

펄스 레이더의 다단 Stagger PRI 신호분리 알고리즘

임중수* 정회원

The Algorithm for Deinterleaving of Multi-Step Stagger PRI Signals of Pulse Radars

Joong-Soo Lim* Regular Member

요 약

본 논문에서는 전자정보시스템을 사용하여 펄스 레이더에서 송신되는 다단 스테거(stagger) PRI(pulse repetition interval) 신호를 정확하게 분석하는 새로운 방법을 제안하였다. 기존의 PRI 신호분석 방법은 레이더 펄스신호 하드웨어 추적기(tracker)를 이용하여 신호도착시간(time of arrival)의 1차 차분을 이용하여 PRI 패턴을 분석하였으나 본 논문에서는 펄스신호들의 도착시간(TOA)의 1차 차분, 2차 차분과 PRI 히스토그램을 이용하여 다단 스테거 PRI 신호를 분석하는 알고리즘을 개발하였다. 본 연구는 펄스 레이더의 다단 스테거 PRI 신호식별에 매우 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words : Stagger, Jitter, PRI, TOA, Radar, Electronic Intelligence

ABSTRACT

In this paper, we propose a new method to deinterleave multi-stage stagger PRI signals of pulse radars using the electronic intelligence systems. While former algorithms were based on hardware PRI tracker only using the first deviation of the TOA of radar signals, this paper uses the first and the second deviation of TOA of radar signals and uses the PRI histogram method to deinterleave multiple PRIs of pulse radars. This algorithm can be used for deinterleaving various PRI signals at electronic intelligence systems.

I. 서 론

표적의 위치와 속도를 탐지하는 최신 펄스 레이더들은 장비의 성능을 향상시키기 위해서 다양한 전자보호(EP: electronic protection) 기능을 사용한다. 펄스 레이더에서 가장 많이 사용하는 EP 기능은 펄스 송신주기 즉, 펄스반복간격(pulse repetition interval: PRI) 변경과 반송파의 주파수를 변경하는 주파수급속변경(frequency agility: FA), 인트라(intra) 펄스변조 등이 많이 사용된다[1-2].

전자정보(Electronic Intelligence: ELINT)시스템은 펄스 레이더 신호를 수신하여 레이더가 사용하는 반송파 주파수, 펄스신호 세기, 펄스폭, 펄스반복간격, 펄스변조 등을 분석하여 펄스 레이더의 종류와 상태를 식별한다.

펄스 레이더에서 사용하는 펄스신호의 PRI는 레이더의 탐지거리와 장애물 제거 능력 등과 관련이 있어서 매우 중요하며, 고정(fixed) PRI, 지터(jitter) PRI, 스테거(stagger)

PRI, D&S(dwel & switch) PRI 신호 등이 있다[3-4].

EP 기능을 지닌 펄스 레이더에 대한 PRI 분리 방법은 매우 어려워서 종래에는 레이더 펄스신호의 TOA 1차 차분을 통계적으로 처리하는 SDIF(sequential difference histogram), CDIF(cumulative difference histogram) 방법과 DFT(discrete fourier transform)을 사용하는 방법을 사용하는 연구와 TOA 2차 차분을 이용하여 2단 스테거 신호 식별에 대한 연구는 있었으나, 다단 스테거 PRI 신호는 정확한 신호분리가 매우 어려워서 여러가지 방법을 계속 연구하고 있다[5-6].

II. 전자정보시스템 구성

레이더 펄스를 수신하여 레이더의 종류와 상태를 판단하는 전자정보시스템은 그림 1과 같이 레이더 신호를 수집하는 수신기에서 그림 2와 같은 레이더 신호들의 반송파 주파

*교신저자 : 임중수(jslim@bu.ac.kr)

접수일자: 2013년 12월 2일 , 수정완료일자: 2013년 12월 16일, 최종 게재확정일자: 2013년 12월 16일

수(carrier frequency), 펄스폭(pulse width: PW), 펄스세기(pulse amplitude: PA)와 펄스신호 도착시간(time of arrival: TOA) 등의 레이더 요소들을 측정하여 신호처리로 전송한다. 또한 방향탐지기에서 레이더가 있는 방향, 즉 레이더신호 도착방향(angle of arrival: AOA)을 측정하여 신호처리로 전송한다.

신호처리는 수신기와 방향탐지기에서 측정된 각각의 레이더 펄스에 대한 PA, PW, TOA, RF, AOA 등을 PDW(pulse description word)라 불리는 디지털 자료 묶음으로 만들어서 신호분석기(또는 신호분리기)로 보낸다. 신호분리기에서는 PDW신호를 AOA와 반송파 주파수를 사용하여 동일 레이더에서 나온 펄스들을 그룹화한다. 또한 동일한 레이더가 송신한 k번째 펄스와 k+1번째 펄스의 도착시간을 사용하여 PRI를 만들고, 이것을 레이더의 다른 요소들과 함께 표시기에 전시한다.

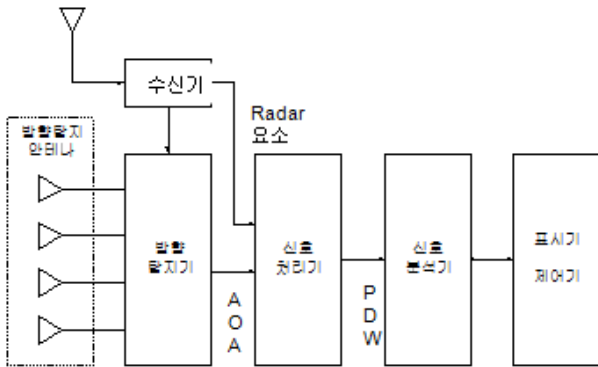


그림 1. 전자정보 시스템 구성도

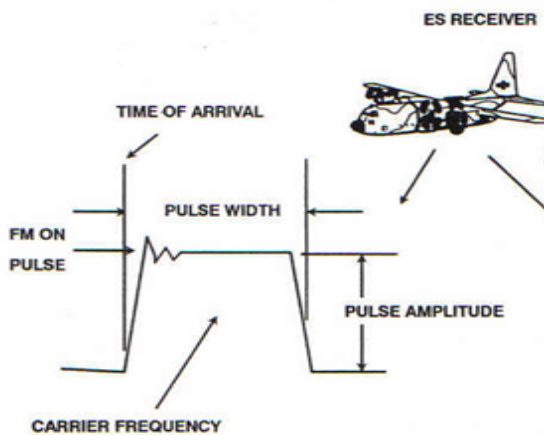


그림 2. 레이더 펄스신호의 구성요소[2]

III. 펄스 레이더의 PRI 종류 분석

펄스 레이더에서 PRI는 레이더의 탐지거리와 EP특성을 나타내는 중요한 요소이므로 매우 중요하다. PRI는 펄스반복 주기로 불리며, 펄스반복간격의 규칙성에 따라서 고정

PRI, 지터 PRI, 스테거 PRI, D&S PRI 등으로 구분된다.

펄스 레이더의 펄스반복간격 T_k 는 전 펄스도착시간 (t_{k-1})과 후 펄스도착시간(t_k)의 시간차로써 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

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

PRI가 일정한 경우에는 그림 3과 같이 펄스와 펄스 사이의 시간간격이 동일하기 때문에 N개 펄스가 수신된다고 가정하면 평균펄스반복간격 T 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 지터 PRI는 고정 PRI와 유사하나 펄스와 펄스 사이의 간격이 약간의 편차를 갖는 경우를 말하는 것으로 PRI 평균값을 기준으로 펄스간격 편차가 1% 이하이면 고정 PRI로 부르고, 15% 이하이면(어떤 경우는 30% 이하) 지터 PRI로 부른다[3].

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

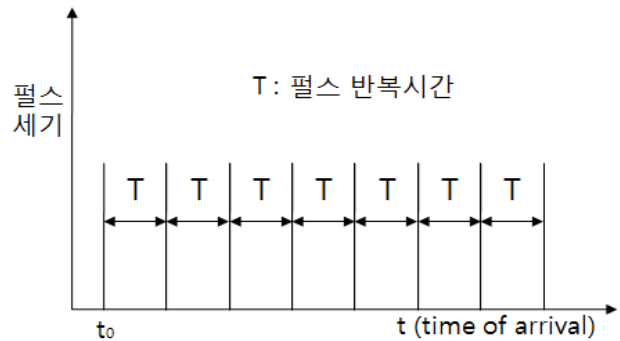


그림 3. 고정 PRI 펄스신호[6]

스테거 PRI 신호는 펄스간격이 서로 다른 N+1개의 펄스가 프레임(frame)단위로 반복되는 형태를 말하며 프레임주기(T_f)는 한 프레임에 포함된 펄스간격들 ($T_1, T_2, T_3, T_4, \dots, T_N$)의 합으로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 또한, 한 개의 프레임에 포함된 서로 다른 펄스 간격의 개수에 따라 2단, 3단 등 스테거의 단수를 명명한다.

$$T_f = T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_N \quad (3)$$

N단 스테거 PRI 신호는 펄스간격이 $T_1, T_2, T_3, T_4, \dots, T_N$ 인 N개의 펄스열이 프레임마다 반복되는 것으로 그림 4와 같은 모양이고, 여기에서 k번째 펄스신호의 도착시간 t_k 는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다[6-7].

$$t_k = \begin{cases} t_k^{T_1} = t_0 + kT_f + T_1, \\ t_k^{T_2} = t_0 + kT_f + T_1 + T_2, \\ t_k^{T_3} = t_0 + kT_f + T_1 + T_2 + T_3, \\ \dots \\ t_k^{T_N} = t_0 + kT_f + T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_N \end{cases} \quad (4)$$

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

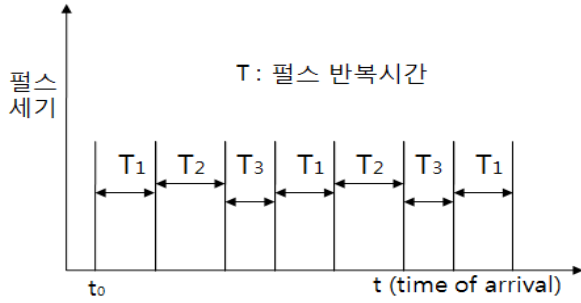


그림 4. 3단 스테저 PRI 펄스신호[6]

IV. 펄스신호의 그룹화

펄스 레이더가 여러 개인 경우 각 레이더에서 송신하는 펄스 신호는 그림 5 [p]와 같은 모양을 가지고 1초에 수 천개의 펄스가 전자정보 수신기에 입력된다. 예를 들면 4개의 레이더에서 송신된 신호가 그림 1의 수신기에 수신된 모양을 시간축에 표시하면 그림 5의 (a)와 같은 모양이 된다.

그림 5 (a)의 각 수직선은 수신된 펄스를 시간 축에서 그린 것으로 이를 확대하면 그림 5 [P]와 같이 펄스폭을 지니고 있으며 반송파 신호로 변조된 모양을 볼 수 있다. 또한 PRI 트랙커(tracker)를 사용하거나 주파수-방위필터를 사용하여 동일 방위의 동일 주파수 신호를 그룹화하면 그림 5의 (b), (c), (d), (e) 의 4개의 신호 그룹으로 표시된다. 이 때 (b), (c), (d), (e) 에 그룹화된 신호들은 레이더에서 송신한 펄스와 각종 고조파 펄스가 함께 그룹화되어 있어서 식 (2)로 PRI를 계산하면 오차가 크다.

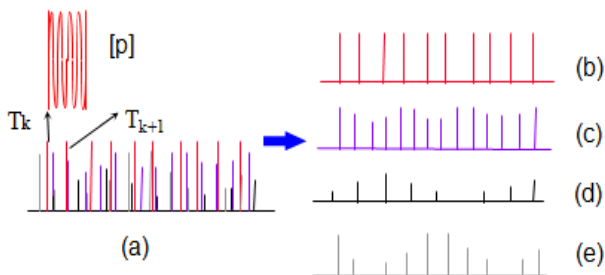


그림 5. 3단 스테저 PRI 펄스신호

이러한 오차를 개선하고 PRI패턴을 판단하기 위해서 본

논문에서는 그림 6 과 같이 PDW를 1초 단위로 그룹화한 후에 평균 PRI, PRI 표준편차와 PRI 히스토그램을 사용하여 다단 스테저 등의 PRI를 분석하는 알고리즘을 개발하였다.

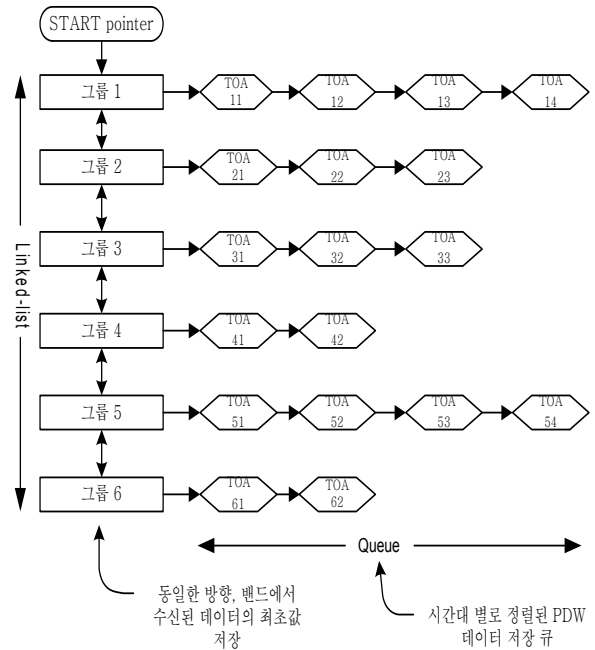


그림 6. 동일방위/주파수의 펄스신호 배치[6]

V. TOA 차분과 히스토그램에 의한 스테저 PRI 분리 알고리즘

5.1 TOA 차분을 이용한 고정 PRI와 지터 PRI 분리

전자정보시스템은 360도 전체 방위로부터 여러 개의 레이더에서 송신되는 신호를 동시에 수신하므로 여러 레이더의 PDW가 그림 5 (a)와 같이 동시에 신호분리기로 모여진다. 신호분리기에서는 같은 레이더에서 나온 신호를 모아서 그룹화하기 위해 하드웨어 추적기를 사용하는 경우가 많지만 본 연구에서는 H/W를 사용하지 않고 소프트웨어로만 처리하는 알고리즘을 개발하였다.

그림 6과 같이 레이더신호가 TOA 순서로 배열되어 하나의 수열을 구성하고 있는 경우에는 레이더의 순시PRI(T_i)는 TOA의 1차 차분 즉, $t_{i+1} - t_i$ 로 구할 수 있다. 또한 N개의 펄스가 수신될 경우 PRI 평균 T_{mean} 과 표준편차 σ 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$T_{mean} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} T_i \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^{N-1} (T_i - T_{mean})^2} \quad (6)$$

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

지터 PRI 신호의 PRI 평균값과 표준편차를 구해보면, 평균값은 고정 PRI 신호의 경우와 유사하나, 표준편차는 0이 아닌 고정 PRI 신호보다 큰 값을 갖는다. 일반적으로 표준편차가 평균값의 15%(또는 PRI 변화가 평균값의 30%)이하면 지터 PRI 신호로 간주하고 그 이상이면 D&S 또는 스테거 등의 패턴 PRI 신호로 대부분 간주한다.

PRI가 일정한 패턴을 갖는 형태의 신호 중에서 스테거 PRI 신호는 그림 4와 같이 매 펄스마다 PRI가 변경되고 TOA의 1차 차분 T_1 , T_2 , T_3 의 변화폭도 매우 커서 TOA 1차 차분과 2차 차분의 표준편차가 크게 되는 것을 알 수 있다. 그러나 D&S PRI 신호는 TOA 1차 차분 T_1 이 다수 펄스 동안 같은 크기로 반복된 후에, T_2 가 다수 펄스 동안 같은 크기로 반복되는 모양을 가지므로, TOA 1차 차분의 표준편차는 크지만 TOA 2차 차분의 표준편차는 작게 되는 것을 알 수 있다[6].

5.2 PRI 히스토그램을 이용한 다단 stagger PRI 분리

표 1의 4개 레이더 신호의 PRI 값들이 그림 5의 (a)와같이 혼합되어 수신된 경우에는 TOA 구별화를 통해서 그림 5의 (b), (c), (d), (e)로 구분할 수 있다. 그림 5 (b), (c), (d), (e)의 PRI 값이 표 1과 같은 경우 (b), (c), (d), (e)의 히스토그램은 그림 7, 8, 9, 10과 같으며, 각 신호들에 대한 평균 PRI와 표준편차를 계산하면 표 2와 같이 된다.

표 2에서 (b) 신호는 PRI 평균이 1000 us이고, PRI 변화가 평균값의 1% 이하이므로 고정 PRI, (c) 신호는 PRI 표준편차가 평균값의 15% 이하이므로 지터 PRI, (e)와 (f)는 표준편차가 평균값의 15% 이상이므로 스테거 신호로 볼 수 있다.

스테거 신호의 패턴을 분석하기 위해 (e)와 (f) 신호의 PRI 히스토그램을 그려보면 그림 9, 10과 같다. 따라서 (d) 신호는 PRI가 700us, 1300us인 2단 스테거 PRI, (e) 신호는 PRI가 600us, 1000us, 1400us인 3단 스테거 PRI, 신호이다.

표 1. 펄스 레이더 4 종의 PRI 값

레이더	PRI (us)					
b	995	995	995	1000	1000	1000
	1000	1000	1002	1000	1000	1000
	1000	1000	1000	1005	1005	1005
c	910	910	960	960	960	1000
	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	1000	1040	1040	1040	1100	1100
d	700	700	700	700	700	700
	700	700	700	1300	1300	1300
	1300	1300	1300	1300	1300	1300
e	600	600	600	600	600	600
	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	1400	1400	1400	1400	1400	1400

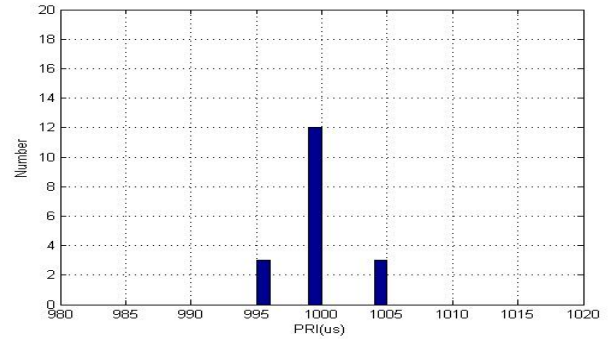


그림 7. 고정 PRI 히스토그램

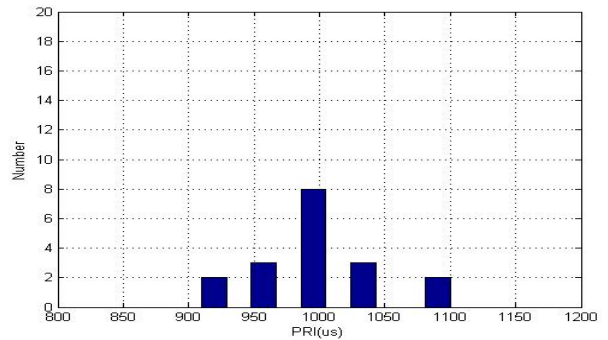


그림 8. Jitter PRI 히스토그램

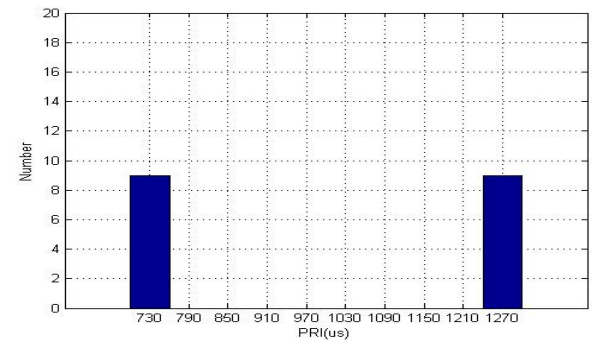


그림 9. 2단 스테거 PRI 히스토그램

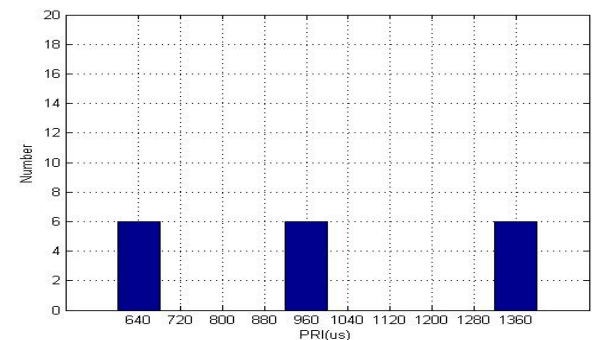


그림 10. 3단 스테거 PRI 히스토그램

표 2. 펄스 레이더 4 종의 PRI 종류

레이더	b	c	d	e
평균 PRI(us)	1000	1000	1000	1000
PRI 표준편차 / PRI 평균 (%)	0.29	5.18	30.8	33.6
PRI 종류	고정	지터	2단 스테거	3단 스테거

5.3 다단 스테저 펄스열 분리 알고리즘

다단 스테저 펄스신호를 분리하기 위해서 펄스신호의 TOA 1차 차분, 2차 차분을 계산한 후에 PRI 히스토그램을 사용하여 PRI를 분리하는 알고리즘은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- 1) 펄스신호의 TOA 값(PDW에 포함됨)을 입력.
- 2) 동일주파수와 동일방위 별로 TOA를 그룹화.
- 3) 그룹별 TOA 1차 차분(PRI) 계산.
- 4) 그룹별 PRI의 평균값과 표준편차 계산.
- 5) PRI의 변화가 평균값의 1% 미만이면 고정 PRI로 판단.
- 6) PRI의 표준편차가 평균값의 15%이하이면 지터 PRI로 판단.
- 7) 필요한 경우에는 TOA의 2차 차분을 계산.
- 8) 그룹별 TOA의 2차 차분의 절대값 평균과 표준편차를 계산.
- 9) TOA의 2차 차분 절대값 중에서 값이 0인 정수의 개수와 0이 아닌 정수 개수를 합하여서, 0인 개수가 많으면 D&S로 분류.
- 10) 그 외의 경우는 스테저(패턴)로 분류.
- 11) 스테저 신호를 히스토그램으로 분석하여 다단 스테저의 형태 결정
- 12) PRI 종류, 평균값, 스테저 형태를 결정

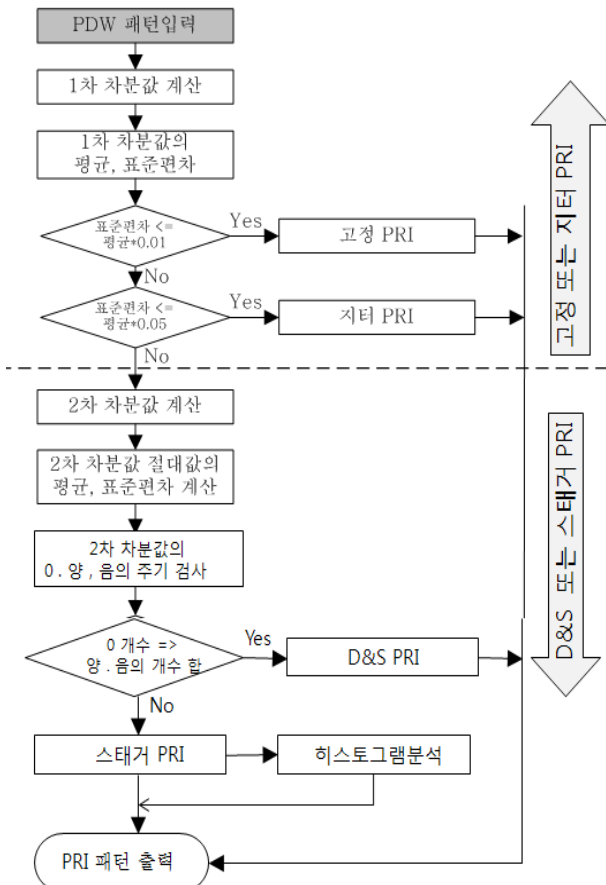


그림 11. PRI 분리 플로우차트

VI. 결론

본 논문에서 제시한 펄스신호의 TOA의 1차 차분, 2차 차분과 히스토그램을 이용한 PRI 식별방법으로 지금까지 전자정보시스템이 식별하기 어려웠던 다단 스테저 PRI신호를 쉽게 식별할 수 있게 되었다. 특히 이 방법은 기존에 사용하던 하드웨어 PRI 추적기를 이용하는 것보다 구성이 간단하고 PRI 값이 정확하여서 전자정보시스템에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] Andrea De Martino, Introduction to Modern EW Systems, Artech House, Boston, pp. 303-309, 2012.
- [2] G. D. Curtis Schleher, A Electronic Warfare in the Information Age, Artech House, Boston, pp. 337-344, 1999.
- [3] Richard G. Wiley, ELINT The interception and analysis of radar signals, Artech House, Boston, pp. 281-289, 2006.
- [4] Filippo Neri, Introduction to Electronic Defense Systems, Artech House, Boston, pp. 341-347, 2001.
- [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 Novel Algorithm for Deinterleaving of D&S PRI and Stagger PRI Signals from the EP Radar", Transactions on the Korean Academic Industrial Society, Vol. 13, NO. 11, pp. 5372-5378, November 2012.
- [7] Yan Mao and at al, "An Improved Algorithm of PRI Transform", Intelligent Systems of 2009, GCIS, Vol. 3, May 2009.

저자

임종수(Joong-Soo Lim)

정회원



- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 - 1994년 3월 : 미국 Auburn 대학교 E.E 대학원졸업(공학박사)
 - 1994년 3월~03년 2월 국방과학연구소 책임연구원/전파기술팀장
 - 2003년 3월~현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
 - 2007년 1월~현재 : 한국군사과학기술학회 평의원
 - 2011년 1월~현재 : 통신위성우주산업연구회 이사
- <관심분야> : 위성통신, 전파전파, 레이더, 전자전 설계