

우수한 전자 보호 기능을 가진 미상 레이더 펄스의 상/하 슬라이딩 PRI 식별 알고리즘

이 용 식*, 김진수*, 김의규*, 임재성^o

Identification Algorithm for Up/Down Sliding PRI of Unidentified RADAR Pulses With Enhanced Electronic Protection

Yongsik Lee*, Jinsoo Kim*, Euigyoo Kim*, Jaesung Lim^o

요 약

현대전에서의 전자전은 전쟁에 있어서 승패를 좌우한다. 따라서 적의 미상 레이더에서 방사하는 전자파를 수신하여 신호 처리 후 레이더의 변조방식을 식별하는 일은 전자전에서 중요한 핵심 과제이다. 본 논문에서는 최근 전자전 보호능력이 우수한 Linear Up Sliding PRI, Non-Linear Up Sliding PRI 방식과 Linear Down Sliding PRI, Non-Linear Down Sliding PRI 방식을 자동 식별하는 알고리즘을 TDOA(Time Difference Of Arrival) 개념을 적용하여 개발하였다. 안테나로 입력되는 레이더 펄스마다 각 제원을 산출하고 제원 중에서 펄스반복간격의 PRI 값으로부터 시간차의 특성을 산출하여 식별 알고리즘을 개발하였다. 알고리즘을 프로그래밍한 후 표본 PRI 데이터를 입력하여 처리한 결과, 모두 정확히 PRI 변조방식을 식별하였다. 개발된 알고리즘은 향후 ES(ESM, ELINT) 장비에 적용 가능할 것으로 판단한다.

Key Words : Sliding PRI(Pulse Repetition Interval), De-interleaving, PDW(Pulse Description word), ELINT

ABSTRACT

Success in modern war depends on electronic warfare. Therefore, It is very important to identify the kind of Radar PRI modulations in a lot of Radar electromagnetic waves. In this paper, I propose an algorithm to identify Linear up Sliding PRI, Non-Linear up Sliding PRI and Linear Down Sliding PRI, Non-Linear Down Sliding PRI among many Radar pulses. We applied not only the TDOA(Time Difference Of Arrival) concept of Radar pulse signals incoming to antennas but also a rising and falling curve characteristics of those PRI's. After making a program by such algorithm, we input each 40 data to those PRI's identification programs and as a result, those programs fully processed the data in according to expectations. In the future, those programs can be applied to the ESM, ELINT system.

• First Author : Department of Network Centric Warfare, Ajou University, ys8016@ajou.ac.kr, 정희원

o Corresponding Author : Department of Network Centric Warfare, Ajou University, jaslim@ajou.ac.kr, 종신희원

* Department of Network Centric Warfare, Ajou University, 정희원

논문번호 : KICS2016-04-061, Received May 4, 2016; Revised May 13, 2016; Accepted May 16, 2016

I. 서 론

미래 전장환경은 단일 센서탐지 및 영토감시, 유인 무기 등을 이용한 현재의 물리적인 육·해·공 전장 환경과 달리 C4ISR (Command, Control, Communication, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance)+ PGM (Precision Guided Munition) 을 통한 센서정보의 융합 및 광역화, 유인 및 무인 무기를 활용한 NCW(Network Centric Warfare) 전으로 빠르게 변화하고 있고 그 중에서 전자전은 매우 중요한 요소로서 적의 전자파를 수신하여 분석, 방사체를 식별하는 ES(Electronic Support)와 적의 무기체계의 전자파 사용을 억제하거나 감소시키는 EA(Electronic Attack), 전자장비의 전자파 사용을 보장하는 EP(Electronic Protection)로 구성되어 있다^[1]. 특히 전자전 무기체계의 EP기능을 보강하기 위해 레이더의 송신주파수를 변경하는 방법과 송신하는 펄스반복간격(PRI: Pulse Repetition Interval)을 수시로 변경하는 방법, 펄스내 주파수를 변경하는 인트라 펄스(Intra-Pulse) 변조방식을 사용한다. 펄스반복간격을 변화시키는 방법으로서 고정(Steady 또는 Constant) PRI, Jitter PRI, Random Jitter PRI, Pseudo Random Jitter PRI, Dwell and Switch PRI, Stagger PRI, Linear Up Sliding PRI, Linear Down Sliding PRI, Non-Linear Up Sliding PRI, Non-Linear Down Sliding PRI, Wobble PRI, Sinusoidal PRI 등이 있다^[2].

레이더 펄스파를 수신하여 미상의 PRI를 분석하기 위해 과거에는 SDIF(Sequential Difference Histogram)와 CDIF (Cumulative Difference Histogram) 방법을 사용하였으나 과정이 복잡하고 실시간 적용이 어려웠으며^[3] 특정 레이더의 펄스반복간격을 실시간 분석하기 위한 알고리즘도 국내 연구기관에서 극히 제한적으로 연구되고 있거나 대부분 외국의 알고리즘을 확보하여 그대로 적용하는 실정이다. 그러나 최근에 일부 기관, 기업 연구소에서나 레이더의 PRI 적용방식을 식별하기 위해 레이더에서 방사하는 펄스의 도착시간차, 즉 TOA (Time of Arrival)의 1차 차분, 2차 차분을 이용한 알고리즘을 연구 중에 있으며^[4], 본 논문에서는 그러한 TDOA (Time Difference of Arrival) 개념의 1차 차분과 2차 차분 적용 알고리즘을 EP기능이 탁월한 Linear Up Sliding PRI, Non-Linear Up Sliding PRI와 Linear Down Sliding PRI, Non-Linear Down Sliding PRI 각 특성에 적용하여 4가지의 PRI를 식별하는 것을 연구하였다.

II. 펄스반복간격 종류 및 De-Interleaving

2.1 레이더 신호 특성 및 PDW 데이터 생산

일반적으로 자유공간에는 수많은 종류의 통신 및 비통신 전자파 신호가 다양한 신호레벨과 방향으로 출현하고 있고 그러한 방식체로부터 방사되는 신호들 중에서 레이더 신호만을 선택하여 레이더 제원들을 추출한다. 실제적인 환경에서는 동시에 수많은 전자파가 존재하거나 출현하기 때문에 이들 신호를 가능한 동시에 처리하기 위해서는 광대역 또는 협대역의 수개 혹은 수십 개의 신호처리 모듈이 필요하다. 또한 전자신호 출현 위치까지 알기 위해서는 방향탐지 신호처리를 위한 수신기도 별도로 필요하며 따라서 전자신호를 수신, 신호처리하기 위한 처리장비와 방사체 위치 확인을 위한 방향탐지 장비간 상호 인터페이스도 필요하다. 아래 그림 1은 전자신호가 수신되는 환경을 보여주고 있다.

그림 1처럼 다양한 방향에서 안테나로 입력되는 펄스파는 여러 단계를 거쳐 방사체의 PRI를 식별하게 된다. 전자신호 처리과정을 보면 우선 안테나에 입력되는 신호는 신호가 미약하므로 증폭이 이루어지고 동시에 Filtering과 IF로 변환된다. Detection 단계에서는 신호가 존재하는지를 인지하여 각종 파라미터를 측정한다.

펄스 별로 도래시간(TOA: Time Of Arrival), 주파수, 방위, 펄스 폭(PD: Pulse Duration), 펄스파간 거리를 의미하는 펄스반복간격(PRI), 그리고 신호 세기인 펄스 진폭(Pulse Amplitude)을 측정하게 된다.

파라미터 추출단계에서는 각 펄스 또는 여러 개의 펄스 단위로 측정된 파라미터를 추출하며 이 데이터들을 Raw PDW(Pulse Description word)라고 한다. 이 데이터는 동일한 특성끼리 그룹핑한 데이터가 아니며 각 펄스단위로 존재하는 PDW 데이터 들이다(그

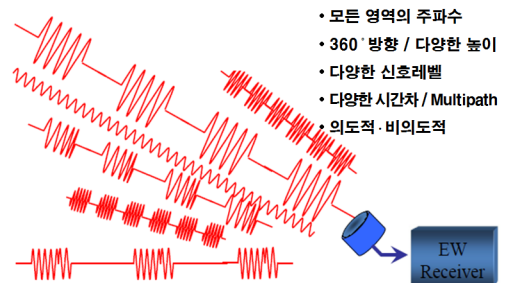


그림 1. 수신기에 입력되는 다양한 전자파 형태
Fig. 1. A various electromagnetic wave types in free space

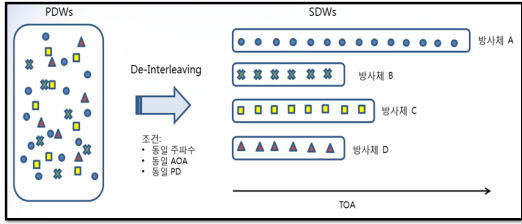


그림 2. Raw PDW 데이터(왼쪽)와 De-Interleaving 데이터 Fig. 2. Raw PDW data(left) and De-Interleaving data (right)

림 2에서 왼쪽). 다음 단계에서는 제일 중요한 Raw PDW 데이터 들을 동일 특성, 즉 동일 방사체에서 방사되는 펄스 데이터들끼리 묶는 절차이다. 이때 그룹핑한 기준은 동일 주파수와 신호가 인입되는 도래각도(AOA: Angle Of Arrival)를 기준으로 그룹핑한다. 이러한 과정을 De-Interleaving이라고 하며^[5] De-interleaving 프로세스의 기본 기능은 추출된 Raw PDW 데이터를 동일 채널들끼리 시간 순서로 분류하는 것이다. 이렇게 그룹화된 데이터들을 SDW(Segmented Description Words) 또는 Clustering라고도 한다. 마지막 단계로서 분석 및 식별된 레이더 펄스는 사용자 환경에 맞게 수치 또는 그래프 표현된다.

PDW 데이터는 한 펄스 또는 여러 펄스에 대한 특성을 표현하는 데이터로서 각 레이더에서 방사되는 펄스마다 파라미터가 측정되어 기술한 소규모의 DB이다. 이 PDW는 각 펄스에 대한 설명 자료이므로 펄스 단위로 구분해서 TOA, PD, PA, AOA, 주파수 등의 요소로 표시되며, PDW 크기는 64비트 또는 128비트로 구성된다. 이 PDW DB 구성은 표 1처럼 표준화되어 있지 않고 시스템 구현에 따라 다르다^[6]. 이러한 PDW를 생산하기 위해서 초당 Giga Sampling을 해야 한다.

	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	TOA(32bit, MSB)																															
1	TOA (7bit, LSB)							Blank(5bit)							PD(20bit)																	
2	Frequency(24bit)																Blank (8bit)															
3	Blank(8bit)								PA(10bit)								Blank (2bit)		AOA(12bit)													
파라미터	비트수	분해능 (resolution)	표현범위	비고																												
TOA	39bit	0.015625(us)	0.0 ~ 8,589,934,592us (85.0s)																													
AOA	12bit	0.1 (degree)	0.0 ~ 360 (degree)																													
주파수	24bit	16bit + 8bit*3.90624 (MHz)	0.0 ~ 65,435,99744 (MHz)																													
PD	20bit	0.09536744	0 ~ 100,000,0087 (us)																													
PA	10bit	0.09766(dB)	0 ~ 100.0 0384(dB)																													

표 1. 레이더 펄스에 대한 PDW 구성 형태 Table 1. PDW Data Base for each RADAR pulse

2.2 레이더 Inter-Pulse의 PRI 종류

레이더에서 방사되는 펄스열이 시간상으로 일정한 간격으로 방사되는 Inter-Pulse 방식을 고정 PRI(Steady 또는 Constant PRI)방식이라고 하며 가장 기본적인 레이더 펄스반복 형태이다. Random Jitter PRI방식은 펄스반복간격이 어떠한 패턴 없이 불규칙적으로 조금씩 변화하는 방식이다. Pseudo Random Jitter PRI방식은 불규칙적인 Random한 PRI 값을 가진 프레임(또는 Set)이 일정한 규칙에 따른 반복된 방식이며, Stagger PRI방식은 서로 다른 펄스반복간격이 프레임 단위로 반복되는 형태이다. Dwell & Switch PRI 는 PRI가 임의의 시간 동안 일정하게 반복된 후 펄스반복간격을 변경하여 일정기간 반복되고 다시 다른 펄스반복간격으로 일정하게 반복되며, 일정한 프레임 후에 최초 PRI 값부터 다시 반복된 형태이다. Dwell & Switch PRI방식은 EP를 위한 계단수가 최근에는 126계단까지 확대 적용되고 있다. Sliding PRI는 간격이 커지고 적어지는 형태에 따라 Up Sliding, Down Sliding으로 구분되면, 동시에 PRI간격이 선형성 또는 비선형성에 따라 Linear와 Non-Linear로 구분된다. Wobble PRI방식은 펄스반복간격이 진동하는 형태처럼 커지다가 작아지는, 또는 작아지다 커지는 형태이고 한 프레임이 끝난 후에는 다시 처음부터 반복되는 형태이다^[7]. Sinusoidal PRI 는 sine파처럼 펄스반복간격이 일정하게 커지고 작아지는 형태로 반복하는 변조형식이다. 최근에는 전자전 EP기능 수행하기 위해 PRI가 복잡해지고 그룹화되어 가는 경향이 있으며 특히 Sliding PRI기법이 많이 적용되고 있다.

2.3 펄스 도래 시간차(TDOA)를 이용한 PRI분석

그림 2와 같이 여러 방향에서 수신되는 레이더와 같은 방사체의 펄스 별로 PDW 데이터를 동일 주파수와 전파 인입 방향을 기준으로 하여 PDW 데이터를 각 방사체별로 도착 시간순서로 배열하여 하나의 수열을 구성하고 각 방사체별로 N 번째로 도착하는 펄스는 아래와 같이 정의되며, 또한 N개의 펄스가 수신될 경우 PRI 평균(T_{mean})과 표준편차(σ)는 다음과 같이 구할 수 있다^[8,9].

$$TOA^N = TOA^{N-1} + PRI \quad (1)$$

$$T_{mean} = [1/(N-1)] \cdot \sum_{i=1}^{N-1} T_i \quad (2)$$

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

고정 PRI 신호의 평균PRI는 일정하며 표준 편차는 0이다. 일반적으로 PRI변화가 1 % 이하면 고정 PRI로 간주한다. 지터 PRI의 평균 PRI는 고정 PRI와 유사하나 표준편차가 고정 PRI보다 큰 값을 가진다. 표준편차가 평균값의 5% 이하이면 지터 PRI로 간주하고 그 이상이면 Dwell & Switch PRI 또는 Stagger PRI로 간주한다. Stagger PRI와 Dwell & Switch PRI의 분리를 위해 TOA의 2차 차분을 계산하여 적용한 결과 절대 값이 양수 및 0으로 반복될 경우 Dwell & Switch PRI로 판정한다⁹⁾.

III. 레이더 펄스의 도착 시간차를 이용한 Up, Down Sliding PRI 분석 알고리즘

3.1 Linear, Non-Linear Up Sliding 분석 알고리즘

자유공간에 방사되는 레이더 전파는 다양한 PRI변조방식을 갖는다. 각 하나의 방사체에서 방사되는 펄스마다 한 개의 PRI가 생성되는데, 식(1)에 의해 도착 시간 축으로 하여 De-interleaving된 펄스간의 차이를 1차 차분, dtoa이라하고, 다시 1차 차분간의 차를 2차 차분, diff_dtoa라고 하면, dtoa, diff_dtoa를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$dtoa = toa(i+1) - toa(i) \quad (4)$$

$$diff_dtoa = dtoa(i+1) - dtoa(i) \quad (5)$$

Linear Up Sliding PRI는 그림 3에서처럼 펄스반복간격이 선형적으로 커지다가 다시 처음 값으로 반복되는 형태이고 Non-Linear Up Sliding PRI는 펄스반복간격이 비선형적으로 커지다가 처음 값으로 반복되는 형태이다.

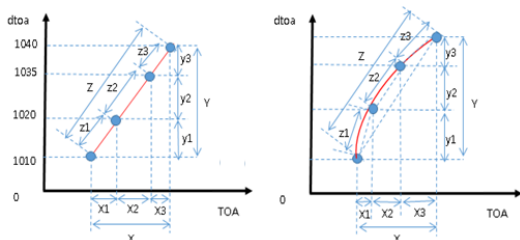


그림 3. Linear(왼쪽), Non-Linear(오른쪽) Up Sliding dtoa 그래프
Fig. 3. Linear(left)/Non-Linear(right) Up Sliding dtoa graph

는 형태이다. 반복되는 한 사이클을 프레임이라 한다. 이러한 PRI 1차 차분, 즉 dtoa를 Y축으로 하고 펄스 도착시간(TOA)을 X축으로 하여 빗변과 밑변, 높이 길이의 직각 삼각함수 공식을 적용하여 빗변 전체 Linear 길이(Z)와 각 구간별로부터 산출된 실제 빗변 길이(Z')를 상호 비교하여 선형 및 비선형성을 확인할 수가 있다.

$$\text{즉, Linear 길이, } Z = \sqrt{(X^2 + Y^2)} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{실제길이, } Z' &= Z_1 + Z_2 + Z_3 & (7) \\ Z_1 &= \sqrt{(X_1^2 + Y_1^2)} \\ Z_2 &= \sqrt{(X_2^2 + Y_2^2)} \\ Z_3 &= \sqrt{(X_3^2 + Y_3^2)} \end{aligned}$$

Linear Up Sliding 경우

$$\text{Linear 길이 } Z = \text{실제길이 } Z' \quad (8)$$

Non-Linear Up Sliding 경우

$$\text{Linear 길이 } Z \neq \text{실제길이 } Z'$$

를 얻을 수 있다. 다시 말하면 안테나에 인입되는 실제 펄스별 간격 차(Y축)와 펄스 도착시간인 TOA(X축)를 기준으로 하여 Linear 길이(Z)와 실제 수학적 삼각함수 길이(Z')를 비교하여 같을 경우 Linear Up Sliding PRI로 판별하고 그렇지 않을 경우 Non-Linear Up Sliding PRI로 간주한다. Linear Up Sliding과 Non-Linear Up Sliding PRI 분석 알고리즘은 동일한 분석 흐름 절차 내에서 선형인가 비선형인가만 다르므로 하나의 알고리즘으로 구현이 가능하며 따라서 알고리즘은 위에서 언급한 수학적 기법을 적용하면 다음과 같다.

기본적인 삼각함수 기법을 적용하기 위해서는 Up Sliding의 경우 상향 dtoa 개수가 최소 3개 이상, 하향 dtoa는 2개 이상 되어야 하며 한 프레임 내에서 Linear 길이와 실제길이의 차이가 0.1이하일 경우 Linear Up Sliding PRI로 간주하고 0.1보다 큰 경우 Non-Linear Up Sliding PRI로 간주한다. 0.1 값은 신호처리를 구간단위로 수행하기 때문에 오차를 0.1만큼 허용하는 것으로 이상적일 경우는 Linear 길이와 실제길이가 동일하다. Linear Up Sliding PRI와 Non-Linear Up Sliding PRI의 평균 PRI는 한 프레임 내에 있는 모든 n개의 dtoa 값을 더한 후 n개로 나누면 평균 PRI가 산출된다.

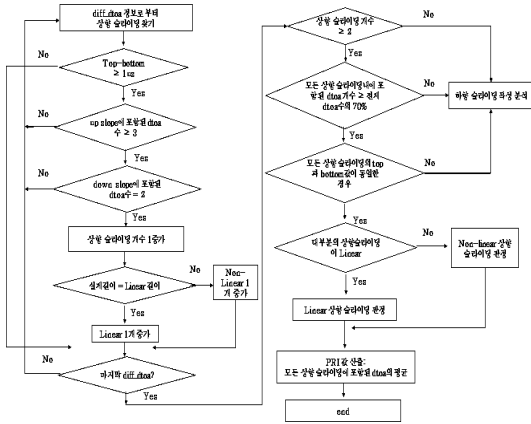


그림 4. Linear, Non-Linear Up Sliding PRI 분석 알고리즘
Fig. 4. Analysis algorithm for linear, Non-linear up sliding PRI

3.2 Linear, Non-Linear Down Sliding 분석 알고리즘

Down Sliding PRI는 dtoa간격이 펄스 도착시간 (TOA) 증가에 따라 적어지는 형태로서 선형적으로 적어질 경우 Linear Down Sliding PRI, 비선형적으로 적어질 경우 Non Linear Down Sliding PRI이다. 분석 알고리즘은 Up Sliding 적용기법과 동일하게 삼각 함수 기법을 적용하였다. Linear, Non-Linear Down Sliding PRI 분석 알고리즘도 동일한 분석 흐름 절차 내에서 선형인가 비선형인가만 다르므로 하나의 알고리즘으로 구현이 가능하여 위에서 언급한 수학적 기법을 적용하면 그림 5와 같다

De-interleaving된 데이터의 1차 차분, 즉 dtoa를 Y

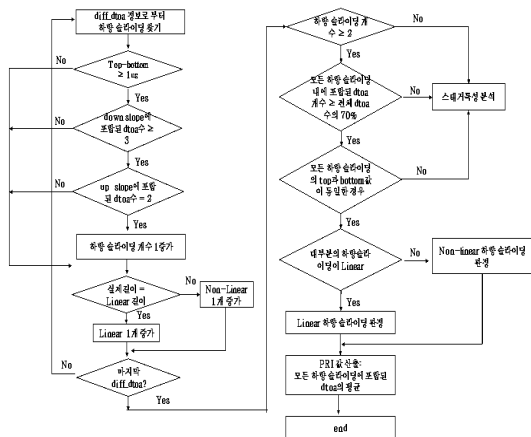


그림 5. Linear, Non-Linear Down Sliding PRI 분석 알고리즘
Fig. 5. Analysis algorithm for linear, Non-linear down sliding PRI

축으로 하고 펄스 도착시간(TOA)을 X축으로 하여 한 프레임의 전체 빗변 길이(Linear 길이, Z)와 각 구간 별로부터 산출된 실제 빗변길이(Z')를 상호 비교, 차이가 0.1이하일 경우 Linear Down Sliding PRI로 간주하고 0.1보다 큰 경우 Non-Linear Down Sliding PRI로 간주한다. Down Sliding PRI를 분석하기 위해서 최소 하향 dtoa 개수는 3개 이상 되어야 하며 상향 dtoa에 포함되어야 할 개수는 최소 2개 이상 되어야 한다.

IV. Up, Down Sliding PRI 분석 알고리즘 실험결과

4.1 Linear, Non-Linear Up Sliding 분석 알고리즘

그림 4에서 제시한 Linear, Non-Linear Up Sliding PRI 분석 알고리즘을 프로그래밍 한 후에 표 2와 표 3의 TOA 데이터 각각 40개를 입력하여 Linear, Non-Linear Up Sliding PRI 분석하였다.

표 2에 의한 dtoa 데이터는 식 (4)에 의하여 구해지며, dtoa 값의 변화가 1040 → 1010 → 1020 → 1035 → 1040 → 1010 → 1020으로 반복됨을 알 수 있다.

표 2. Linear Up Sliding PRI TOA 입력 데이터
Table 2. Linear Up Sliding PRI TOA input data

구분	TOA	d:oa	diff_d:oa
1	8210.000	0.000	
2	9220.000	1010.000	30.000
3	10260.000	1040.000	-5.000
4	11290.000	1035.000	-10.000
5	12315.000	1020.000	-10.000
6	13335.000	1010.000	30.000
7	14345.000	1040.000	-5.000
8	15365.000	1035.000	-10.000
9	16405.000	1020.000	-10.000
10	17425.000	1010.000	30.000
11	18465.000	1040.000	-5.000
12	19505.000	1035.000	-10.000
13	20540.000	1020.000	-10.000
14	21560.000	1010.000	30.000
15	22570.000	1040.000	-5.000
16	23610.000	1035.000	-10.000
17	24645.000	1020.000	-10.000
18	25665.000	1010.000	30.000
19	26675.000	1040.000	-5.000
20	27715.000	1035.000	-10.000
21	28750.000	1020.000	-10.000
22	29770.000	1010.000	30.000
23	30780.000	1040.000	-5.000
24	31820.000	1035.000	-10.000
25	32855.000	1020.000	-10.000
26	33875.000	1010.000	30.000
27	34885.000	1040.000	-5.000
28	35920.000	1035.000	-10.000
29	36955.000	1020.000	-10.000
30	37975.000	1010.000	30.000
31	38965.000	1040.000	-5.000
32	40025.000	1035.000	-10.000
33	41055.000	1020.000	-10.000
34	42075.000	1010.000	30.000
35	43165.000	1040.000	-5.000
36	44225.000	1035.000	-10.000
37	45160.000	1020.000	-10.000
38	46160.000	1010.000	30.000
39	47290.000	1040.000	-5.000
40	48330.000	1035.000	-10.000

따라서 최대 값은 1040, 최소 값은 1010이며 상향 dtoa 개수는 4개(1010, 1020, 1035, 1040)로 최소 필요 3개 이상을 충족하였고 하향 dtoa 개수도 2개 (1040, 1010)로 기준치를 충족하였다. 한 프레임의 평균 PRI는 $(1010 + 1020 + 1035 + 1040) / 4 = 1026.250$ 이다. 표 2의 TOA에 의한 dtoa 값은 위에서 언급된 것처럼 4개의 값을 기준으로 반복되며 dtoa와 TOA의 그래프를 그려보면 그림 6과 같은 Linear Up Sliding PRI형태로 나타난다. Linear 판정을 위해서는 Linear 길이(Z)와 실제길이(Z')를 비교하여 길이 차이가 0.1보다 적은 값이 산출될 경우 Linear Up Sliding으로 판정한다. 그림에서 Linear 길이는 3,095.145이고 계산된 실제길이는 3,095.170으로서 그 차이는 0.025으로 0.1보다 적으므로 입력된 데이터는 Linear Up Sliding PRI로 판정한다.

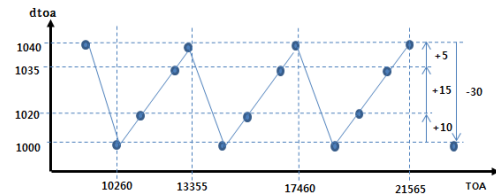


그림 6. 표 2의 입력된 40개 데이터에 대한 dtoa 그래프
Fig 6. dtoa's graph to 40 input data of table 2

표 3. Non-Linear Up Sliding TOA 입력 데이터
Table 3. Non-Linear Up Sliding TOA input data

구분	TOA	dtoa	diff_dtoa
1	3000.000	0.000	
2	9000.000	1000.000	500.000
3	10500.000	1500.000	3500.000
4	15500.000	5000.000	3000.000
5	23500.000	8000.000	-7000.000
6	24500.000	1000.000	500.000
7	26000.000	1500.000	3500.000
8	31000.000	5000.000	3000.000
9	39000.000	8000.000	-7000.000
10	40000.000	1000.000	500.000
11	41500.000	1500.000	3500.000
12	43000.000	5000.000	3000.000
13	48000.000	8000.000	-7000.000
14	56000.000	1000.000	500.000
15	57000.000	1500.000	3500.000
16	58500.000	5000.000	3000.000
17	63500.000	8000.000	-7000.000
18	71500.000	1000.000	500.000
19	72000.000	1500.000	3500.000
20	73500.000	5000.000	3000.000
21	78500.000	8000.000	-7000.000
22	86500.000	1000.000	500.000
23	87500.000	1500.000	3500.000
24	89000.000	5000.000	3000.000
25	94000.000	8000.000	-7000.000
26	102000.000	1000.000	500.000
27	103000.000	1500.000	3500.000
28	104500.000	5000.000	3000.000
29	109500.000	8000.000	-7000.000
30	117500.000	1000.000	500.000
31	118500.000	1500.000	3500.000
32	120000.000	5000.000	3000.000
33	125000.000	8000.000	-7000.000
34	133000.000	1000.000	500.000
35	134000.000	1500.000	3500.000
36	135500.000	5000.000	3000.000
37	140500.000	8000.000	-7000.000
38	148500.000	1000.000	500.000
39	149500.000	1500.000	3500.000
40	151000.000	5000.000	3000.000

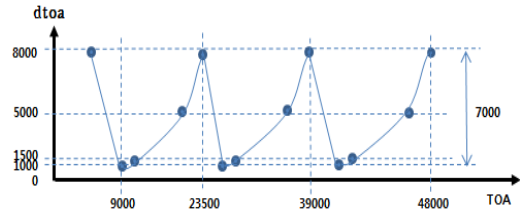


그림 7. 표 3의 입력된 40개 데이터에 대한 dtoa 그래프
Fig. 7. dtoa's graph to 40 input data of table 3

Non-Linear Up Sliding PRI 식별 알고리즘을 증명하기 위해서 아래 표 3과 같이 De-interleaving된 TOA 데이터 40개를 입력하여 PRI를 판정하였다. dtoa 데이터는 한 프레임 내에서 1000 → 1500 → 5000 → 8000 순으로 반복됨을 알 수 있다. 따라서 입력된 TOA 40개에 대한 dtoa 그림을 그려보면 그림 7 처럼 Non-Linear 형태로 나타난다. 그림 7에서 상향 dtoa 개수는 4개로서 최소 3개 이상을 충족하고 하향 dtoa 개수도 2개 이상으로 조건을 만족한다.

Non-Linear Up Sliding을 판별하기 위한 한 프레임 내의 Linear길이(Z)와 실제길이(Z')를 구하면 Linear 길이는 16,101.242이고 실제길이는 16,506.143이 된다. 따라서 그 차이는 404.901로서 0.1보다 크기 때문에 Non-Linear Up Sliding으로 판별한다. 평균 PRI는 한 프레임을 구성하는 dtoa 값으로부터 산출되므로 $(1000+1500+5000+8000)/4 = 3875$ 간격으로 PRI가 반복된다.

4.2 Linear, Non-Linear Down Sliding 분석 알고리즘

그림 5에서 제시한 Linear, Non-Linear Down Sliding PRI 분석 알고리즘의 정확성을 증명하기 위해 프로그래밍 한 후에 표 4와 같은 Linear Down Sliding PRI의 TOA 데이터 40개를 입력하여 그 결과를 분석하였다. dtoa 값 변화는 1040 → 1035 → 1020 → 1010 → 1040 → 1035 → 1020으로 반복되는 것을 알 수 있다. 따라서 최대 값은 1040, 최소 값은 1010이며 한 프레임 내에서 반복되는 하향 dtoa 개수는 4개(1040, 1035, 1020, 1010)로 최소 필요 3개 이상을 충족하였고 또한 상향 dtoa 개수도 2개(1010, 1040)로 기준치를 충족하였다.

평균 PRI는 한 프레임 내에서 dtoa 값이 4개, 즉 $(1010+ 1020+1035+1040)/4$ 로 계산하면 1026.250이다. 입력된 40개 TOA 데이터에 대한 dtoa 그래프를 그려보면 그림 8과 같이 Linear Down Sliding PRI형태로 나타난다.

표 4. Linear Down Sliding TOA 입력 데이터
Table 4. Linear Down Sliding TOA input data

구분	TOA	dtoa	diff_dtoa
1	8210.000	0.000	
2	9220.000	1010.000	30.000
3	10260.000	1040.000	-5.000
4	11295.000	1035.000	-15.000
5	12315.000	1020.000	-10.000
6	13335.000	1010.000	30.000
7	14345.000	1040.000	-5.000
8	15385.000	1035.000	-15.000
9	16405.000	1020.000	-10.000
10	17425.000	1010.000	30.000
11	18465.000	1040.000	-5.000
12	19505.000	1035.000	-15.000
13	20540.000	1020.000	-10.000
14	21560.000	1010.000	30.000
15	22570.000	1040.000	-5.000
16	23610.000	1035.000	-15.000
17	24645.000	1020.000	-10.000
18	25665.000	1010.000	30.000
19	26675.000	1040.000	-5.000
20	27715.000	1035.000	-15.000
21	28750.000	1020.000	-10.000
22	29770.000	1010.000	30.000
23	30780.000	1040.000	-5.000
24	31820.000	1035.000	-15.000
25	32855.000	1020.000	-10.000
26	33875.000	1010.000	30.000
27	34885.000	1040.000	-5.000
28	35920.000	1035.000	-15.000
29	36955.000	1020.000	-10.000
30	37975.000	1010.000	30.000
31	38985.000	1040.000	-5.000
32	40025.000	1035.000	-15.000
33	41055.000	1020.000	-10.000
34	42075.000	1010.000	30.000
35	43165.000	1040.000	-5.000
36	44225.000	1035.000	-15.000
37	45160.000	1020.000	-10.000
38	46180.000	1010.000	30.000
39	47290.000	1040.000	-5.000
40	48330.000	1035.000	-15.000

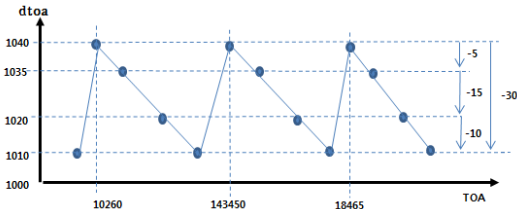


그림 8. 표 4의 입력된 40개 데이터에 대한 dtoa 그래프
Fig. 8. dtoa's graph to 40 input data of table 4

Linear 판정을 위해서는 Linear 길이(Z)와 실제길이(Z')를 비교하여 길이 차이가 0.1보다 적은 값이 산출될 경우 Linear Down Sliding으로 판정한다. 그림의 Linear 길이는 3,095.145 이고 계산된 실제길이는 3095.170으로서 그 차이는 0.1보다 적은 0.025이다. 표 4에 주어진 입력된 TOA 데이터는 Linear Down Sliding PRI로 판정한다.

Non-Linear Down Sliding PRI 식별 알고리즘을 증명하기 위해 표 5와 같이 TOA 데이터 40개를 입력하였다. dtoa 데이터는 1000 → 8000 → 5000 → 1500 → 1000 → 8000 → 5000 순으로 반복됨을 알 수 있고, 따라서 입력된 TOA 데이터에 대한 dtoa 그

표 5. Non-Linear Down Sliding TOA 입력 데이터
Table 5. Non-Linear Down Sliding TOA input data

구분	TOA	dtoa	diff_dtoa
1	8000.000	0.000	
2	9000.000	1000.000	7000.000
3	10000.000	8000.000	-3000.000
4	18000.000	5000.000	-3500.000
5	23000.000	1500.000	-500.000
6	24500.000	1000.000	7000.000
7	25500.000	8000.000	-3000.000
8	33500.000	5000.000	-3500.000
9	38500.000	1500.000	-500.000
10	40000.000	1000.000	7000.000
11	41000.000	8000.000	-3000.000
12	49000.000	5000.000	-3500.000
13	54000.000	1500.000	-500.000
14	55500.000	1000.000	7000.000
15	56500.000	8000.000	-3000.000
16	64500.000	5000.000	-3500.000
17	69500.000	1500.000	-500.000
18	71000.000	1000.000	7000.000
19	72000.000	8000.000	-3000.000
20	80000.000	5000.000	-3500.000
21	85000.000	1500.000	-500.000
22	86500.000	1000.000	7000.000
23	87500.000	8000.000	-3000.000
24	95000.000	5000.000	-3500.000
25	100000.000	1500.000	-500.000
26	101500.000	1000.000	7000.000
27	102500.000	8000.000	-3000.000
28	110500.000	5000.000	-3500.000
29	105500.000	1500.000	-500.000
30	117000.000	1000.000	7000.000
31	118000.000	8000.000	-3000.000
32	126000.000	5000.000	-3500.000
33	131000.000	1500.000	-500.000
34	132500.000	1000.000	7000.000
35	133500.000	8000.000	-3000.000
36	141500.000	5000.000	-3500.000
37	146500.000	1500.000	-500.000
38	148000.000	1000.000	7000.000
39	159000.000	8000.000	-3000.000
40	167000.000	5000.000	-3500.000

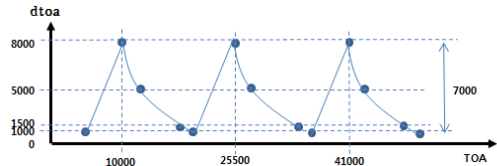


그림 9. 표 5의 입력된 40개 데이터에 대한 dtoa 그래프
Fig. 9. dtoa's graph to 40 input data of table 5

림을 그려보면 그림 9처럼 비선형적 형태로 나타난다. 그림 9에서 보면 하향 dtoa 개수는 4개(8000, 5000, 1500, 1000)이고 상향 dtoa 개수도 2개(1000, 8000)로서 Non-Linear Down Sliding PRI 식별조건을 만족한다.

Non-Linear 판정을 위해서 앞에서와 같은 방법으로 Linear 길이(Z)는 16101.242이고 계산된 실제길이(Z')는 16506.143으로서 그 차이는 404.901로서 0.1보다 크다.

따라서 입력된 40개의 TOA 데이터는 Non-Linear Down Sliding으로 판정하며 한 프레임 내의 평균 PRI는 $(8000+5000+1500+1000)/4 = 3875$ 로서 이 값을 기준으로 4개의 dtoa가 반복됨을 알 수 있다.

V. 결 론

첨단 레이더 기술의 발달로 방사체의 식별이 대단히 어려워지고 있다. 특히 최근 컴퓨터의 기술 발달로 레이더 방사체의 보호를 위한 EP기능이 지능화되고 있는데 이러한 전자전 보호방식 중의 하나로서 Linear, Non-Linear Up Sliding PRI방식과 Linear, Non-Linear Down Sliding PRI방법이 적용되고 있다.

본 연구에서는 전 세계적으로 일부 특별한 연구기관에서만 연구 및 개발되고 있는 Up Sliding, Down Sliding PRI 식별 알고리즘을 펄스 도착시간, 즉 TOA를 기준으로 1차 차분과 2차 차분을 값을 적용하여 PRI 곡선의 특징을 분석, 식별하는 PRI 분석 알고리즘을 고안하였다. 각 알고리즘을 프로그래밍 하여 그 특성에 맞는 데이터 각각 40개를 선정, 입력한 결과 Linear Up Sliding, Non-Linear Up Sliding, Linear Down Sliding, Non-Linear Down Sliding PRI 식별 알고리즘이 정확히 분석, 식별하였다.

미상의 전자신호를 수신, 식별하는 업무는 매우 제한적으로 이루어지고 있거나 적용된 알고리즘은 비밀로 유지되고 있다. 본 연구에서 식별 대상으로 연구된 Up, Down Sliding PRI 식별 알고리즘도 거의 알려져 있지 않은 기술로서 새로운 아이디어인 TOA의 차분 특성을 삼각함수의 길이를 적용한 분석 알고리즘은 정확히 PRI종류를 식별하였고 이 알고리즘은 향후 전자전 지원(Electronic Support)시스템에 효과적으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

References

[1] Y. h. Kim, W. J. Kim, K. H. Song, D. W. Lee, and H. N. Kim, "Modeling of received radar signals for scan pattern analysis," *J. IEIE*, vol. 47, no. 4, pp. 73-85, Apr. 2010.

[2] R. G. Wiley, *ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals*, Artech House, Boston, 2006.

[3] M. K. Aslan, "Emitter identification techniques in electronic warfare," The Graduate School of Natural and Applied Science of Middle East Technical University, Sept. 2006.

[4] J. S. Lim and G. S. Chae, "The pattern analysis of dual switch pulse signal in multiple pulse train using the second deviation of TOA," *The Korea Academia-Industrial Cooperation Soc., Spring Academy Conf.*, pp. 804-807, 2012.

[5] H. Alharbi, "Radar emitter identification," *Radar Symp. 2014*, KACST Headquarters, Riyadh, Saudi Arabia, Dec. 2014.

[6] J. S. Lim, K. H. Hong, D. Y. Lee, D. H. Shin, and Y. H. Kim, "A de-interleaving method of frequency agility radar signals in comparison with PRI's radars," *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, vol. 10, no. 8, pp. 1832-1838, Sept. 2009.

[7] Y. S. Lee, J. S. Lim, and J. S. Lim, "An algorithm for de-interleaving of wobble and sinusoidal PRIs for unidentified radar signals," *J. KIEES*, vol. 26, no. 12, pp. 1100-1107, Dec. 2015.

[8] K. N. Udaya, V. Dhananjayulu, and K. V. Anil, "De-interleaving of radar signals and its parameter estimation in EW environment," *Int. J. Emerging Technol. and Advanced Eng.*, vol. 4, no. 9, Sept. 2014.

[9] J. S. Lim and G. S. Chae, "A noble algorithm for de-interleaving of D&S PRI and stagger PRI signals from the EP radar," *J. KAIS*, vol. 13, no. 11, pp. 5372-5378, 2012.

[10] J. S. Lim, "The algorithm for de-interleaving of multi-step stagger PRI signals of pulse radars," *The J. Korea Soc. Commun. and Sapce Technol.*, K8-4-28, Dec. 2013.

이 용 식 (Yongsik Lee)



1987년 3월 : 공군사관학교 전자공학과 졸업
1993년 8월 : 미 Florida Institute of Technology 전자공학과 석사
1997년 12월 : 정보통신기술사
2003년 1월~현재 : SEC연구소

2012년 8월 : 한양대학교 전자공학과(박사수료)
2014년 9월~현재 : 아주대학교 NCW과 박사과정
<관심분야> ELINT, ESM, 전자전

김 의 규 (Euigyoo Kim)



1990년 3월 : 육군사관학교 전자공학과 졸업
1994년 8월 : 미 University of Nebraska 전자공학과 석사
2010년 3월~현재 : 아주대학교 NCW과 박사과정
<관심분야> 전자전, 정보융합

김 진 수 (Jinsoo Kim)



1984년 2월 : 명지대학교 전자공학과 졸업
2001년 2월 : 한남대학교 산업경영학 석사
2014년 7월~현재 : 아주대학교 NCW학과 박사과정 재학 중
2015년 4월~현재 : 육군본부 정보차장

2016년 6월~현재 : 서울대학교 미래안보전략 기술최고위 과정 재학 중
<관심분야> 국방정책, 국방전술, 전자전

임 재 성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자공학과 학사.
1985년 2월 : KAIST 영상통신 석사
1994년 8월 : KAIST 디지털통신 박사
1998년 3월~현재 : 아주대학교 소프트웨어 융합학과 정교수

2006년 8월~현재 : 아주대학교 국방전술 네트워크 연구센터장
<관심분야> 이동통신, 무선네트워크, 국방전술통신.