

EP 레이더의 D&S PRI와 Stagger PRI 신호식별 알고리즘

임중수^{1*}, 채규수¹
¹백석대학교 정보통신학부

A Novel Algorithm for Deinterleaving of D&S PRI and Stagger PRI Signals from the EP Radar

Joong-Soog Lim^{1*} and Gyoosoo Chae¹

¹Division of Information Communication, Baekseok University

요 약 본 논문에서는 전자전시스템을 사용하여 전자보호(EP) 레이더에서 송신되는 D&S PRI(pulse repetition interval) 신호와 스테거(stagger) PRI 신호를 신속하게 분석하는 새로운 방법을 제안하였다. 기존의 PRI 신호분석 방법은 레이더 펄스신호들의 도착시간(TOA)의 1차 차분을 이용하여 통계적인 방법으로 PRI 패턴을 분석하였으나 본 논문에서는 펄스신호들의 TOA 1차 차분과 2차 차분을 이용하여 다양한 PRI 패턴을 빠른 시간에 분석할 수 있는 방법을 제안하였다. 다양한 EP 레이더 PRI 신호들을 모의해서 송신한 후에 본 논문에서 제안한 알고리즘으로 신호식별을 수행한 결과 고정 PRI, 지터 PRI, D&S PRI, 스테거 PRI 등 다양한 PRI 신호들에 대한 식별능력이 우수하여 EP 레이더의 신호식별에 매우 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract In this paper, we propose a new method to quickly deinterleave the stagger PRI signals and D&S(Dwell and Switch) PRI signals from the EP radar using the electronic warfare system. While former algorithms were based on stochastic methods only using the first deviation of the TOA of radar signals, this paper uses the first and the second deviation of the TOA of radar signals to deinterleave multiple PRIs of EP radars. When we simulate multiple PRIs of EP radars and test the simulated radar signals using the proposed algorithm, various PRI signals such as fixed, jitter, D&S and stagger PRI are well deinterleaved in a short time. This algorithm is found to be very useful for electronic warfare systems.

Key Words : Stagger, Jitter, PRI, TOA, Dwell & Switch, EP

1. 서론

최신 레이더나 통신기에서는 장비의 성능을 향상시키기 위해서 다양한 전자보호(EP: electronic protection) 기능을 사용한다. 레이더에서 가장 많이 사용하는 EP 기능은 송신펄스 반복시간 즉, 펄스반복간격(PRI: pulse repetition interval) 변경과 반송파의 주파수를 수시로 변경하는 주파수급속변경(FA: frequency agility)이 많이 사용된다. 이러한 EP 기능들은 레이더의 표적 탐지능력을 향상시키고 레이더의 PRI 분석을 어렵게 하여 레이더 EP 능력을 강화시킨다[1-3].

전자전(EW: electronic warfare)시스템은 상대방 레이더 신호를 수신하여 레이더 주파수나 펄스폭, 펄스반복간격 등 각종 전자 파라미터 정보를 분석하여 상대 레이더의 종류를 식별한다. 그러나 최신 레이더에서는 전자전시스템의 신호식별을 방해하기위해서 변조용 펄스신호의 PRI를 여러가지 패턴으로 변화시켜서 레이더를 보호하고 있다[4].

펄스레이더에서 사용하는 펄스신호의 PRI 패턴은 펄스간격이 일정한 고정(fixed) PRI, 펄스 간격이 매우 조금씩 불규칙하게 변하는 지터(jitter) PRI, 펄스 간격이 펄스 단위로 크게 변하는 스테거(stagger) PRI, 펄스간격이 펄

*Corresponding Author : Joong-Soog Lim

Tel: +82-10-9680-0596 email: jslim@bu.ac.kr

접수일 12년 08월 10일

수정일 12년 09월 26일

게재확정일 12년 11월 08일

스그룹 단위로 크게 변하는 D&S (dwell & switch) PRI 신호 등이 있다.

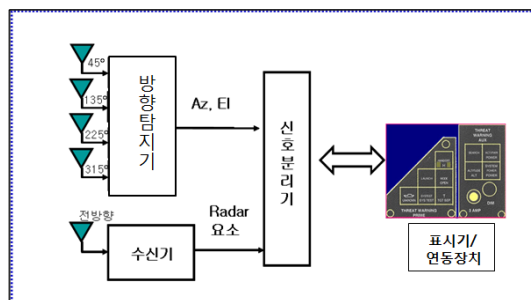
EP 레이더에 대한 PRI 분리 방법은 매우 어려워져 종래에는 레이더 펄스신호의 1차 차분을 통계적으로 처리하는 SDIF(sequential difference histogram), CDIF(cumulative difference histogram) 방법과 DFT(discrete fourier transform)을 사용하는 방법 등이 있었으나 스테저 신호나 D&S 신호에 대해서는 정확한 분석이 어려워서 여러가지 방법을 계속 연구하고 있다[5].

본 논문에서 제안한 방법은 레이더에서 송신한 펄스신호가 전자전시스템에 수신될 때 펄스신호가 수신기에 도착하는 시간(TOA: time of arrival)의 1차 차분(deviation)의 표준편차와 평균값을 계산한 후에, 이 값들을 사용하여 고정 PRI와 지터 PRI, 기타 PRI 신호를 식별하고, 1차 차분값으로 PRI가 식별되지 않는 기타 PRI 신호에 대해서는 TOA의 2차 차분값을 사용하여서 D&S PRI와 스테저 PRI 신호를 분석하는 방법이다.

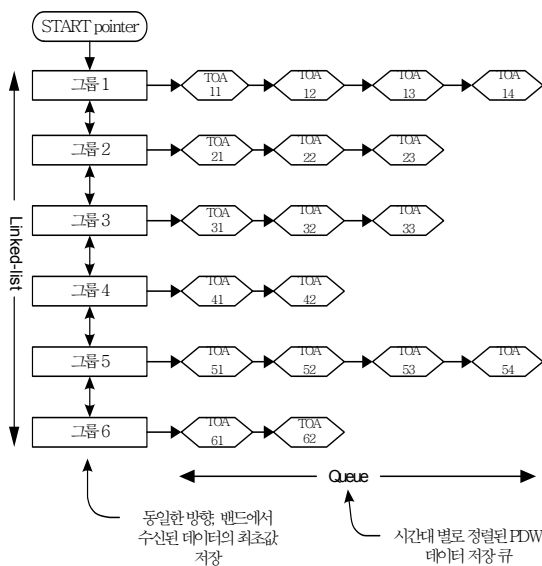
2. 방위와 주파수별 레이더 신호 그룹화

전자전시스템은 그림 1과 같이 레이더에서 방사하는 레이더 신호를 수신하여 방향탐지기에서는 레이더의 방위각(Az: azimuth angle)과 양각(EI: elevation angle)을 측정하고, 수신기에서는 레이더의 주파수, 펄스세기, TOA, 변조방식 등 레이더의 전자기적 성질, 즉 레이더 요소(PDW: pulse description word)를 측정하여 신호분리기로 보내면, 신호분리기에서 TOA를 사용하여 PRI를 계산한 후에 레이더의 종류를 식별하여 표시기와 연동장치로 전달한다.

전자전시스템은 360도 전방위에서 송신하는 여러개의 레이더 신호를 동시에 수신하므로 여러 레이더의 PDW를 동시에 신호분리기로 전송한다. 신호분리기에서는 같은 종류의 레이더 신호를 구별하기 위해서, 먼저 레이더의 방위와 주파수가 같은 펄스들을 그룹화 한다. 본 연구에서 사용한 레이더 신호 그룹화 방법은 그림 2와 같은 Linked-List and Queue 방식으로 세로축은 그룹축으로 주파수와 방위각, 양각이 같은 펄스들의 그룹을 만들어 배치하고, 가로축에는 그룹이 같은 PDW 신호를 TOA가 빠른 순서로 배치하였다. 이 방법은 동일종류 레이더의 신호가 도착된 시간별(TOA₁₁, TOA₁₂ 등)로 같은 그룹에서 연결되기 때문에 레이더의 PRI를 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있다[6].



[그림 1] 전자전시스템 구성도
[Fig. 1] Block diagram of EW system



[그림 2] 동일 방위/주파수그룹의 TOA 배치
[Fig. 2] TOA arrangement w.r.t same direction and frequency signals

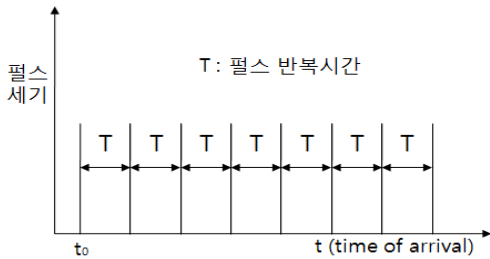
3. EP 레이더 PRI 패턴 모델링

펄스레이더가 반송파 신호를 변조하기 위하여 사용하는 펄스신호의 모양은 펄스반복시간에 따라 고정 PRI, 지터 PRI, 스테저 PRI, D&S PRI 등으로 구분한다. 고정 PRI가 신호 발생이 제일 간단하지만 레이더 탐지거리의 모호성 해결이나 EP 기능 향상을 위해서 PRI를 펄스단위 또는 일정한 펄스그룹 단위로 변경하기도 한다. 레이더의 펄스반복간격 T_k 는 전 펄스도착시간(t_{k-1})과 현재 펄스도착시간(t_k)의 시간차로써 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[7].

$$T_k = t_k - t_{k-1} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

고정 PRI 펄스신호의 모양은 그림 3과 같이 펄스와 펄스 사이의 간격이 일정하므로 N개의 펄스가 도착하면 평균펄스반복간격(T)은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} T_k \quad (2)$$



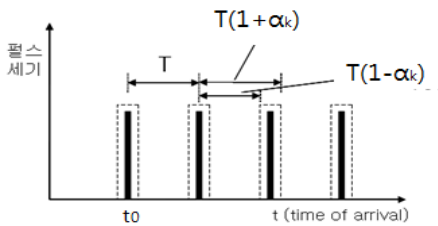
[그림 3] 고정 PRI 펄스신호
[Fig. 3] Pulse signals of fixed PRI

지터 PRI 신호는 그림 4와 같이 평균펄스반복간격 T 를 중심으로 PRI가 조금씩 변화하는 신호이다. 지터값 (v_k)은 평균펄스간격에 대한 순간펄스간격의 차이로써 식 (3)과 같이 표현하고, 지터비율(α_k)은 지터값을 T 로 나눈값으로 식 (4)와 같다. 그리고 지터신호의 k번째 신호 도착시간 t_k 는 지터비율로 표시하면 식(5)과 같다[1].

$$v_k = (t_k - t_{k-1}) - T, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

$$\alpha_k = \frac{v_k}{T}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

$$t_k = t_{k-1} + T(1 + \alpha_k), \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$



[그림 4] 지터 PRI 펄스신호
[Fig. 4] Pulse signals of jitter PRI

D&S PRI는 펄스신호가 펄스반복시간 T_1 으로 N_1 회, T_2 로 N_2 회, T_3 로 N_3 회, ... T_N 으로 N_n 회 반복한 후에 다시 T_1 으로 N_1 회, T_2 로 N_2 회, T_3 로 N_3 회, ... T_N 으로 N_n 회 반복하는 형태이다. D&S

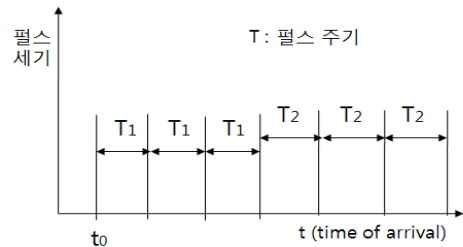
PRI 신호의 프레임 주기 T_f 는 각각의 펄스주기와 반복 횟수를 곱한 것의 합으로 식 (6)과 같고, k번째 신호의 도착시간 t_k 는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_f = N_1 \times T_1 + N_2 \times T_2 + N_3 \times T_3 \dots + N_n \times T_N \quad (6)$$

$$t_k = \begin{cases} t_k^{T_1} = t_0 + kT_f + pT_1, & p = 1, 2, 3 \dots N_1 \\ t_k^{T_2} = t_0 + kT_f + iT_1 + qT_2, & q = 1, 2, 3 \dots N_2 \\ t_k^{T_3} = t_0 + kT_f + iT_1 + jT_2 + rT_3, & r = 1, 2, 3 \dots N_3 \\ \dots \dots \dots \end{cases} \quad (7)$$

여기에서 t_0 는 펄스신호 시작시간이며, k 는 프레임 번호($k = 0, 1, 2, 3, \dots$)이다. 예를 들면 펄스간격이 T_1 으로 3회, T_2 로 3회 반복하는 D&S PRI 신호는 그림 5와 같고, k번째 신호 도착시간 t_k 는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$t_k = \begin{cases} t_k^{T_1} = t_0 + kT_f + pT_1, & p = 1, 2, 3 \\ t_k^{T_2} = t_0 + kT_f + 3T_1 + qT_2, & q = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (8)$$



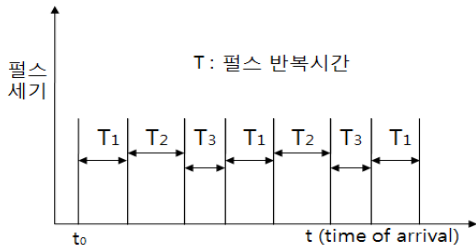
[그림 5] D&S PRI 펄스신호
[Fig. 5] Pulse signals of D&S PRI

스태저 PRI 신호는 펄스간격이 서로 다른 N개의 펄스가 프레임(frame)단위로 반복되는 형태이며 프레임주기 (T_f)는 한 프레임에 포함된 펄스간격들 ($T_1, T_2, T_3, T_4, \dots, T_N$)의 합이 된다. 따라서 스태저 PRI 신호는 펄스간격이 $T_1, T_2, T_3, T_4, \dots, T_N$ 인 N개의 펄스열이 프레임마다 반복되는 것으로 그림 6과 같으며, k번째 신호 도착시간 t_k 는 식 (10)과 같다[8].

$$T_f = T_1 + T_2 + T_3 + \dots T_N \quad (9)$$

$$t_k = \begin{cases} t_k^{T_1} = t_0 + kT_f + T_1, \\ t_k^{T_2} = t_0 + kT_f + T_1 + T_2, \\ t_k^{T_3} = t_0 + kT_f + T_1 + T_2 + T_3, \\ \dots\dots\dots \\ t_k^{T_N} = t_0 + kT_f + T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_N, \end{cases} \quad (10)$$

여기서 t_0 는 펄스신호 시작시간이며, k 는 프레임 번호($k = 0, 1, 2, 3, \dots$)이다



[그림 6] 스테저 PRI 펄스신호
[Fig. 6] Pulse signals of stagger PRI

4. TOA 차분을 이용한 PRI 분리

4.1 TOA 1차 차분을 이용한 PRI 분리

그림 2와 같이 레이더신호가 TOA 순서로 배열되어 하나의 수열을 구성하고 있는 경우에는 레이더의 순시 PRI(T_i)는 TOA의 1차 차분($t_{i+1} - t_i$)으로 구할 수 있다. 또한 N 개의 펄스가 수신될 경우 PRI 평균(T_{mean})과 표준편차(σ)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{mean} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} T_i \quad (11)$$

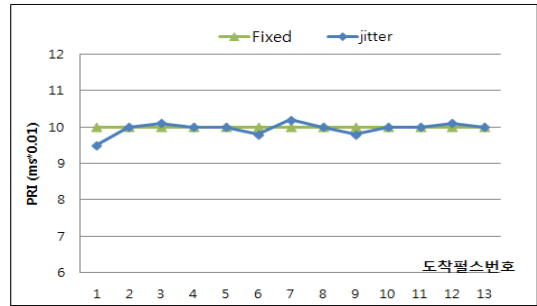
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^{N-1} (T_i - T_{mean})^2} \quad (12)$$

고정 PRI 신호의 PRI 평균과 표준편차를 구해보면 평균은 일정하며, 표준편차는 0이다. 일반적으로 측정오차 등을 고려하여 PRI 변화가 평균값의 1% 이하이면 고정 PRI로 분류한다[1].

지터 PRI 신호의 PRI 평균과 표준편차를 구해보면, 평균은 고정 PRI 신호와 유사하나, 표준편차는 0이 아닌 고정 PRI 신호보다 큰 값을 갖는다. 일반적으로 표준편차가 평균값의 5% 이하이면 지터 PRI 신호로 간주하고 그 이

상이면 D&S 또는 스테저 등의 패턴 PRI 신호로 간주한다[1][9].

그림 7은 PRI 평균이 0.1ms인 고정 펄스신호와 PRI 평균이 0.1ms이고 표준편차가 0.0017ms, 표준편차가 평균의 1.7%인 지터 펄스신호의 PRI 모양이다.

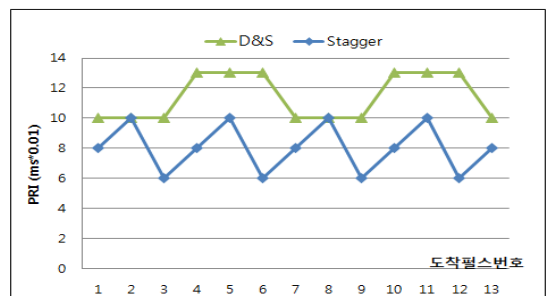


[그림 7] 고정 및 지터 펄스신호의 PRI
[Fig. 7] PRI of fixed and jitter pulse signals

D&S PRI 신호의 TOA 1차 차분은 그림 5와 같이 T_1 PRI 값이 다수 펄스 동안 지속되다가 T_2 PRI 값이 다수 펄스 동안 반복되는 모양을 갖는다. 이 경우에는 T_1 과 T_2 의 PRI 변화폭이 커서 표준편차가 크게되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 표준편차가 평균값의 5% 이상이면 D&S 또는 스테저 등의 패턴 PRI 신호로 분류 한다.

스테저 PRI 신호는 매 펄스마다 PRI가 변경되는 신호로 TOA의 1차 차분은 그림 6과 같이 매 펄스마다 바뀌고, 또한 T_1, T_2, T_3 의 PRI 변화폭이 커서 표준편차가 크게되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 표준편차가 평균값의 5% 이상이면 패턴 PRI 신호로 분류한다.

그림 8은 PRI 평균이 0.115ms, 표준편차가 0.015ms, 표준편차가 평균의 13.64%인 D&S PRI 신호와 PRI 평균이 0.08ms, 표준편차가 0.0163ms, 표준편차가 평균의 20.4%인 스테저 PRI 신호의 PRI 모양이다.



[그림 8] D&S와 스테저 펄스신호 PRI
[Fig. 8] PRI of D&S and stagger pulse signals

4.2 TOA 2차 차분을 이용한 PRI 분리

스태거 PRI, D&S PRI 신호 등 TOA 1차 차분의 표준편차가 평균값의 5% 이상인 신호에 대해서는 추가적으로 TOA 2차 차분을 계산하여 정확한 PRI 분리를 시도한다. TOA 2차 차분(ΔT_i)은 식 (1)을 이용하여 식 (13)과 같이 유도할 수 있으며, N개의 펄스가 수신된 경우 ΔT_i 의 절대값의 평균과 표준편차는 식 (14), (15)와 같이 구할 수 있다.

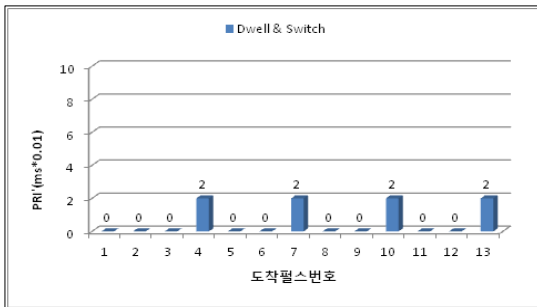
$$\Delta T_i = T_{i+1} - T_i = t_{k+1} - 2t_k + t_{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (13)$$

$$\Delta T_{mean} = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^{N-2} |\Delta T_i| \quad (14)$$

$$\Delta \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-3} \sum_{i=1}^{N-2} (\Delta T_i - \Delta T_{mean})^2} \quad (15)$$

그림 8의 D&S 펄스신호의 2차 차분의 절대값을 구해보면 그림 9와 같고, D&S 펄스신호는 일반적으로 다음과 같은 특성을 지니고 있어서 신호분리에 유용하게 사용할 수 있다.

- 1) D&S 펄스신호의 2차 차분 절대값은 그림 9와 같이 0, 양수, p-1 개의 0, 양수, q-1개의 0,.... 순으로 양수와 0이 반복된다.
- 2) 2차 차분 절대값의 평균은 1차 차분 평균이 같은 스태거 신호의 평균값보다 작다.

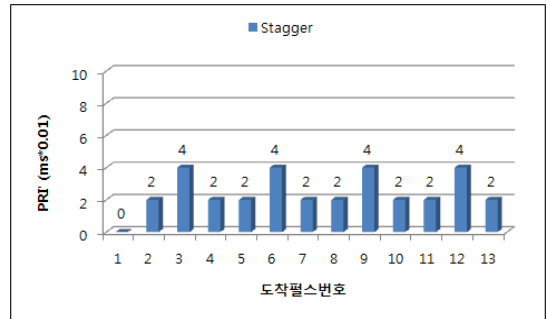


[그림 9] D&S 펄스신호 2차 차분의 절대값
[Fig. 9] Absolute values of 2nd deviation of TOA into D&S pulse signals

그림 8의 스태거 펄스신호의 2차 차분의 절대값을 구해보면 그림 10과 같고, 스태거 펄스신호는 일반적으로 다음과 같은 특성을 지니고 있어서 신호분리에 유용하게 사용할 수 있다.

- 1) 스태거 펄스신호의 2차 차분 절대값은 매 펄스마다 0 아닌 상수값을 갖는다.

- 2) 2차 차분 절대값의 평균값은 1차 차분 평균값이 같은 D&S 신호의 평균값보다 크다.



[그림 10] 스태거 펄스신호 2차 차분의 절대값
[Fig. 10] Absolute values of 2nd deviation of TOA into stagger pulse signals

4.3 펄스열 분리 알고리즘

본 논문에서 제안한 레이더 펄스신호의 TOA 1차 차분과 2차 차분을 이용한 PRI 분리 알고리즘을 순서대로 정리하면 다음과 같다.

- 1) 펄스신호 TOA 자료(PDW에 포함됨) 입력.
- 2) 주파수와 방위 그룹별로 TOA 배치
- 3) TOA 1차 차분(PRI) 계산.
- 4) PRI의 평균과 표준편차 계산.
- 5) PRI의 오차가 평균의 1% 미만이면 고정 PRI로 판단.
- 6) PRI의 표준편차가 평균의 1-5%이면 지터 PRI로 판단.
- 7) 그 외의 경우에 대해서는 TOA의 2차 차분 (PRI의 1차 차분) 계산.
- 8) TOA의 2차 차분 절대값의 평균과 표준편차 계산.
- 9) TOA의 2차 차분 절대값 중에서 값이 0인 개수와 0이 아닌 정수 개수를 합하여서, 0의 개수가 많으면 D&S로 분류.
- 10) 그 외의 경우는 스태거로 분류.
- 11) PRI 종류, 평균값, 표준편차 출력

5. PRI 분리시험 및 결론

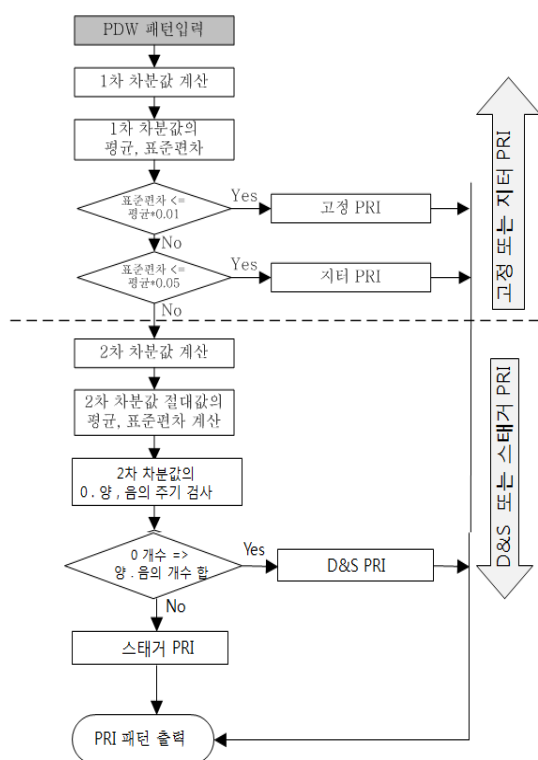
본 논문에서 제시한 PRI 분리 알고리즘을 시뮬레이터로 구성한 후에 [표 1]의 'input TOA'와 같은 EP 레이더 신호를 입력하여 PRI 분리 시험을 수행하였다. 'input TOA'에서 0, 10000, 20000 등은 입력펄스의 TOA를 나타내는 상대적인 값이며, 절대시간으로 변경할 경우에는 10.0ns(nano second)를 곱해주면 된다.

TOA의 1차 차분에 대한 값들을 구해보면 평균은

11,500, 표준편차는 1,500, 평균에 대한 표준편차비는 13.64%로 분석되어서 피시험 펄스신호는 스테거 또는 D&S 형태의 펄스신호로 분석되었다.

또한 TOA 2차 차분을 구해서 0의 개수와 0이 아닌 정수 개수를 비교한 결과 0의 개수가 12, 0이 아닌 정수가 6이므로 0의 개수가 더 많아서 D&S 펄스신호로 확인되었으며, 2차 차분 절대값의 평균은 1,000이다.

본 논문에서 제시한 TOA의 1차 차분과 2차 차분을 이용한 PRI 식별방법으로 전자전시스템이 식별하기 어려웠던 D&S PRI와 스테거 PRI신호를 쉽게 식별할 수 있게 하였다. 특히 이 방법은 기존에 사용하던 히스토그램 방법보다 분석시간이 짧고 정확하여서 전자전이나 전자정보시스템에 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 또한 삼각파 PRI, 톱니파 PRI 신호 등 패턴 PRI 신호에 대한 정확한 분석을 위해서 앞으로도 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.



[그림 11] PRI 분리 플로우차트
[Fig. 11] Flowchart of PRI deinterleaving

[표 1] D&S 펄스신호 분석
[Table 1] Analysis of D&S pulse signals

Input TOA:						
0	10000	20000	30000			
43000	56000	69000	79000			
89000	99000	112000	125000	138000		
148000	158000	168000	181000	194000		
207000	217000					
1st deviation of TOA						
10000	10000	10000	13000	13000	13000	
10000	10000	10000	13000	13000	13000	
10000	10000	10000	13000	13000	13000	
10000						
Number of PDW data :						20
average1 :						11500.0
std dev1 :						1,500.0
The type of PRI :						D&S or stagger
2nd deviation of TOA						
0	0	3000	0	0	-3000	0
0	3000	0	0	-3000	0	0
3000	0	0	-3000			
Number of zero:						12
Number of none zero:						6
average2 of absolute value :						1,000.0
The type of PRI :						D&S

References

- [1] Richard G. Wiley, ELINT The interception and analysis of radar signals, Artech House, Boston, pp. 281-289, 2006.
- [2] G. D. Curtis Schleher, A Electronic Warfare in the Information Age, Artech House, Boston, pp. 337-344, 1999.
- [3] Filippo Neri, Introduction to Electronic Defense Systems, Artech House, Boston, pp. 341-347, 2001.
- [4] A. W. Ataa and S. N. Abdullah, "Deinterleaving of radar signals and PRF identification algorithms", IET Radar Sonar Navig, Vol. 1, No 5, October 2007.
- [5] K. Nishiguchi, M. Kobayashi, "Improved Algorithm for Estimating PRI", IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems Vol. 36, NO 2, April 2000.
- [6] Joong-Soo Lim and at al, "A Deinterleaving Method of Frequency Agility Radar Signals in Comparison with PRI's of Radars", Transactions on the Korean Academic Industrial Society, Vol. 10, NO 8, pp.1832-1838, August

2009.

- [7] K. Banasiak and A. Pieniezny, "Radar Pulse Repetitive Paterns Detection", IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems Vol. 36, NO 2, April 2000.
- [8] Yan Mao and at al, "An Improved Algorithm of PRI Transform", Intelligent Systems of 2009, GCIS, Vol. 3, May 2009.
- [9] Joong-Soo Lim, "An Identify of Two Step Stagger signals Using the Second Deviation of Pulse Train", Transactions on the Korean Academic Industrial Society, Vol. 10, NO 7, pp.1536-1541, July 2009.

임 중 수(Joong-Soo Lim)

[종신회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학(공학사)
- 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학(공학석사)
- 1994년 3월 : Auburn University Dept. of EE(공학박사)
- 1994년 1월 ~ 2003년 2월 : 국방과학연구소 책임 연구원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- 2007년 1월 ~ 현재 : 한국전자파학회(영문) 편집위원

<관심분야>

전자파 수치해석, 초고주파 시스템, 전자전, 레이더

채 규 수(Gyoo-Soo Chae)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학 (공학사)
- 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학 (공학석사)
- 2000년 12월 : Virginia Tech (공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2003년 2월 : Amphenol Mobile(RF manager)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>

안테나 설계, 초고주파 이론