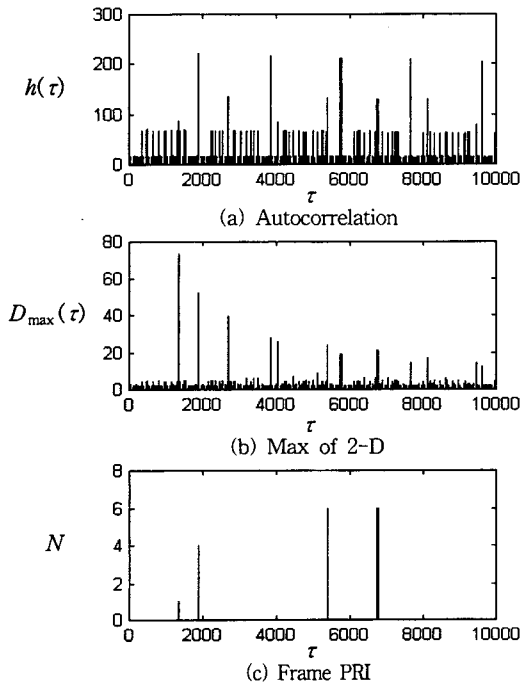


그림 16. 실험결과(고정 PRI 펄스열과 4단스태거).  
 Fig. 16. Simulation result(stable PRI and four element stagger PRI pulse trains).

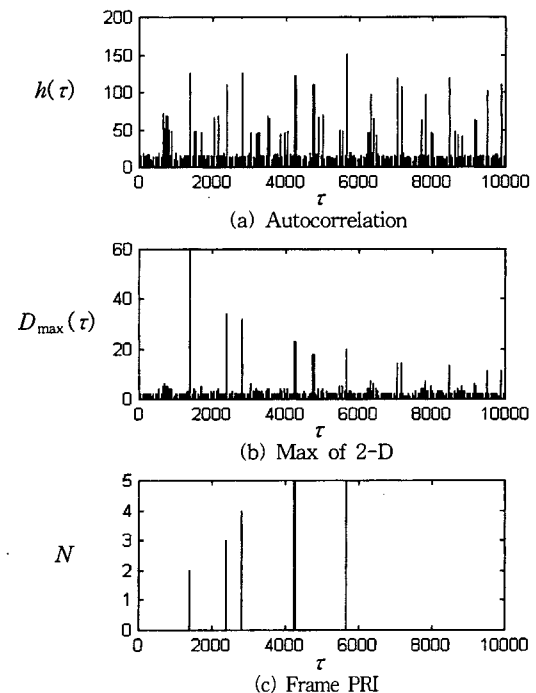


그림 18. 실험결과(2단 + 3단 + 10%의 누락펄스).  
 Fig. 18. Simulation result(interleaved pulses of two and three element stagger pulse trains with 10% of missing pulses).

VI. 결론

본 논문에서는 고정 PRI 펄스열과 스테거 PRI 펄스열을 탐지하고 PRI 값을 분석하는 알고리즘에 대하여 연구하였다. 스테거 PRI를 갖는 펄스열은 고정 PRI 펄스열과 달리 펄스 반복주기의 비선형성과 불규칙적 특성으로 인하여 수학적 함수로 표현하고 분석하기가 쉽지 않다. 따라서, 본 논문

에서는 2차원 TDOA 히스토그램과 기존의 히스토그램을 이용하여 스테거 PRI 펄스열을 탐지하고 그 Frame PRI를 분석하는 알고리즘을 제안하였으며, 혼재된 고정 PRI 펄스열과 4단까지의 스테거 PRI에 대한 탐지 성능을 실험을 통해서



입증하였다. 그러나, 스택거 PRI 펄스열이 여러 개 혼재되어 있는 경우와 누락펄스가 있는 경우는 잘못된 신호 분석 결과가 나오기도 한다.

이러한 문제점의 해결을 위해서는 탐지 결과의 통계적 분석 능력을 갖는 개선된 알고리즘의 개발이 필요하다.

**참고문헌**

[1] D. Curtis Schleher, *Introduction to Electronic Warfare*, Artech House, Boston, 1997.  
 [2] R. G. Wiley, *Electronic intelligence : The Analysis of Radar Signals*, 2nd ed., Artech House, Boston, 1993.  
 [3] D. Gray, B. Slocumb, and S. Elton, "Parameter estimation for periodic discrete event processes," *IEEE Intl., Conf. Acoustic, Speech, and Sig. Proc. (ICASSP '94)*, Vol. 4, pp. 93-96, 1994.  
 [4] B. Sadler and S. Casey, "PRI analysis from sparse data via a modified euclidean algorithm," *IEEE Proc. of ASILOMAR-29*, pp. 1147-1151, 1996.  
 [5] H. K. Mardia, "New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences," *IEE Proc.*, Vol. 136, Pt. F, No. 4, pp. 149-154, Aug., 1989.  
 [6] D. J. Milojevic and B. M. Popovic, "Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses," *IEE Proc.-F*, Vol.

139, No. 1, pp. 98-104, Feb., 1992.  
 [7] Lung-Tan, "Design of a statistical classification method for interleaving radar signals," *Proceedings of 1991 Trans. Pacific Electronic Warfare Symposium*, pp. 85-90.  
 [8] J. B. Moor and V. Krishnamurthy, "Deinterleaving pulse trains using discrete-time stochastic dynamic-linear models," *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 42, No. 11, pp. 3092-3103, Nov., 1994.  
 [9] A. Logothetis and V. Krishnamurthy, "An interval-amplitude algorithm for deinterleaving stochastic pulse train sources," *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 46, No. 5, pp. 1344-1350, May 1998.  
 [10] 김용우, 신옥현, 이효섭, 김홍필, 양해원, "칼만 필터를 사용한 레이더 펄스열 추적," 제어,자동화,시스템 공학회 제15회 한국자동제어학술회의 요약문집, p. 176, 2000, 10.  
 [11] 김용우, 정운섭, "레이더 신호 분리를 위한 FTD 히스토그램 하드웨어 설계," 한국군사과학기술학회 종합학술대회논문집, Vol. I, pp. 41-44, 2001.  
 [12] K. Nishiguchi and M. Kobayashi, "Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals," *IEEE Tran. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 36, No. 2, pp. 407-421, Apr., 2000.



**김 용 우**  
 1963년 7월 13일생. 1987년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1996년~현재 동 대학원 박사과정. 1989년~현재 국방과학연구소 선임연구원.



**양 해 원**  
 1950년 3월 20일생. 1971년 서울대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1982년 일본 Kyoto대 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년 미국 Yale대 방문교수. 1986년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수. 대한전기학회 부회장.