한국산학기술학회논문지
Vol. 10, No. 8, pp. 1832-1838, 2009

PRI 비교를 통한 주파수 급속변경 레이더 신호분리

임중수[1*], 홍경호[1], 이득영[2], 신동훈[2], 김용환[2]
[1]백석대학교 정보통신학부/RDRC, [2]삼성탈레스(주)

A De-interleaving Method of Frequency Agility Radar Signals in Comparison with PRI's of radars

Joong-Soo Lim[1*], Kyung-Ho Hong[1], Dukyung Lee[2], Dong-Hoon Shin[2] and Yong-Hwan Kim[2]
[1]**Division of Information and Communication, Baekseok University/RDRC**
[2]**Samsung Thales**

요 약 본 논문은 레이더의 펄스반복주기(PRI)를 포함한 각종 파라메타들을 비교하여 주파수 급속변경 레이더 신호를 식별하는 전자전 장비의 알고리즘에 관한 연구이다. 일반적으로 레이더는 단일주파수의 반송파를 사용하여 표적을 탐지하여 왔으나 최신 레이더들은 전자보호 기능을 강화하기 위해서 주파수 급속변경 반송파를 많이 사용하고 있다. 단일 주파수 사용 레이더 신호들이 전자전 장비에 수신되면, 전자전 장비는 레이더의 방위, 주파수, 펄스폭을 분석하여 레이더의 위치와 종류를 식별하였다. 그러나 주파수 급속변경 레이더인 경우에는 주파수가 비주기적으로 변경되므로 주파수를 레이더의 식별요소로 사용하는 것이 부적당하다. 따라서 본 논문에서는 Linked-List and Queue 방식으로 레이더 신호 요소들을 배치하여 레이더의 PRI를 구한 후에, PRI를 포함한 다수 파라메타들을 비교하여 주파수 급속변경 레이더를 식별하는 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 주파수 급속변경 레이더 신호를 포함한 레이더 신호의 분리가 매우 양호하였다.

Abstract In this paper, we present new signal de-interleaving method for the frequency agility radar in which the carrier frequency is changed irregularly. Generally radar use a fixed carrier frequency, and it is easy for electronic warfare system to de-interleave the radar signal with respect to the frequency, pulse width(PW), and direction of signal arriving(DOA). In frequency agility radar, it is difficult to de-interleave the radar signals according to the carrier frequency because the frequency is changed irregularly. We suggest a good de-interleaving method to identify the frequency agility radar signals in comparison with PRI's of radars. First we calculate pulse repeat Interval(PRI) of radar in linked-list and queue structure and de-interleave the radar signals with PRI, PW, and DOA, then identify the frequency agility radar. When we use the proposed algorism to the frequency agility radar, we have a good de-interleaving results with electronic warfare systems.

Key Words : Agility Radar, De-interleaving, Electronic Warfare, Frequency, Direction, Queue.

1. 서론

단일 주파수를 사용하는 레이더는 한 개의 반송파 주파수를 사용하여 표적에서 반사되는 반사파를 이용하여 표적의 거리, 방위와 속도를 측정한다. 그러나 주파수 급속변경(frequency agility: FA)레이더는 레이더의 반송파 주파수를 넓은 주파수 대역에서 불규칙적으로 이동함으로써 레이더의 탐지능력을 높이고, 전자전 장비의 전파탐지 활동을 방해한다[1].

전자전(electronic warfare: EW)은 레이더 신호와 같은

*교신저자 : 임중수(jslim@bu.ac.kr)
접수일 09년 07월 02일 수정일 (1차 09년 08월 12일, 2차 09년 08월 18일) 게재확정일 09년 08월 19일

전파를 수신하여 주변의 상황을 분석하고 대응하는 활동으로, 기능에 따라 전자전지원(electronic warfare support: ES), 전자공격(electronic attack: EA)과 전자보호(electronic protection: EP)로 구분한다. 전자전지원은 대부분 레이더 신호들을 수신, 검파하여 레이더 신호의 주파수, 펄스폭, 펄스크기, 도달방위와 같은 각종 요소들(parameters)을 도출하고, 도출된 자료를 분석하여 레이더들의 위치와 종류를 식별 한다.

만일 단일 주파수를 사용하는 레이더의 신호가 전자전 장비에 수신되면, 전자전 장비는 신호의 도달 방위, 주파수, 펄스폭을 사용하여 레이더의 위치와 종류를 식별한다. 그러나 주파수 급속변경 레이더인 경우에는 주파수가 비주기적으로 변경되므로 주파수를 이용하여 레이더의 종류를 식별하기는 매우 어렵다.

따라서 본 논문에서는 Linked-List and Queue 방식으로 레이더 신호 요소들을 2차원으로 그룹배치한 뒤에 각 그룹에서 레이더의 펄스 반복주기(pulse repeat interval: PRI)를 구한다. 다음에는 주파수가 달라도 방위, 펄스폭, 펄스반복주기가 같은 신호들을 비교하여 단일 주파수 사용 레이더와 주파수 급속변경 레이더를 식별하는 기법을 제안하였다.

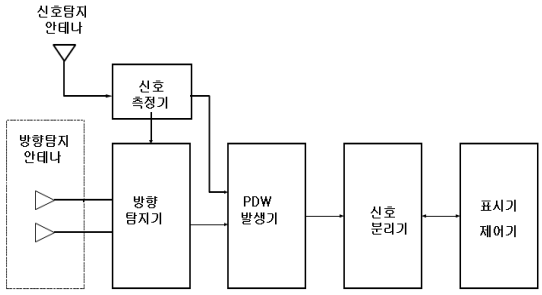
주파수 급속변경을 할 경우에는 이동하는 주파수의 폭이 넓을수록 ES 장비가 신호를 식별하기가 어려워진다. 그러나 레이더에서도 주파수의 급속변경폭이 넓을수록 주파수 발생장치가 복잡해지고, 고주파 증폭기와 안테나를 포함한 송수신기가 광대역 주파수에서 동작해야하기 때문에 설계가 어렵고 효율이 떨어진다. 일반적으로 최신 레이더가 사용하는 주파수 급속변경의 범위는 500MHz 정도이다.

본 논문은 2절에서 레이더의 PDW(pulse description words) 구성, 3절에서 FA 레이더의 특성, 4절에서 Linked-List and Queue 구조를 이용한 PRI 계산과 PRI 비교를 통한 FA레이더 신호 분리 알고리즘, 5절에서는 4절에서 제안된 알고리즘을 이용하여 128 bit로 구성된 FA 레이더 신호를 모사한 결과를 제시하였다.

2. 레이더 신호의 PDW 구성

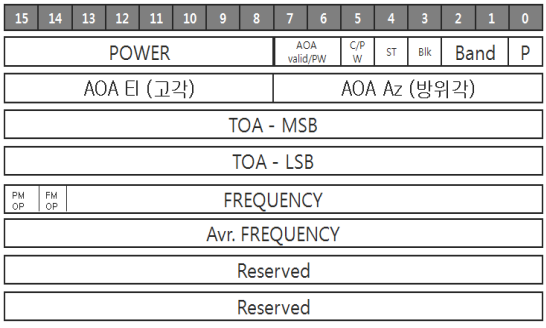
전자전지원 장비는 일반적으로 그림 1과 같이 신호탐지 안테나와 신호측정기, 방향탐지 안테나와 방향탐지기, PDW 발생기, 신호분리기, 표시기 및 제어기로 구성되어 있다.

레이더 신호가 전자전지원 장비에 도달하면, 전자전 장비는 신호측정기에서 신호의 반송파주파수와 펄스폭(pulse width: PW), 펄스크기(pulse amplitude: PA), 펄스 도착시간(time of arrival: TOA), 반송파 신호의 변조형태 등을 측정한다. 또한 방향탐지기에서 레이더 신호의 도래 방위(direction of arrival: DOA)를 측정하여 PDW 발생기로 보낸다.



[그림 1] 전자전 지원 장비 구성도

PDW 발생기는 수신된 신호의 세부요소들을 종합하는 곳이다. PDW는 수신되는 신호에 대한 설명 자료이므로 수신신호를 펄스 단위로 구분해서 각 펄스의 주파수, PW, PA, TOA, DOA, 변조형태 등을 표시한다. PDW는 보통 64 비트 또는 128 비트 로 구성되어 있다. 신호분리기에서는 동시에 수신되는 여러 개의 PDW를 분석하여 동일한 방향과 주파수를 사용하는 PDW를 그룹화하여 레이더의 펄스반복간격을 측정하고, 레이더의 종류를 판정한다[2].



[그림 2] 레이더 PDW 구성

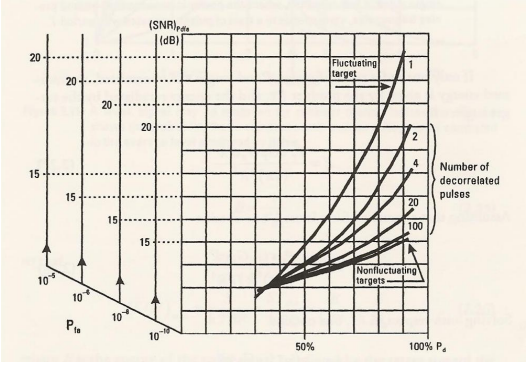
레이더의 특성을 설명해주는 PDW를 구성하는 요소들은 여러 가지가 있으며, 중요한 요소는 그림 2와 같이 주파수 밴드, 고각방위, 방위각방위, 펄스 시작시간, 펄스 종료시간, 펄스폭, 펄스크기, 주파수, F-MOP(frequency change on modulation), P-MOP(phase change on modulation) 등이 있다[3].

3. 주파수 급속변경 레이더 신호 특성

주파수 급속변경은 레이더가 반송파 주파수를 펄스 단위로 변경하거나 또는 그룹 단위(batch to batch)로 변경하는 것을 말한다. 주파수 급속변경은 기술적으로는 어렵지만 운용환경에 따라 레이더의 성능을 다음과 같이 매우 높일 수 있어서 최신 레이더에서는 많이 사용되며 특히 전자보호(EP) 기능이 매우 우수하다.

(1) 탐지거리 증가

레이더의 표적 탐지거리는 주어진 탐지확율(detection probability)과 오경보율(false-alarm probability) 환경에서 신호 대 잡음비(SNR)에 의해서 결정된다. 레이더의 표적 반사신호는 레이더파의 지면 또는 해면 반사 신호에 의해서 그 크기가 변화는 요동(fluctuating) 현상이 발생하며, 주파수 급속변경 신호를 사용할 경우 요동 현상이 감소되어 그림 3과 같이 SNR을 약 5.5 dB 까지 증가시킬 수 있으며 탐지거리가 최대 35% 까지 증가된다[5].



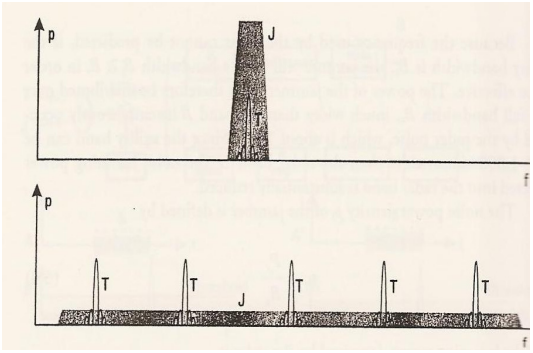
[그림 3] 주파수 급속변경에 따른 SNR 증가

(2) 클러터 제거

항해 레이더에서는 MTI(moving target indication) 기능을 이용해서 클러터 또는 채프 신호를 많이 제거 한다. 그러나 최신 레이더에서는 MTI 기능 대신에 주파수 급속변경을 이용해서 클러터를 제거하는 경우가 많다. 레이더의 반송파 주파수를 변경함에 따라 클러터 신호의 변화폭이 표적신호의 변화폭과 비교해서 매우 크므로 클러터 신호를 제거할 수 있다. FA를 사용해서 클러터 신호와 표적신호 합의 평균값을 구하면 표적이 있는 시간에 신호세기가 커짐으로 이를 이용하여 클러터 신호를 제거한다.

(3) 재밍효과 감쇠

재밍 효과는 레이더의 반송파 주파수 대역에 반비례한다. 주파수 급속변경을 사용해서 레이더 반송파 주파수 대역이 넓어지면 전자전 장비의주파수당 재밍신호 세기는 비례적으로 감소한다. 이러한 재밍효과 감쇠는 그림 4에서 보는바와 같이 주파수 대역폭이 매우 중요하며, 군사용 레이더에서 매우 유용하다[6].

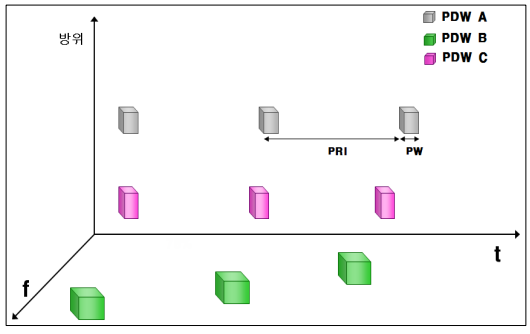


[그림 4] 주파수 급속변경에 따른 재밍효과

(4) 전자보호 기능 증대

전자전 지원에서는 레이더 신호를 수신하여 레이더의 각종 파라미터를 분석하고, 또 레이더의 위치와 종류 등을 분석한다. 레이더 파라메타를 분석할 때 매우 중요한 요소 중의 하나는 주파수이다.

만약 한 개의 레이더가 3개의 반송파 주파수를 사용하면 그림 5에서 0 도 부근에서 수신되는 신호처럼 방위와 PW, PRI는 같지만 주파수가 매 펄스마다 다른 형태의 신호가 된다. 이러한 레이더에 대해서 신호 분리 기능이 약한 전자전 장비는 마치 3 개의 주파수가 다른 레이더가 활동하는 것으로 분석한다. 이처럼 FA 레이더는 전자전 지원 장비의 신호분석을 어렵게 하고 레이더 식별에 오류를 가져오게 한다. 즉, 레이더의 전자보호 기능을 증대시킨다.



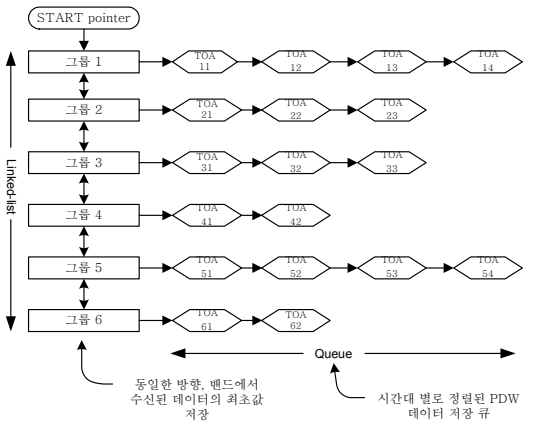
[그림 5] 주파수 급속변경 레이더 신호 형태

4. Linked-List & Queue 구조를 이용한 PRI 계산 및 FA 식별 알고리즘

신호분리기에 전달된 PDW는 레이더의 PRI를 계산하기 위해서 같은 종류의 요소들이 포함된 PDW 별로 그룹화시켜야 한다. 일반적으로 펄스신호 분리를 효과적으로 수행하기 위해서 1차적으로 방위각, 주파수, 펄스폭이 같은 PDW를 모아서 그룹화하며, 현재 많이 사용되는 그룹화 방법으로는 Mask and Processing이 있다[7].

본 논문에서 사용하는 Linked-List and Queue 방법은 마스크 사용 방법을 발전시킨 것으로 그림 6과 같이 DOA ,PW, 주파수가 같은 PDW를 각각의 그룹으로 분류하여 세로로 배치하고, 펄스입력 시간을 가로축으로 하여, 같은 그룹의 신호가 들어오면 입력 시간별로 TOA11, TOA12, TOA13 등으로 구분하여 행방향으로 배치한다. 또한 그룹1과 DOA, PW가 같고 주파수만 다른 PDW는 그룹2로 분류하여 그룹1과 FA 연관성을 쉽게 조사할 수 있도록 배치한다.

이처럼 PDW를 Linked-List & Queue 방식으로 배치하면, 레이더의 펄스 입력시간 간격이 PRI 이므로 만약 그룹 1에 동일한 레이더에서 방사된 펄스가 배열되어 있다면 TOA13에서 TOA12를 뺀 것이 PRI가 된다.



[그림 6] Linked-List & Queue 사용 분리 구조

주파수 급속변경 레이더 신호는 레이더의 방위나 펄스폭은 일정하나 반송파주파수가 펄스단위 또는 그룹단위로 변경되어서 마치 반송파 주파수가 다른 여러 개의 레이더가 같은 방위에 있는 것처럼 보인다. 그러나 대부분의 주파수 급속변경 레이더의 PDW를 분석하여 보면 DOA, PW, PRI가 대체로 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 반송파의 주파수가 달라도 DOA, PW가 일치하는 신호들을 연결리스트(linked-list)에 배치하고, 각 그룹의 PRI를 계산하여 DOA, PW, PRI가 같은 신호들을 찾으면 주파수 급속변경 레이더 신호를 찾을 수 있다[8].

실제적으로 주파수 급속변경 신호를 찾는 방법은 그림 6과 같은 Linked-List and Queue 구조에서 각 그룹별로 단일 주파수 사용 레이더 신호에 대한 신호분리를 실시한 후에, TOA가 중복되지 않으며, DOA, PW, PRI 가 일치하는 그룹들을 찾는다. 이 때 각 그룹의 주파수 차이를 계산하여 그 범위가 500 MHz 이하이면 1차적으로 FA레이더로 판정한다.

이것은 레이더 사용시에 동일 위치에서 PW, PRI가 같고 주파수차이가 약 500 MHz 이하인 레이더를 동시에 운용하면 레이더 상호간에 전파간섭이 심하고, 오경보율도 높아져서 유사한 주파수의 레이더를 같은 위치에서 동시에 사용하지는 않기 때문이다.

5. 신호분리 알고리즘 시험

종래에 사용하던 Mask and Processing 구조로 가면 주파수, 방위, 펄스폭이 같은 PDW를 마스크해서 Processing부에서 PRI를 계산하여 RF 주파수가 고정인 레이더에 대한 신호는 분리할 수 있었지만, RF 주파수 급속변경 레이더신호 분리는 매우 어려웠다. 본 논문에서 제안한 Linked-List and Queue 구조는 그림 6과 같이 세부 요소가 같은 각 그룹이 연결되어 있어서 각 그룹에서 PRI를 구한 후 방위, 펄스폭, PRI 등이 같고 주파수만 다른 그룹들을 쉽게 확인할 수 있으며, 이러한 그룹들을 통합하면 burst 주파수급속변경 레이더 신호를 찾을 수 있다.

주파수 급속변경 레이더신호 분리를 위해 표 1은 128 비트 PDW를 사용한 주파수 급속변경 레이더에 대한 임의의 PRI 데이터를 실험한 예이다.

표 1의 상단부는 입력 PDW 값의 자료이고, 하단부는 PDW 값을 신호 분리한 결과이다. 표 1의 앞부분 0/0, 5000/0, 5000/12300, 5000/24600 등의 값은 RF 값이 5000 MHz인 경우 입력펄스가 도달한 시간을 나타내는 디지털 값이다. 신호발생 프로그램에서 1 비트의 기본시간을 7.8125 ns로 사용했기 때문에 수신기에 펄스신호가 도달한 시간은 0 ns를 기준으로 잡을 때, 12,300* 7.8125 ns, 24,600*7.8125 ns, 36,900*7.8125 ns 간격으로 펄스가 도달하고 있음을 나타낸다. 따라서 마지막 펄스가 도달한 시간은 356,700* 7.8125 ns로 약 2786.7 μs가 된다. 또한 5500/369000, 5500/344400 등의 값은 RF 값이 5500 MHz인 경우 입력펄스가 도달한 시간을 나타내는 디지털 값이다.

[표 1] 고정 PRI의 Frequency Agility 레이더 신호 분리

```
Input PDW(주파수-MHz/도착시간):    0/0    5000/12300
 5000/24600        5000/36900              5000/49200
5000/61500     5000/73800     5000/86100    5000/98400
 5000/110700          5000/123000          5000/135300
5000/147600   5000/159900   5000/172200   5000/184500
5000/196800   5000/209100   5000/221400   5000/233700
 5000/246000   5000/258300  5000/270600   5000/282900
 5000/295200          5000/307500          5000/319800
5000/332100  5000/344400   5000/356700   5500/369000
 5500/381300          5500/393600          5500/405900
5500/418200         5500/430500            5500/442800
5500/455100      5500/467400      5500/479300

The data values of the list are forward order :

Number of PDW data :                        30
Azimuth of PDW data :                       20
Radio Frequency :                          5000
Power :                                     1
Band :                                      1
The time of first arrived PDW's :        0.0         us
The time of last arrived PDW's :         2786.7      us
The type of PRI :                          Fixed PRI
average1 : 12300.0      average2 : 0.0         average3
: 0.0
stddev1   : 0.0           stddev2   : 0.0

++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
+
Number of PDW data :                        10
Azimuth of PDW data :                       20
Radio Frequency :                          5500
Power :                                     1
Band :                                      1
The time of first arrived PDW's :        2882.8      us
The time of last arrived PDW's :         3747.7      us
The type of PRI :                          Fixed PRI
average1 : 12300.0      average2 : 0.0         average3
: 0.0
stddev1   : 0.0           stddev2   : 0.0

+ + + + + + + + + + + + + F R E Q U E N C Y
AGILE+++++++++++++++++++
Radio Frequency 1:                         5000
Radio Frequency 2:                         5500
The type of PRI 1:                         Fixed PRI
The type of PRI 2:                         Fixed PRI
PDW1: average1 : 12300.0          stddev1 : 0.0
average2 : 0.0              stddev2 : 0.0
PDW2: average1 : 12300.0          stddev1 : 0.0
average2 : 0.0              stddev2 : 0.0
Freed LINKED-LIST and QUEUE!!!
```

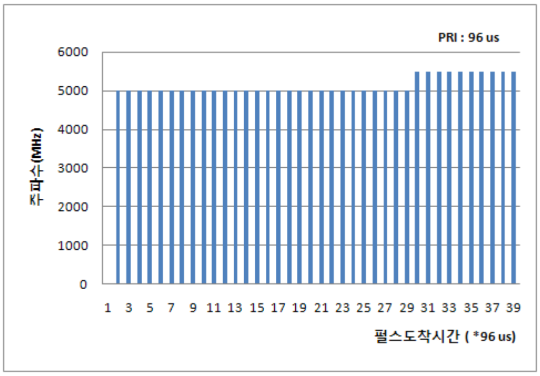
PRI의 표준편차는 그림 6에서 각 Linked- List 별로 PRI를 구한 후에, 식 (1), (2)을 이용하여 계산하였다.

$$T=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}T_i \tag{1}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{n}(T_j-T)^2} \tag{2}$$

표 1의 하단부는 PDW를 분리한 결과로서 3 부분으로 나누어져 있다. 첫째 부분은 RF 주파수가 5000 MHz인 신호가 30개가 수신되었고, PRI는 12300이다. 둘째부분은 RF 주파수가 5500 MHz인 신호가 10개가 수신되었고, PRI는 12300이다. 셋째부분은 앞부분의 2종류의 신호를 추가분석해본 결과 RF 주파수가 5000, 5500 MHz이고 PRI는 12300인 FA레이더 신호이다.

그림 7은 표 1의 PDW데이터에 대한 분석결과를 PRI와 주파수를 기준으로 그래프로 나타낸 것이다. PRI가 96 us이고 RF 주파수가 5000 MHz로 동작하다가 약 2.8 ms 후부터 RF 주파수가 5500 MHz로 동작하는 FA레이더의 신호분석 결과이다.



[그림 7] 주파수 급속변경 레이더 신호

6. 결론

본 연구에서 사용한 Linked-List & Queue 방법은 기존에 사용하던 마스크를 이용하는 레이더 신호분석 알고리즘보다 PDW를 그룹과 시간에 따라 2차원으로 분리하는 구성을 지니고 있어서 PRI 계산이 정확하고 PRI 계산시간이 짧은 장점이 있다.

또한 주파수 급속 변경 레이더에 대한 신호를 찾는 방법으로 반송파의 주파수가 달라도 DOA, PW가 일치하는 신호들을 인접한 연결리스트에 배치하고, 각 그룹에서 DOA, PW, PRI가 같은 그룹들을 찾아서 주파수의 변화폭과 상태를 분석하면 주파수 급속변경 레이더 신호를 찾을 수 있다.

개발된 알고리즘을 고정 PRI의 주파수 급속변경 레이더 PDW에 적용한 결과 PRI와 주파수 변경 값을 잘 분석하였다. 본 알고리즘은 고정 PRI의 주파수 급속변경 레이더신호 및 지터 PRI의 주파수 급속변경 레이더신호 분리에 적용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] G. D. Curtis Schleher, *A Electronic Warfare in the Information Age,* Artech House, Boston, 1999.

[2] Richard G. Wiley, *ELINT The interception and analysis of radar signals*, Artech House, Boston, 2006.

[3] A. Logothetics, V. Krishnamurthy, " An Interval-Amplitude Algorism for De-inter leaving Stochastic Pulse Train Sources“, IEEE Transactions on Signal Processing Vol. 49, NO 5 May 1998.

[4] Pia Hansson, A*nalysis of some methods for de-interleaving of pulse trains,* XR-EE-SB -2007, 2007.

[5] Filippo Neri, *Introduction to Electronic Defense Systems,* Artech House, Boston, 1991.

[6] Sergei A. Vakin, *Fundamental of Electronic Warfare*, Artech House, Boston, 2001.

[7] http://www.zikimi.co.kr

[8] 임중수 외, “레이저 펄스열의 2차 차분을 이용한 PRI 패턴 분석”, 한국콘텐츠학회논문지 8권 4호, pp. 63-70, 2008.4.

임 중 수(Joong-Soo Lim) **[정회원]**

- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학과(공학석사)
- 1994년 3월 : Auburn University Dept. of EE(공학박사)
- 1994년 1월 ~ 2003년 2월 : 국방과학연구소 책임 연구원/ 전파탐지 팀장
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- 2004년 1월 ~ 현재 : 한국군사과학기술학회 편집위원
- 2007년 1월 ~ 현재 : 한국전자파학회 정보전자연구회 위원장

<관심분야>
전자파 수치 해석, 초고주파 시스템

홍 경 호(Kyung-Ho Hong) **[정회원]**

- 1993년 2월 : 영남대학교 전자공학과(공학 석사)
- 2000년 2월 : 영남대학교 전자공학과(공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>
패턴인식, 신경망, 임베디드 시스템

신 동 훈(Dong Hoon Shin) **[정회원]**

- 2000년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 2002년 2월 : KAIST 전기전자공학과 (공학석사)
- 2005년 8월 : KAIST 전기전자공학과 (공학박사)
- 2007년 11월 ~ 현재 : 삼성탈레스 전자전 그룹 전문연구원

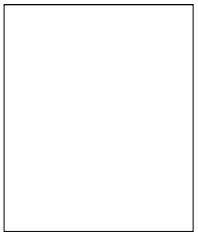
<관심분야>
전자파 수치 해석, 초고주파 시스템, 전자전 방향탐지 시스템

이 득 영(Dukyung Lee) **[정회원]**

- 2006년 1월 ~ 현재 : 삼성탈레스 종합연구소 전자전 그룹장

<관심분야>
전자파 수치 해석, 초고주파 시스템

김 용 환(Yong Hwan Kim) **[정회원]**



- 2009년 1월 ~ 현재 : 삼성탈레스 종합연구소 연구소장

<관심분야>
전자파 수치 해석, 초고주파 시스템