

해상 및 공중 표적 탐지를 위한 해상감시레이다의 파형운영 및 신호처리 설계

Waveform Operation and Signal Processing Design for Detecting Naval and Airborne Targets in Sea Surveillance Radar

김태형 · 박재욱 · 안지훈 · 박준현 · 강연덕

Tae-Hyung Kim · Jae-Yook Park · Ji-Hoon An · June-Hyune Park · Yeon-Duk Kang

요 약

일정한 RPM(Revolutions Per Minute)으로 회전하면서 레이더 펄스 신호를 방사하고, 표적을 탐지하는 해상감시레이다에서 해상의 저속 및 공중의 고속 표적 모두를 탐지하기 위한 파형운영 및 신호처리 설계를 보여준다. 본 논문의 레이더는 해상과 공중, 저속과 고속, 선박과 항공기 등의 표적들을 동시에 탐지할 수 있도록 각 표적의 탐지에 특화된 기능을 가진 다수의 수신 채널을 가진다. 또한 PRF(Pulse Repetition Frequency) 운용은 저속 표적을 위한 Low PRF 및 고속 표적을 위한 Medium PRF 파형을 모두 운용한다. 본 논문에서는 고속 표적 탐지를 위한 RPM 및 도플러 해상도 조건 등을 고려해 거리모호성은 완전히 해결되나, 속도모호성은 완전히 해결되지 않는 불완전한 탐지 PRF 집합 설계를 제시했으며, 특별히 속도모호성 해결이 불완전한 PRF 집합에서 속도모호성 해결 방법 및 신호처리 설계를 제시했다. 제안한 방법을 실 레이더에 구현하여 시험하였으며, 실측 데이터를 통해 그 기능 및 성능을 확인하였다.

Abstract

The waveform operation and signal processing design in sea surveillance radar, which radiates radar pulse signals while rotating at fixed revolutions per minute (RPM), for detecting targets is shown. The radar described in this paper has multiple receiving channels to concurrently detect both low and high speed targets such as ships and aircrafts. In pulse repetition frequency (PRF) operations, both low and medium PRF waveforms for low and high speed targets are concurrently applied, respectively. This paper describes an incomplete PRF set design that is capable of resolving range ambiguity, but cannot resolve velocity ambiguity in totality owing to RPM and Doppler resolution conditions for the high-speed target detection. Nevertheless, a method to resolve the velocity ambiguity in the incomplete PRF set and a signal processing design are proposed. The proposed method was implemented and tested on a real radar thereby verifying its functionality and performance using actual data obtained from a real radar.

Key words: Sea Surveillance Radar, MPRF Waveform, Velocity Ambiguity Resolving, Target Plot Merging, Channel Merging.

I. 서 론

본 논문에서 고려하는 해상감시레이다는 해안이나 섬 지역에 설치되어 일정한 RPM(Revolution Per Minute)으로

LIG 넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received March 10, 2020 ; Revised April 10, 2020 ; Accepted May 4, 2020. (ID No. 20200310-023)

· Corresponding Author: Tae-Hyung Kim (e-mail: thkim07@gmail.com)

회전하는 안테나에서 레이더 펄스 신호를 방사하면서 해상 선박, 공중의 항공기 표적들을 탐지한다. 운영하는 파형의 PRF(Pulse Repetition Frequency)에 있어서는 해상과 공중의 저속 및 고속 표적을 동시에 모두 탐지하기 위하여 LPRF(Low PRF)와 MPRF(Medium PRF) 파형을 동시에 사용한다. MPRF 파형은 표적의 도플러 속도 값 추출을 목적으로 사용하며 펄스압축을 위해 송신 펄스에서 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호를 이용한다. 레이더가 해상/공중, 저속/고속의 다양한 표적을 동시에 탐지해야 함으로 각 표적의 탐지에 특화된 파형의 레이더 신호를 수신하는 다수의 수신 채널들을 가진다.

고속의 표적을 탐지하기 위해서는 일정 수준 이상의 RPM을 가지고 안테나를 회전시켜야 한다. 상대적으로 높은 RPM에서는 거리/속도 모호성을 모두 해결하면서 탐지거리를 만족하는 MPRF 파형을 운영하는 것은 쉽지 않다. 참고로 표적의 도플러 속도는 데이터 처리과정에서 초기 탐지된 표적을 속도 게이팅(gating)을 통해 식별/분리하여 관리하는 것이 가능하도록 하여 잘못된 탐지/추적 및 처리 시간을 줄일 수 있게 한다(MPRF 파형은 표적의 거리와 속도를 동시에 추출 가능하게 탐지할 수 있다). 그래서 본 논문의 레이더는 MPRF 파형을 사용하면서도 거리 모호성은 해결되나, 속도는 관심영역에서 완전히 해결하지 못하는 불완전한 PRF 집합을 이용하여, 안테나 회전 RPM과 탐지거리 조건을 만족시켰다(데이터 처리에서 완전한 표적 거리 값 추출을 우선하여 요구한다). 표적 탐지에서 2-of-4 PRF 정책^{[1]~[3]}을 사용했다. 참고문헌 [1], [2] 및 [3]은 다중 PRF를 운용한 표적 탐지 방법인 M-of-N PRF 정책 운용에 대해 설명하고 있다. 참고문헌 [1], [2] 및 [3]을 통해 우리는 2-of-4 PRF 정책에서 고스트(ghost) 발생 없이 거리/속도 모호성을 모두 해결할 수 있는 탐지 PRF 집합을 얻기 힘들다는 것을 확인할 수 있다. 참고문헌 [2]와 [3]은 플랫폼이 움직이는 상황(항공기 등에 레이더가 설치된 상황)에서 표적 탐지에 최적인 다중 PRF 집합이 실시간으로 변할 때 고스트 발생 없이 표적의 거리와 속도를 탐지할 수 있는 PRF 집합을 실시간으로 찾아온 운용하는 방법에 대해 설명하고 있다. 그리고 참고문헌 [2]는 고스트에 강한 3-of-8 PRF 정책을 사용했고, 참고문헌 [3]은 고스트에 약한 2-of-3 PRF 정책을 사용했지

만 서로 다른 2-of-3 정책의 PRF 집합들을 연속 3번 탐지에 적용하여 그 중에서 2개 이상의 PRF 집합에서 동일한 표적의 거리/속도가 추출되었을 때 표적을 탐지한 것으로 하여 고스트 발생을 없앴다(고스트에 강한 4-of-9 PRF 정책을 사용한 것과 유사한 효과를 가진다.). 이 논문은 속도모호성 해결에 대해 불완전한 PRF 집합으로 속도모호성을 해결하는 방법 및 이것에 따른 해상감시레이다의 파형운영 및 신호처리 설계를 제시한다. 제안한 방법을 실제 해상감시레이다에 구현하여 시험하였으며, 실측데이터를 통해 그 기능 및 성능을 확인하였다.

II. 탐지 PRF 집합의 모호성제거 여유도 분석

이 절에서는 본 논문에서 사용한 탐지 PRF 집합을 분석하여 사용한 PRF 집합의 불완전성을 말한다. 탐지 관심거리 영역은 0 km에서 200 km, 탐지 관심속도 영역은 -900 m/s에서 +900 m/s를 가정한다. PRI(=1/PRF) 집합 $[PRI_1, PRI_2, PRI_3, PFI_4]$ 은 $[133.7 \mu s, 161.2 \mu s, 190.7 \mu s, 227.2 \mu s]$ 을 사용했으며, 2-of-4 PRF 정책으로 탐지한다. MPRF 파형의 탐지 PRF 집합이 고스트 발생 없이 완전하게 관심영역에서 표적의 거리 및 속도를 추출할 수 있는지 분석 및 판단해 보자. 이런 모호성 해결능력^[1]은 모호성 제거 여유도로서 분석할 수 있는데, 이 모호성 제거 여유도가 어떤 기준치 이상이면 고스트 발생 없이 관심영역에서 모호성을 해결하여 실제 표적의 거리 및 속도 값을 구할 수 있음을 보장할 수 있다. 다음 식은 2개의 PRI에 대한 거리 r 에서 모호성 제거 여유도의 정의^[2].

$$d_{12}(r) = |nR_{u1} - mR_{u2}| \quad (1)$$

여기서 $d_{12}(r)$ 은 PRI_1 과 PRI_2 로 거리 모호성을 해결할 때 거리 r 에서 모호성제거 여유도, R_{u1} 는 PRI_1 의 최대 비모호(unambiguous) 거리, R_{u2} 는 PRI_2 의 최대 비모호 거리, $n = \text{floor}(r/R_{u1})$, $m = \text{floor}(r/R_{u2})$, $\text{floor}(x)$ 는 실수 x 에 가장 가까운 x 보다 작거나 같은 정수를 나타낸다. 2-of-4 정책의 PRI 집합에 대한 거리 r 에서 모호성 제거 여유도 $M(r)$ 는 다음과 같이 정의된다.

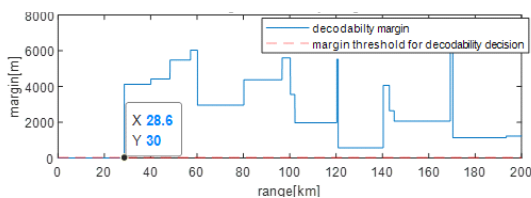
$$M(r) = \min(C_r),$$

$$C_r = [d_{12}(r), d_{13}(r), d_{14}(r), d_{23}(r), d_{24}(r), d_{34}(r)] \quad (2)$$

여기서 $d_{ij}(r)$ 은 PRI_i 과 PRI_j 로 거리 모호성을 해결할 때 거리 r 에서 모호성 제거 여유도, $\min(C_r)$ 은 C_r 의 원소 값 중에서 최소값을 나타낸다. 식 (2)는 2-of-4 정책의 PRI 집합의 4개 PRI 원소들 중에서 2개의 PRI를 선택하여 구한 $d_{ij}(r)$ 중에서 가장 작은 값을 거리 r 에서 그 PRI 집합의 모호성 제거 여유도로 정의함을 나타낸다. 식 (2)는 거리만 아니라 속도에도 그대로 적용된다. 그림 1은 위의 PRI 집합의 관심 거리 및 속도에서 모호성 제거 여유도를 식 (2)를 이용하여 구한 것이다. 그림 1(a)는 관심거리 영역에서 모호성 제거 여유도를 실선으로 보여준 것이며, 모호성 제거 능력 판단을 위한 기준치 값을 점선으로 표시하고 있다. 모호성 제거 능력 판단 기준치는 거리 측정 오차의 4배 이상의 값으로 설정할 수 있으며, 관심거리 영역에서 모호성 제거 여유도 값이 이 기준치 값 이상이면 해당 PRI 집합이 관심영역에서 고스트 없이 표적의 거리 모호성을 해결할 수 있다^{[1][2]}. 그림 1(a)에서 보듯이 관심영역에서 기준치 값 30 m를 넘어선 여유도 값을 가짐으로 위의 PRI 집합은 관심거리 영역에 있는 표적의 거리 값을 완전히 모호성 없이 구할 수 있다. 참고로 근거리 부분이 모호성 제거 여유도가 부족한 것처럼 보이지만, 이것은 여유도 계산 방법에 의해 항상 0으로 계산되어지만 실제로 이 영역은 한 PRI 거리 영역 내의 거리이므로

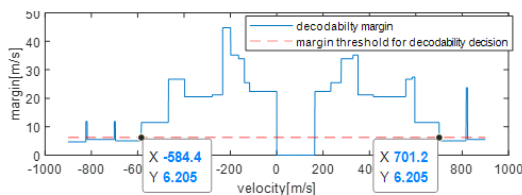
모호성 없이 추출할 수 있는 영역이다. 그래서 모호성 제거 능력 판단에서 제외하는 영역이다. 그림 1(b)는 관심 속도 영역에서 위의 PRF 집합의 모호성 제거 여유도를 실선으로 보여주며, 모호성 제거 능력 판단 기준값 6.205 m/s을(속도 측정 오차의 4배 이상으로 설정) 점선을 표시하고 있다. 모호성 제거 능력을 판단에서 제외되는 0에서 164.7 m/s 영역 외에 701.2 m/s 이상의 영역과 -584.4 m/s 이하의 영역에서 기준치 이하의 여유도를 가짐을 볼 수 있다. 즉, 위의 PRF 집합은 관심 속도 영역에서 고스트 없이 표적의 속도 값을 완전히 모호성을 제거하여 추출할 수 없다. 참고로 관심 영역의 모든 속도에서 모호성 제거 여유도가 확보되지 않으면 관심영역의 임의의 어떤 위치에서도 고스트가 발생할 수 있다. 즉 800 m/s 속도에서 모호성 제거 여유도가 확보되지 않으면 여유도가 충분해 보이는 200 m/s 속도에서도 고스트가 발생할 수 있다. 위의 PRF 집합은 관심거리 영역에서 모호성을 완전히 해결할 수 있지만, 관심 속도 영역에서는 모호성을 해결할 수 없음을 알 수 있다.

위의 불완전한 PRF 집합을 사용하는 이유는 서론에서 말하였듯이, MPRF 파형을 사용하면서도 안테나 회전 RPM과 탐지거리 조건을 만족시키면서 거리와 속도를 동시에 추출하기 위해서다. 위의 PRF 집합으로 속도를 추출하면 관심 속도 영역에서 실제 표적의 속도와 고스트 표적의 속도가 동시에 추출될 수 있다. 그러나 반드시 실제 표적의 속도는 추출된다. 다만 추출된 속도가 고스트에 의한 속도인지 실제 속도인지를 분별할 수 있으면 된다. 본 논문에서는 표적의 거리 값을 먼저 온전히 탐지 및 추출한 후에 표적의 속도 값을 추출하여 그 추출한 속도 값의 신뢰도를 평가하는 방식을 사용할 것이다.



(a) 거리 모호성 제거 여유도

(a) Range decodability margins



(b) 속도 모호성 제거 여유도

(b) Velocity decodability margins

그림 1. 관심 영역에서 모호성 제거 여유도

Fig. 1. Decodability margins in the interest regions.

III. 수신 채널별 파형 운영 및 신호처리 설계 개요

본 논문의 해상감시레이다는 그림 2와 같은 중요 신호 처리 단계를 거친다. 안테나가 레이다 펄스를 방사하면서 일정한 RPM으로 돌고 6개의 수신 채널을 통해 고속 및 저속, 해상 및 공중의 각각 특징적 표적들을 동시에 탐지한다. 그림 2에서 6개의 채널은 LPRF_LB_S, LPRF_LB_L, MPRF_HB_S, MPRF_HB_L, MPRF_LB_S, MPRF_LB_L

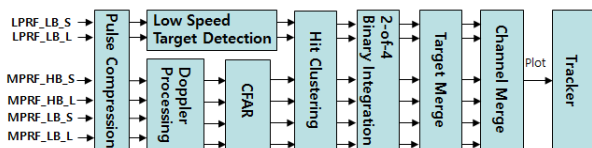


그림 2. 해상감시레이다의 신호처리 중요 흐름
Fig. 2. The main flow of signal processing for a sea surveillance radar.

이며, 각각 저속의 근거리 소형 해상표적, 저속의 원거리 대형 해상표적, 고속의 근거리 소형 공중표적, 고속의 원거리 대형 공중표적, 고속의 근거리 소형 해상표적, 고속의 원거리 대형 해상표적의 탐지에 특화된 채널들이다. 채널 이름에서 LPRF/MPRF 및 S/L(Short/Long pulse, 단/장 펄스)는 각각 사용하는 파형을 나타낸다. 수신 및 샘플링되어 각 채널을 통해 입력된 레이다신호는 각각 펄스압축된다. 그 다음 LPRF 파형의 채널은 저속 표적 탐지를 위한 처리를 수행하여 표적 히트(Hit)를 추출하고, MPRF 파형의 채널은 도플러처리와 CFAR(Constant False Alarm Rate) 처리를 통해 표적 히트를 추출한다. 이렇게 추출된 히트들은 각 채널별로 히트 클러스터링 처리를 수행한다. 펄스압축 및 도플러처리, CFAR 처리, 히트 클러스터링 등은 일반적인 레이다신호처리 과정들이다^{[4][5]}. 펄스압축 및 저속표적탐지, 히트 클러스터링 처리 등의 자세한 설명은 생략한다. 그리고 LPRF 파형 채널의 처리과정은 본 논문에서 설명을 생략한다. 본 논문은 MPRF 파형 채널의 처리를 주제로 하고 있다(LPRF 파형 채널은 표적 속도를 추출하지 않는다는 것을 제외하면 MPRF 파형 채널과 유사한 처리과정을 가진다.). 펄스압축부터 히트 클러스터링까지는 버스트(burst) 단위의 신호처리이다. 예를 들어 회전하면서 연속 방사한 펄스 32개가 한 버스트가 된다. 2-of-4 BI(Binary Integration) 처리는 4개 버스트에서 획득한 표적 히트정보들을 이용하여 표적 거리 모호성을 해결 및 표적의 모호성 있는 속도 값을 추출한다. 4개 버스트가 한 드웰(dwell)을 형성하여 한 드웰에서 표적의 거리 및 모호성 있는 속도 값을 얻는 것이다. 그림 3은 빔 스캔에 따른 버스트 빔 형성 방위 영역과 한 드웰의 BI 처리 방위 영역을 보여준다. 그림 3은 안테나가 일정 RPM으로 돌면서 펄스를 방사하고, 버스트 단위로 PRI가 바뀌

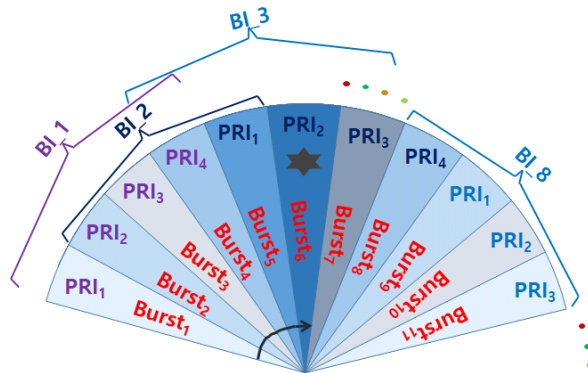


그림 3. 빔 스캔에 따른 버스트와 드웰의 방위방향 영역 및 슬라이딩 윈도우 방식의 BI 처리

Fig. 3. Azimuth region of bursts and dwells according to beam scans, and BI processing by sliding windows.

는 것을 보인다. 버스트는 $PRI_1, PRI_2, PRI_3, PRI_4, PRI_1, \dots$ PRI_4 와 같은 순서로 4개의 PRI 가 순서적으로 바뀌면서 운영된다. 2-of-4 BI 처리를 위한 한 드웰은 4개 버스트로 형성되지만, BI 처리는 버스트 단위로 하나씩 이동하면서 이루어진다. 즉, 슬라이딩 윈도우(sliding window) 방식처럼 버스트 단위로 이동하면서 2-of-4 BI 처리를 행하고, 그 처리 결과를 매 버스트마다 출력하는 것이다. BI 과정에서 추출하는 정보는 거리, 속도 외에도 방위각도 추출한다. 2-of-4 BI 처리의 순서도를 부록의 그림 12에 나타내었다. 2-of-4 BI에서 사용한 PRI 집합은 고스트 없이 완전하게 표적의 속도 값을 추출할 수 있는 집합이 아니기 때문에 모호성을 해결하지 않은 속도 값들을 추출한다. 4개의 버스트에서의 히트 정보들을 BI하여 한 표적을 탐지하는 것이므로 한 표적에 대하여 모호성 있는 속도 값은 최소 2개에서 최대 4개까지 가지게 된다. BI 후에 한 표적에 대한 정보는 1개의 거리 값, 1개의 방위 값, 그리고 2에서 4개의 속도 값을 가진다. 표적의 거리, 속도, 방위각 정보들은 그림 2의 표적 병합과 채널 병합 과정에서 주요하게 쓰이는 요소들이다. 표적 병합과 채널 병합의 표적들을 병합하는 과정에서 표적의 거리와 방위각이 표적의 전력 값을 이용한 무게 중심법으로 갱신되면서 그 해상도가 좋아진다. 관련 사항은 뒤에 다시 언급한다. 속도 모호성 해결은 그림 2의 뒤 단계인 병합 과정들이 끝나고 최종 플롯 정보 출력 전에 이루어지며, 최종 표적 플롯은 속도 후보치 값들과 그 후보치 값의 신용도 값을

가진다. 2-of-4 BI에서 속도 모호성 해결을 하지 않는 이유는 BI에서 속도 모호성을 해결하면 고스트 속도를 포함하는 속도 정보로 뒤 단계의 표적 병합 과정들을 해야 하며, 이것은 표적 속도 정보 추출에 오류를 일으킬 수 있다. 그래서 모호성이 존재할지라도 최대한 유효한 속도 값으로 병합 과정들을 거친 후에 모호성을 해결하고자 한 것이다. 속도후보치와 그 신용도 값에 대한 자세한 설명은 다음 절에서 다룬다.

그림 2의 채널 병합 이후 표적의 플롯들이 추적 단계로 입력된다. 추적에서는 이 플롯 정보를 가지고 TWS(Track While Scan)^[6] 방식으로 플롯 데이터를 관리하고 추적을 형성한다. 추적 알고리즘에서는 추적 초기화와 기존 추적과의 플롯 연관성을 위하여 플롯의 속도 후보치와 그 신용도 값을 이용한다. 추적 초기화를 위하여서는 현재 스캔(scan)에서 탐지 플롯의 거리/방위각 정보를 이용하여 플롯의 위치 정보를 구하고, 이 플롯 정보와 이전 스캔에서의 동일 방위각 영역에서 탐지 플롯의 위치 정보를 함께 이용하여 두 플롯 정보가 하나의 추적 표적을 형성할 때 표적의 속도 값을 계산한다. 이 계산한 속도 값과 현 플롯의 신용도가 가장 높은 속도후보치 값과의 절대 차이가 미리 설정한 문턱치 값보다 작으면 추적 초기화를 과정을 수행한다. 만약 가장 높은 신용도의 속도후보치가 문턱치 값 조건을 만족하지 않으면 그 다음 높은 신용도의 속도후보치로 문턱치 값 조건을 검사하는 과정을 반복한다. 결국 가장 높은 신용도의 속도후보치 부터 조건을 검사하여 조건에 만족하면 추적 초기화를 수행하고, 어떤 속도후보치도 조건에 만족하지 않으면 현 플롯과는 추적 초기화가 이루어지지 않는다. 이렇게 속도 정보를 이용하여 탐지 초기 단계부터 표적을 속도 정보로 분류/관리하여 오추적을 없앨 수 있다. 기존 추적과의 플롯 연관성을 위하여는 기존 추적에서 계산되는 표적 속도 값과 현 플롯의 신용도가 가장 높은 속도후보치 값과의 절대 차이가 미리 설정한 문턱치 값보다 작으면 기존 추적에 현 플롯을 연관한다. 만약 가장 높은 신용도의 속도후보치가 문턱치 값 조건을 만족하지 않으면 그 다음 높은 신용도의 속도후보치로 문턱치 값 조건을 검사하는 과정을 반복한다. 마찬가지로 신용도의 순서에 따라 조건에 만족하는 속도후보치가 존재하면 연관되고, 존재하지 않으면 현 플

롯은 기존 추적과 연관되지 않는다. 이렇게 속도 정보를 이용하면 플롯 연관에서의 오류도 줄일 수 있다.

IV. 다단계의 신호처리를 통한 모호성 해결

이 절에서는 그림 2의 2-of-4 BI, 표적 병합, 채널 병합 과정을 거치면서 표적 속도의 모호성을 해결하여 표적 속도후보치와 그 신용도 값을 구하는 방법을 자세히 설명한다. 앞 절에서 설명하였듯이 BI 처리를 통해 버스트 단위로 플롯 정보가 출력된다. 그런데 한 표적이 여러 버스트에 걸쳐 탐지될 수 있으므로 한 표적에 대해 탐지 플롯이 여러 버스트에 걸쳐 BI 처리의 출력으로 나오게 된다. 해상감시레이더는 대형/소형, 근거리/원거리의 다양한 표적을 탐지하기에 몇 번의 버스트에 걸쳐서 탐지되는 지는 다양하게 나타난다. 그림 4는 슬라이딩 윈도우 방식의 BI 처리 간에 한 표적에 대한 탐지 예를 나타내었다. 표적 병합은 그림 4처럼 한 표적이 여러 버스트 단위의 BI 출력에 탐지되어 나타나는 것을 한 표적으로 병합하고, 한 탐지 플롯을 형성하여 한 표적에 대해 한번만 플롯 정보가 나오게 하는 과정이다. 그림 5는 표적의 거리/속도값

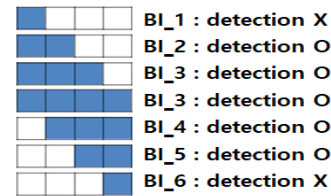


그림 4. BI 처리 간에 한 표적의 탐지 예

Fig. 4. An example of detections of a target between BI processings.

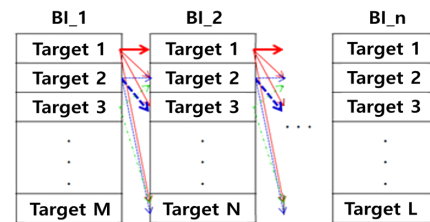


그림 5. 버스트 단위의 BI 출력들 간의 연속성을 고려한 표적 병합 개념도

Fig. 5. Conceptual diagram of target merge considering continuity between BI's burst unit outputs.

및 버스트 간의 연속성을 이용하여 표적 병합하는 과정을 표현한다. 그림 5에서 보듯이 연속적인 BI 결과에서 추출된 표적들을 거리/속도 값을 기준으로 클러스터링 (clustering)하여 버스트 간에 연속적으로 클러스터링된 표적 모두를 하나의 표적으로 병합하는 것이다. 버스트 간에 연속적으로 클러스터링되어 병합되지 않으면 다른 표적으로 간주된다. 한 표적으로 병합된 표적들의 방위각 정보들을 이용하여 병합된 표적의 방위각 값을 갱신한다. 즉, 연속적으로 묶여진 표적들의 방위각과 전력의 값을 이용한 가중치 평균으로 병합된 표적의 방위각을 정한다. 그림 6은 병합된 표적을 출력하는 단위를 나타내고 있다. 표적 병합과정은 4 버스트마다 한 번씩 이루어지면서 표적 병합결과를 4 버스트마다 한 번씩 출력한다. 4 버스트 간격은 이 레이더에서 방위각으로는 1도 간격이다. 즉, 방위각 1도 간격으로 해당 방위 영역의 표적 플롯이 출력된다. 표적 병합은 플롯이 출력되는 방위각 1도 영역의 앞과 뒤의 1도 영역을 모두 고려하여 처리한다. 표적 병합 과정에서 하나로 병합되는 표적들의 거리, 방위각 및 전력 값에 기반한 무게 중심법으로 한 병합 표적의 거리와 방위각은 결정된다. 그리고 한 병합 표적의 속도 값들 (모호성 있는 속도 값들)은 같은 PRI의 버스트에서 추출된 속도 값이면서 그 서로의 차이 값이 기준 문턱치 아래에 있는 속도 값들끼리의 평균으로 결정된다(부록의 그림 14의 순서도 처리블록들에서 동일 표적 여부 판단을 위한 속도 및 PRI 비교 그리고 동일 표적으로 판단되었을 때에 속도 값 갱신하는 블록을 참조). 그림 6에서 보듯이 4 버스트(1 드웰)마다 수행되는 방위 방향 병합 영역에서 병합된 플롯의 방위각이 가운데 방위 영역에 해당되는 플롯들만 출력된다. 이렇게 4 버스트 단위로 슬라이딩 윈

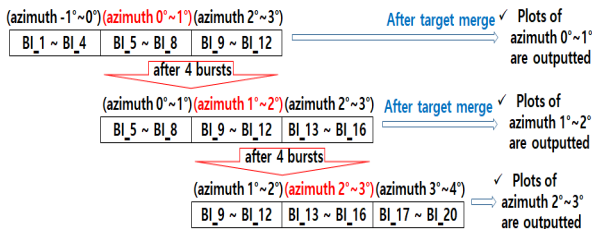


그림 6. 표적 병합 처리와 결과 출력의 단위
Fig. 6. Unit of the target merge processing and its outputs.

도우 방식처럼 이동하여 표적 병합 및 표적 플롯 출력이 이루어진다. 부록의 그림 13은 l 번째와 $l+1$ 번째 BI 결과에 대하여(l 은 양의 정수) 표적 병합 처리를 수행하는 순서도를 나타낸다. 부록의 그림 13의 방법을 기반으로 그림 5의 표현처럼 연속적인 BI 결과의 표적 플롯들을 방위 방향 연속성에 따라 병합한다.

표적 병합까지는 아직 속도 모호성을 해결하지 않고 있다. 그림 2의 채널 병합 후에 최종적으로 속도 모호성이 해결된다. 채널 병합 과정은 동일한 표적이 여러 채널에 걸쳐서 탐지되어 나올 때 하나로 병합하여 한 표적의 플롯으로 형성한 다음 플롯을 출력한다. 3절에서 언급했듯이 본 논문의 레이더는 6개의 수신 채널을 가지고 있고, 그림 7처럼 1-of-2의 개념으로 두 채널씩 단계적으로 병합해 나간다. 1-of-2 개념의 채널 병합은 두 채널의 플롯들을 병합 조건으로 검사하여 두 플롯이 병합되면 두 플롯을 병합된 하나의 표적으로 출력하고, 두 플롯이 병합되지 않으면 두 플롯을 각각 개별 플롯으로 출력하는 것이다. 채널 병합에서 사용되는 플롯 정보는 표적의 거리, 속도, 방위각 정보이다. 채널 병합은 드웰 단위로 이루어진다. 모호성 해결과 관련한 MPRF_HB_S, MPRF_HB_L, MPRF_LB_S, MPRF_LB_L 채널들의 병합에 대해 주요하게 설명한다. LPRF 파형 채널인 LPRF_LB_S, LPRF_LB_L 채널의 병합도 MPRF 파형의 채널의 병합 방법과 기본적으로 같고, 다만 병합 조건에 속도 값이 제외된다는 것만 다르다. 그림 7의 MPRF_HB_S와 MPRF_HB_L의 1-of-2 채널 병합 또는 MPRF_LB_S와 MPRF_LB_L의 1-of-2 채널 병합 처리(단 펄스와 장 펄스 채널간의 병합 처리)는 먼저 두 채널의 표적 병합 출력들을 모아서 표적 거리순으로 정렬한다. 그 다음 정렬된 플롯들을 차례대로 두 플롯 사이의 표적 거리값 차이, 표적 방위각 차이, 그리고 표적 속도 값 차이 등의 문턱치 조건으로

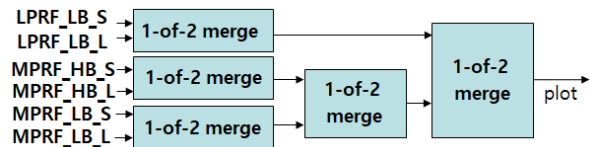


그림 7. 단계적 채널 병합의 개념도
Fig. 7. Conceptual diagram of stepwise channel merges.

검사한다. 이렇게 차례대로 검사하면서 문턱치 조건에 부합하면 병합된 하나의 플롯을 형성하고, 부합하지 않으면 병합하지 않은 플롯으로 그대로 둔다. 부록의 그림 15에 단 펄스와 장 펄스 채널간의 병합 처리 순서도를 나타내었다. 그림 7에서 MPRF_HB_S와 MPRF_HB_L의 채널 병합 결과와 MPRF_LB_S와 MPRF_LB_L의 채널 병합 결과의 병합 처리(MPRF_HB와 MPRF_LB 채널간의 병합 처리)는 마찬가지로 두 곳의 플롯 출력들을 모아서 표적 거리순으로 정렬한다. 그 다음 단 펄스와 장 펄스 채널간의 병합에서처럼 표적 거리값 차이, 표적 방위각 차이, 그리고 표적 속도 값 차이 등의 문턱치 조건을 검사하여 병합하고, 병합 플롯들의 속도 모호성 해결 처리를 한다. 부록의 그림 16에 MPRF_HB와 MPRF_LB 채널간의 병합 처리 순서도를 나타내었다. 이 처리 순서도를 보면 알 수 있듯이 병합이 이루어지고 난 후 플롯들의 정보를 갱신하는 과정에서 속도 모호성을 해결한다. 속도 모호성을 해결하기 전 병합 표적 플롯은 각 PRI 버스트에서 잡힌 모호성 있는 속도 값을 가지고 있다. 이런 각 PRI마다의 모호성 있는 속도 값을 관심 속도 영역까지 확장한 속도 값들을 클러스터링 문턱치를 기준으로 클러스터링하여 클러스터의 원소가 개수가 많은 것을 기준으로 해당 클러스터의 속도 값을 추출하면 그것이 모호성이 해결된 속도 값이 된다. 이 방법은 부록의 그림 12의 거리 모호성 해결과 같은 처리 순서를 가지며, 다만 거리가 아니라 속도에 모호성 해결에 적용한 것이다. 참고로 이 방법은 참고문헌 [7]의 표적 추출 알고리즘을 참고하였으며, 하나의 모호성 있는 속도 값을 관심 속도 영역까지 확장한 속도 값들은 다음 식과 같이 구한다.

$$v_a + n V_{PRF},$$

$$n = [-k, -k+1, \dots, k-1, k], k = \text{round}(V_{\max}/V_{PRF}) \quad (3)$$

여기서 v_a 는 표적의 모호성 있는 속도, V_{PRF} 는 최대 비모호 속도, V_{\max} 는 관심 영역의 최대 속도 값, 그리고 $\text{round}()$ 는 반올림한 정수이다. 부록 그림 12의 순서도 블록에서 근접거리 반경(속도 모호성 해결의 경우 근접속도 반경)은 클러스터링 문턱치를 말하는 것이며, 이 문턱치 값은 그림 1의 모호성 제거 능력 판단 기준치 설정과

같이 거리 및 속도 측정 오차의 4배의 값으로 설정한다. 부록의 그림 12의 순서도에 따라 속도 모호성을 해결하면, 2-of-4 정책을 만족하는 속도 값이 여러 개 추출되며, 이것들이 속도후보치가 된다. 속도 값이 하나씩 차례대로 추출되는데, 맨 처음 추출되는 속도 값이 실제 표적의 속도 값일 신용도(가능성)가 가장 높다. 부록의 그림 12의 알고리즘의 특성을 이용하여 속도 값이 추출되는 순서를 그 속도 값이 실제 속도 값일 신용도의 순서로 정의한다(알고리즘 특성상 확장한 속도 값들이 형성하는 클러스터들 중에서 클러스터 내의 원소가 가장 많은 순서대로 그 클러스터의 속도 값이 추출된다.). 즉, 부록의 그림 12에서 표적으로 선언된 클러스터 내의 원소의 개수가 신용도의 값으로 정의된다. 그러므로 속도후보치들을 추출하면 그 신용도 값이 같이 결정된다. 이들 속도후보치들 안에는 반드시 실제 표적의 속도 값이 존재한다. 그림 2의 추적 단계에서 그 속도후보치들 값들 중에서 신용도가 높은 순서로 선택하여 사용하는 것이 타당한 방법이다. 본 논문의 방법을 적용한 해상감시레이다의 실측 데이터를 분석한 결과, 신용도가 가장 높은 속도후보치가 실제 속도인 경우가 92.35 % 이상이었다. 그리고 속도후보치들 안에는 반드시 실제 속도 값이 100 % 존재했다.

그림 7의 마지막 단계인 LPRF 파형과 MPRF 파형 채널의 병합은 LPRF_LB_S와 LPRF_LB_L 채널의 병합과 같은 방식으로 이루어지며, 이후에 최종적으로 전체 채널 병합 과정이 끝난 플롯 정보가 그림 2의 추적 처리 단계의 입력으로 출력된다.

V. 시뮬레이션 및 각 처리 단계별 결과 분석

이 절에서는 시뮬레이션을 행하고, 각 처리 단계별 결

표 1. 시뮬레이션 표적 시나리오 파라미터
Table 1. Target scenario parameters for simulation.

표적 순번	상대거리	상대속도	방위각
표적 1	21.21 km	4.54 m/s	4°
표적 2	26.93 km	11.90 m/s	20.9°
표적 3	36.40 km	1.85 m/s	23.5°
표적 4	63.25 km	350.9 m/s	23.4°
표적 5	100.50 km	786.40 m/s	27.9°

과를 보여준다. 표 1은 시뮬레이션 표적 시나리오이다.

표적 모의 및 일정한 속도로 안테나가 회전하면서 앞에서 설명한 파형을 운용하는 시뮬레이션을 행하였으며, 시뮬레이션 진행 중 레이더와 표적이 ECEF(Earth Centered Earth Fixed) 좌표 상에 그림 8과 같이 위치하면서 레이더가 운용될 때까지의 구현된 방법의 단계별 처리 결과들을 확인하였다. 그림 8에서 실선의 끝에 연결된 별표의 위치가 레이더의 위치이며, 실선은 안테나가 조향하는 방위 방향을 나타낸다. 그리고 나머지 4개의 별표는 4개의 표적의 위치를 나타낸다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 레이더가 가장 가까운 한 표적 방향으로 안테나 빔을 조향하고 있으므로 그 표적(표적 1)을 탐지할 수 있는 상황이다. 그림 9는 2-of-4 BI 처리 단계의 처리 결과를 보여준다.

그림 9는 LPRF_LB_L 채널의 BI 출력 플롯 정보 중에서 표적의 거리, 방위각, 그리고 모호성 있는 속도값을 표시하였다. 표적이 21.2 km에서 하나 탐지되고 표적의 방위각은 4.3°, 모호성 있는 속도 값은 4개가 있다(4개의 PRI 버스트에서 모두 표적이 잡혔던 것으로 확인할 수 있고, 그 추출 속도값 중에 하나는 4.351 m/s이다.). 그림 10은

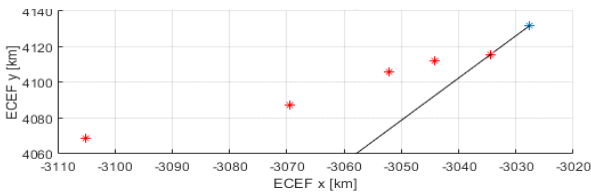


그림 8. 레이더의 동작과 표적의 움직임 시뮬레이션
Fig. 8. Simulation for radar operations and target motions.

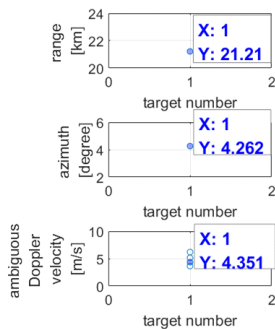


그림 9. 시뮬레이션에서 BI 출력의 플롯 정보
Fig. 9. Plot information of the BI output in the simulation.

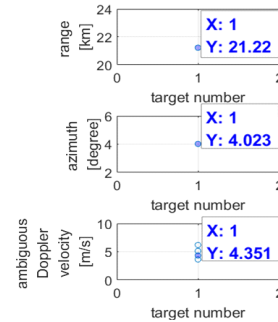


그림 10. 시뮬레이션에서 표적 병합의 출력 플롯 정보
Fig. 10. Plot information of the target merge output in the simulation.

표적 병합 단계의 처리 결과를 보여준다. 표적이 21.2 km에서 하나 탐지되고, 표적의 방위각은 4.0°로서 방위 방향 연속된 탐지 표적들의 병합에 의해 방위각이 결정되었기에 그림 9에서와 조금 다른 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 속도 값들은 그림 9와 동일한 결과를 보인다. 그림 11은 채널 병합 단계의 처리 결과를 보여준다. 최종적으로 표적 플롯의 상대거리는 21.2 km, 방위각은 4.0°로 출력되었으며, 상대속도는 모호성이 해결된 하나의 값으로서 4.75 m/s로 출력되었다. 이 경우는 모호성 해결 처리 후에(2-of-4 정책을 만족하는) 하나의 속도 값이 출력되었다. 이런 경우는 아주 깨끗한 환경에서 오폭적 탐지가 없고, 표적 속도가 낮은 경우에 실제 표적의 속도 값 하나만 추출되어 나오는 것이며, 실제로는 드문 일이다. 실제 환경 및 표적의 SNR이 낮은 경우에는 오폭지가 많고, 채널

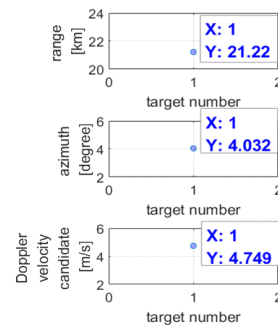


그림 11. 시뮬레이션에서 채널 병합의 출력 플롯 정보
Fig. 11. Plot information of the channel merge output in the simulation.

병합 후에 한 표적에 대해 여러 개의 속도 값이 추출되어 속도후보치로 사용된다. 다음 절에서 실측데이터의 속도 후보치를 분석했다.

VI. 실측 데이터를 통한 처리 결과 분석

이 절에서는 제안한 방법을 실제 해상감시레이다에 구현하여 획득한 실제 측정 데이터를 분석한다. 레이다의 운용은 동해안에서 이루어졌다. 탐지된 표적의 상대거리는 1.70 km에서 194.74 km까지 다양했으며, 표적의 상대속도는 -582.75 m/s에서 551.75 m/s까지 다양했다. 탐지된 한 표적이 가지는 속도후보치의 최대 개수는 13까지 나왔다. 표 2는 실측 데이터의 13,267개의 플롯에서 탐지된 표적의 실제 상대속도(추적에서 TWS 방식으로 탐지 표적들을 관리하기 때문에 실제 표적 속도를 알 수 있음.)와 속도후보치 및 그 신용도와의 관계를 분석한 결과이다. 표 2의 첫 줄은 속도후보치의 신용도가 높은 순위 값을 표현한 것이며, 두 번째 줄은 13,267개의 플롯 중에서 해당 신용도 순위의 속도후보치 값이 표적의 실제 속도 값인 경우의 플롯 개수를 나타낸다. 즉, 추출된 신용도가 가장 높은 속도후보치 값이 표적의 실제 속도 값인 경우가 12,252번이었다는 것이다. 참고로 표 2에서 신용도가 높은 순위가 10위 이하인 속도후보치 값이 실제 속도 값인 경우는 모두 10위로 통합하여 통계를 내었다. 표 2의 세 번째 줄은 전체 플롯 중에서 해당 순위 신용도의 속도후보치 값이 실제 속도 값인 경우의 플롯 비율을 나타낸다. 표 2에서 신용도가 가장 높은 속도후보치가 실제 속도인 경우가 92.35 % 정도($=12,252/13,267$)이고, 신용도가 두 번째로 높은 속도후보치가 실제 속도인 경우가 4.55 % 정도이다. 속도후보치들 중에는 반드시 표적의 실제 상대속도가 존재하였다. 실측 데이터를 통해 표적의 속도후보

치와 그 신용도의 추출 및 제안한 방법들이 잘 동작함을 확인할 수 있다. 실제로 이 해상감시레이다는 다양한 표적을 잘 탐지하면서 동작하고 있다.

VII. 결 론

해상감시레이다에서 해상의 저속 및 공중의 고속 표적 모두를 탐지하기 위한 파형운영 및 신호처리 설계를 보여 주었다. 특히 표적의 속도 탐지를 위해 MPRF 파형을 사용하나, 레이다 운영상 제한 조건 때문에 속도모호성이 완전히 해결되지 않는 불완전한 탐지 PRF 집합 설계를 제시하고, 속도모호성 해결이 불완전한 PRF 집합에서 속도모호성 해결 방법 및 신호처리 설계를 제시했다. 제안한 방법을 실 레이다에 구현하여 실측 데이터를 확보하였으며, 데이터 분석을 통해 제안한 방법의 기능 및 성능을 확인하였다.

부 록

이 부록에서는 본 논문의 연구에서 구현한 2-of-4 BI, 표적 병합 및 채널 병합 과정에 대해 추가적으로 기술한다. 먼저 그림 12는 2-of-4 BI 처리의 순서도를 나타낸다. 앞에서 기술하였듯이 참고문헌 [7]의 표적 추출 알고리즘의 개념을 거리 모호성 제거 및 거리 값 추출에 적용한 것이다. 그림 13은 연속한 두 BI 출력 사이에서 표적 병합 처리하는 순서도를 나타낸다. 그림 13에서 그림 16까지의 순서도 그림에서 순서도 그림 옆에 그 순서도에서 표현된 변수 및 상수들의 의미를 설명해 두었다. 한 BI 출력에서 시작하여 연속한 BI 출력들에 대하여 그림 13의 순서도의 처리를 연속하여 병합이 일어나지 않을 때까지 적용함으로써 표적 병합이 이루어진다. 그림 13의 순서도에 서 가운데 위치한 처리 블록 $[R_{Match}, R] = Compare$

표 2. 동해안에서 실제 측정한 표적 탐지 플롯 13,267개를 이용한 표적 속도 탐지 결과 분석

Table 2. Analysis of detection results of target velocities using 13,267 plots detected in east coast.

신용도 순위	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
실제속도 개수	12,252	604	220	76	45	26	15	10	10	9
실제 속도 비율	92.3 %	4.55 %	1.66 %	0.57 %	0.34 %	0.2 %	0.11 %	0.08 %	0.08 %	0.06 %

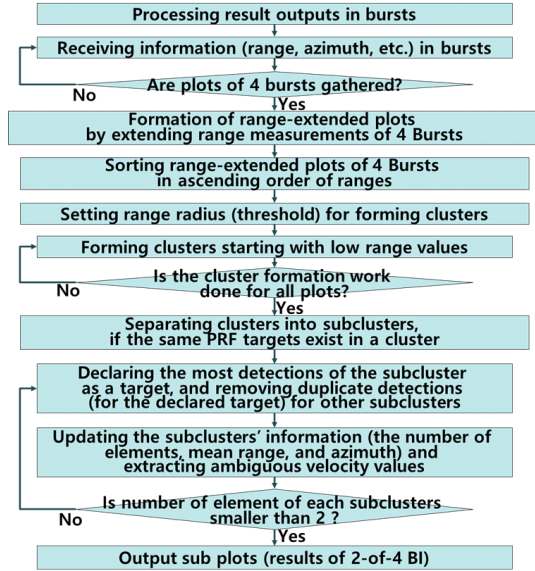


그림 12. 2-of-4 BI 처리 순서도

Fig. 12. The flow of the 2-of-4 BI processing.

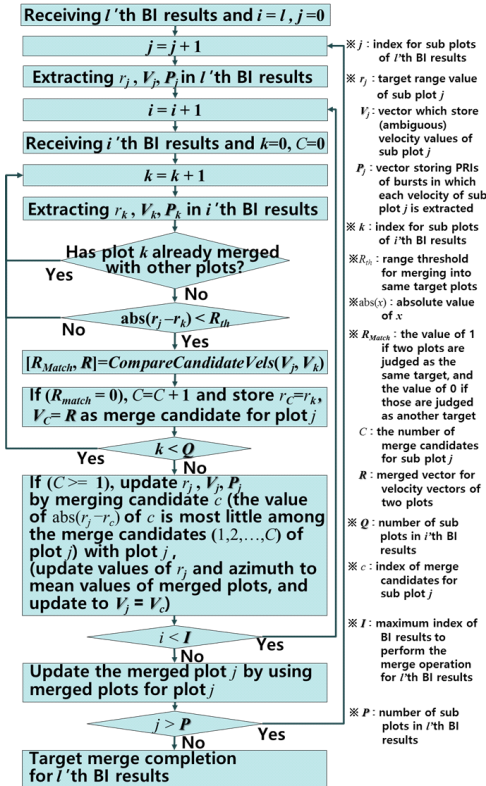


그림 13. 표적 병합 처리의 순서도

Fig. 13. The flow of the target merge processing.

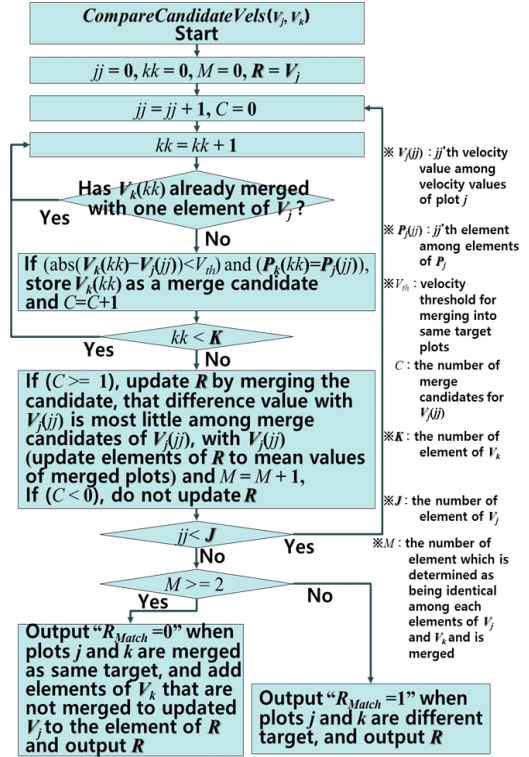


그림 14. CompareCandidateVels() 함수의 처리 순서도

Fig. 14. The processing flow of CompareCandidateVels().

Candidate Vels(V_j, V_k)는 두 표적의 모호성 있는 속도 값 및 버스트 PRI 값들을 비교하여 두 표적이 동일 표적으로 판단되면 $R_{Match} = 0$ 과 병합된 모호성 있는 속도 값들을 저장한 벡터 R 을 출력한다. 이 처리 블록의 상세한 내부 처리 순서도를 그림 14에 나타내었다. 그림 15는 그림 7의 단계별 채널 병합과정 중에서 첫 번째 단계인 단 펄스와 장 펄스 채널 간의 병합 처리의 순서도를 나타내었다. 그림 16은 그림 7의 중간 단계인 MPRF 파형 채널들 간(MPRF_HB와 MPRF_LB 채널간의)의 병합 처리의 순서도를 나타내었다. 그림 15와 그림 16의 처리 순서도는 거의 비슷하며, 다만 그림 16은 모호성 해결 처리를 수행하여 표적의 속도후보치 값들을 출력한다는 것이 다르다. 그림 7의 마지막 단계인 LPRF 파형과 MPRF 파형 채널의 병합은 그림 15의 순서도에서 $[R_{Match}, R]$ 을 구하여 속도 값으로 동일 표적 여부를 판단하는 부분만 생략하면 그림 15와 동일한 처리 순서도를 가진다.

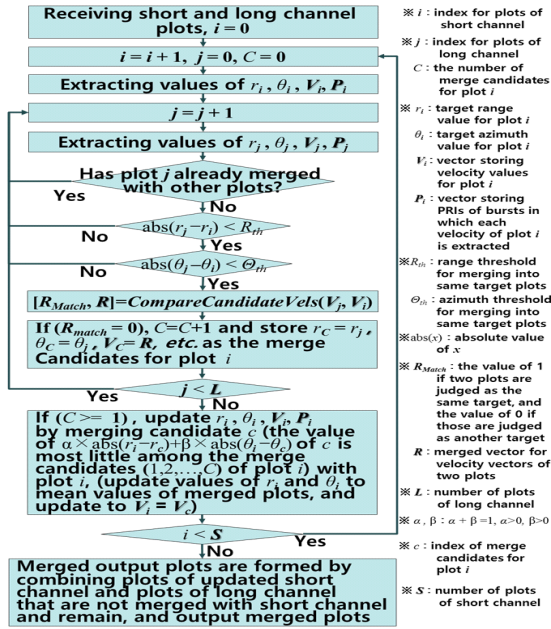


그림 15. 단 펄스와 장 펄스 채널 병합 처리의 순서도
Fig. 15. The flow of merging short and long channels.

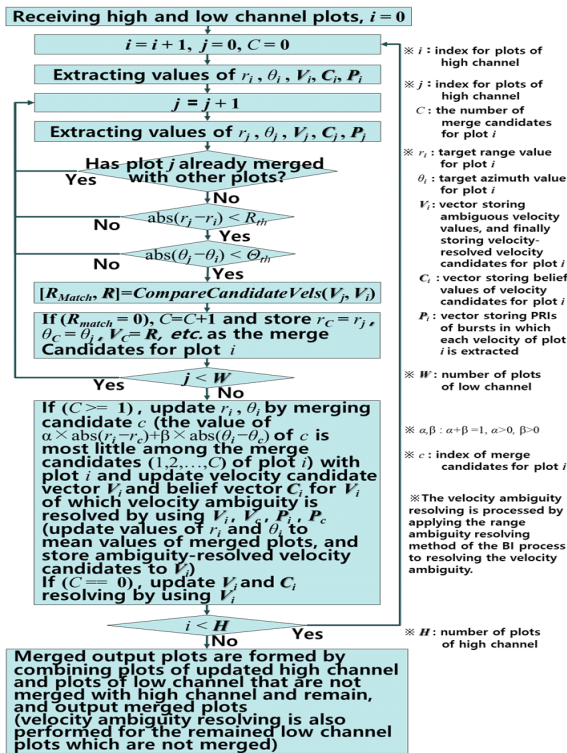


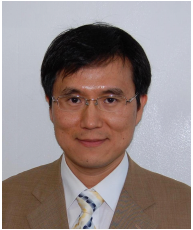
그림 16. MPRF 파형 채널들 간의 병합 처리 순서도
Fig. 16. The flow of merging MPRF waveform channels.

References

- [1] A. M. Kinghorn, N. K. Williams, "The decodability of multiple-PRF radar waveforms," in *Radar Systems(RA-DAR 97)*, Edinburgh, 1997, pp. 544-547.
- [2] T. H. Kim, E. H. Kim, and S. W. Lee, "Real-time PRF selection for search/track in MPRF waveform airborne radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 10, pp. 1050-1061, Oct. 2014.
- [3] T. H. Kim, J. W. Yi, and Y. J. Byun, "Real-time selection of pulse repetition frequency(PRF) set for a triple 2-of-3 PRF scheme," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 13, no. 3, pp. 186-188, Mar. 2013.
- [4] T. H. Kim, S. H. Ryu, J. H. Shin, H. W. Jeon, S. H. Jang, and S. J. Kim, "Design of signal processing for target detection and tracking based on high pulse repetition frequency waveforms in airborne active electronically scanned array radars," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 12, pp. 951-963, Dec. 2019.
- [5] T. H. Kim, H. W. Jeon, J. H. Shin, and Y. D. Kang, "Improvement of detection ranges for targets in sidelobe clutter surroundings by sigma-delta STAP for airborne radars," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 19, no. 4, pp. 234-238, Oct. 2019.
- [6] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, 2nd ed. Boca Raton, FL, Chapman & Hall/CRC, 2005.
- [7] D. Wiley, S. Parry, C. Alabaster, and E. Hughes, "Performance comparison of PRF schedules for medium PRF radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 2, pp. 601-611, Apr. 2006.

김 태 형 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5296-2389>



1999년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학석사)
2007년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학박사)
2010년 11월: 국방과학연구소 연구원
2010년 12월~현재: LIG넥스원(주) 레이다 연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이다 신호처리, 레이다 시스템, 패턴인식 등

박 준 현 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2750-6688>



1996년 2월: 홍익대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 3월~현재: LIG넥스원(주) 레이다 연구소 수석연구원
[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이다, 항공기 레이다, 레이다 신호처리 등

박 재 욱 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2735-1324>



2011년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2017년 1월~현재: LIG넥스원(주) 레이다 연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이다 신호처리, 인공지능 등

강 연 덕 [LIG넥스원/연구위원]

<https://orcid.org/0000-0003-0527-3641>



1993년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 8월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학박사)
2000년 9월~현재: LIG넥스원(주) 레이다 연구소 연구위원

[주 관심분야] 레이다 시스템, 초고주파 소자, 전자파 해석 등

안 지 훈 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1907-6123>



2014년 2월: 한양대학교 전자시스템공학 (공학사)
2016년 2월: 한양대학교 전자시스템공학 (공학석사)
2016년 4월~현재: LIG넥스원(주) 레이다 연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이다 표적 추적 등