

논문 2011-48TC-9-9

# 부 최적 이진누적 적용 레이더의 표적 측정오차 감소 기법

## ( Target Measurement Error Reduction Technique of Suboptimal Binary Integration Radar )

남 창 호\*, 최 성 희\*, 나 성 웅\*\*

( Chang Ho Nam, Seong Hee Choi, and Sung Woong Ra )

### 요 약

이진누적기법은 여러 개의 펄스반복주파수가 사용되는 레이더 시스템에서  $n$  번의 탐지시도에서  $m$  번의 탐지가 이루어졌는지를 식별하여 탐지여부를 판단하는 부 최적 펄스누적기법이다. 본 논문에서는  $m$  의 최적값이 아닌 그 근사값으로 이진누적기법을 적용한 부 최적 이진누적기법 구현시 발생하는 방위각 오차를 감소시킬 수 있는 표적 측정오차 감소기법을 제안하고, 그 결과를 실제 레이더의 시험결과를 기반으로 분석하여 검증한다.

### Abstract

A binary integration is one of sub-optimal pulse integration which decides detection based on discriminating  $m$  successful detections out of  $n$  trials in radar systems using multiple pulse repetition frequencies. This paper introduces target measurement error reduction technique to reduce azimuth errors in suboptimal binary integration radar which applies the near value by  $m$  rather than the optimal  $m$  and verifies the performance by analyzing the experimental data measured from real radar.

**Keywords :** 이진 누적(Binary Integration), 방위각 오차 감소, IMM(Interacting Multiple Model)

## I. 서 론

이진누적 기법<sup>[1~4]</sup>은 최적의 펄스누적기법에 비해 간단하고 비용이 적게 소요되는 부 최적 펄스누적기법이다.  $n$  개 펄스를 위상정합누적하는 최적 누적기법 대신에 이진누적기법은  $n$  개 펄스중 몇 개( $m$ ) 펄스가 임계치를 초과하였는지를 식별하여 탐지 여부를 판단한다. 단일 펄스 임계치는 레이더 신호 탐지에서 요구되는 오경보율 및 탐지확률을 만족시키기 위해 정의되는  $n$  과  $m$  에 의해 결정된다.  $m$  의 선택은 오경보율 및 탐지확률에 영향을 미치기 때문에,  $m$  에 따라 탐지 여부를 결정하는 임계치가 설정된다.

$m$  에 따라 설정된 탐지확률 및 오경보율에 따라 요구 SNR이 정의되며, 표적탐지 및 추적 정확도는 이러한 변수를 기반으로 이루어진다. 추적 정확도는  $m$  개 펄스중  $n$  개에서 표적이 탐지되는 경우 그 성능이 최적의 상태를 유지하나,  $m \sim (n-1)$  개에서 표적이 탐지되는 경우 그 성능이 저하된다. 본 논문에서는 이렇게  $m \sim (n-1)$  개 펄스에서 표적이 탐지되는 경우 방위각 오차를 감소시킬 수 있는 표적 측정오차 감소기법을 소개하며, 실제 레이더에서 구현된 적용 사례를 바탕으로 표적 측정오차를 분석하여 그 성능을 검증한다.

## II. 최적 탐지기법과 부 최적 탐지기법

### 1. 이상적인 최적의 위상정합 탐지 (coherent detection) 처리

\* 정회원, 국방과학연구소

(Agency for Defense Development)

\*\* 정회원, 충남대학교 전기정보통신공학부

(Chungnam National University)

접수일자: 2011년4월30일, 수정완료일: 2011년9월16일

잡음과 잡음이 포함된 신호의 확률밀도함수(Probability Density Function)는 그림 1과 같이 나타난다. 신호는 최대치인  $\sqrt{2}E_s$ 에 도달하는 양의 값을 나타내며, 잡음성분  $v_i$ 는 잡음성분만 존재할 때 영에 중심값이 위치한다. 정규분포의 적분  $Q(E)$ 와 그 역함수인  $Q^{-1}(P)$ 는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Q(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_E^{\infty} \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) dv = P \quad (1)$$

$$Q^{-1}(P) = E$$

여기서,  $E$ 는 전체 신호 에너지이다.

위 식의 함수를 이용하여 오경보율  $P_{fa}$ 와 탐지확률  $P_d$ 는 다음 식 (2)와 (3)과 같이 표현된다.

$$P_{fa} = \int_{E_{tc}}^{\infty} dP_v = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \int_{E_{tc}}^{\infty} \exp\left(-\frac{v^2}{2N}\right) dv = Q\left(\frac{E_{tc}}{\sqrt{N}}\right) \quad (2)$$

$$E_{tc} = \sqrt{N} Q^{-1}(P_{fa})$$

$$P_d = \int_{E_{tc}}^{\infty} dP_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \int_{E_{tc}}^{\infty} \exp\left(-\frac{(v+E_s)^2}{2N}\right) dv \quad (3)$$

$$= Q\left(\frac{E_{tc} - \sqrt{2S}}{\sqrt{N}}\right) = Q\left[Q^{-1}(P_{fa}) - \sqrt{2S/N}\right]$$

여기서,  $dP_v$ 는 가우시안 잡음성분의 미분확률이고,  $dP_s$ 는 잡음이 포함된 신호의 미분확률이다.  $E_{tc}$ 는 위상정합 탐지의 임계 전압이고,  $v$ 는 가우시안 잡음 전압,  $N$ 은 잡음전력,  $E_s$ 는 신호전압,  $S$ 는 신호전력이다.

단일 펄스의 위상정합탐지(coherent detection)에 대

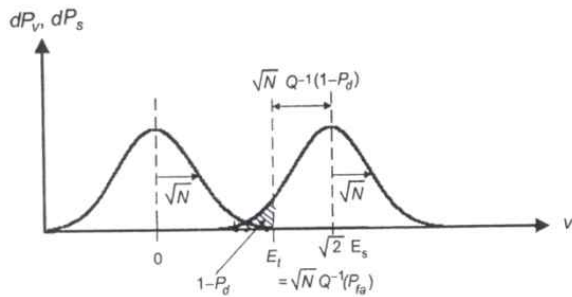


그림 1. 위상정합탐지(coherent detection)에 대한 확률밀도함수<sup>[5]</sup>

Fig. 1. Probability density functions for coherent detection<sup>[5]</sup>.

한 탐지척도(detectability factor)는 식(4)와 같이  $P_{fa}$ 와  $P_d$ 가 주어질 때 요구되는 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)로 나타낼 수 있으며, 여러 펄스를 위상정합 누적(coherent integration)하여 최적의 탐지성능을 얻고자 하는 경우 이 식으로부터 위상정합 탐지시 요구되는 펄스당 SNR인  $D_c(1)$ 을 구할 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$D_c(1) = \frac{1}{2} \left[ Q^{-1}(P_{fa}) - Q^{-1}(P_d) \right]^2 \quad (4)$$

## 2. 실제적인 비 위상정합 탐지(noncoherent detection) 처리

단일 펄스 탐지의 경우 임계치  $E_{n1}$ (비 위상정합 탐지시 임계전압)으로 잡음에 의해 야기되는 오경보율을 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$P_{fa} = \int_{E_{n1}}^{\infty} \frac{E_n}{N} \exp\left(-\frac{E_n^2}{2N}\right) dE_n = \exp\left(-\frac{E_{n1}^2}{2N}\right) \quad (5)$$

여기서,  $E_n$ 은 잡음전압이다.

식 (5)로부터 비 위상정합 탐지의 임계전압은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$E_{n1} = \sqrt{2N \ln(1/P_{fa})} \quad (6)$$

탐지확률  $P_d$ 는 North<sup>[6]</sup>에 의해 식 (7)과 같이 표현된다.

$$P_d = Q\left(\frac{E_{n1}}{\sqrt{N}} - \sqrt{2\frac{S}{N} + 1}\right) \quad (7)$$

위의 식으로부터 단일펄스 요구 SNR(detectability factor)은 식 (8)과 같이 표현되며, 여러 펄스를 비위상정합 누적(noncoherent integration)하여 부 최적의 탐지성능을 얻고자 하는 경우 이 식으로부터 펄스당 요구되는 SNR인  $D_0(1)$ 을 다음과 같이 구할 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$D_0(1) = \frac{1}{2} \left[ \frac{E_{n1}}{\sqrt{N}} - Q^{-1}(P_d) \right]^2 - \frac{1}{2} \quad (8)$$

## 3. 부 최적의 이진누적(binary integration) 처리

$n$  개 펄스를 위상정합 누적하는 최적 누적기법 대신

에 이진누적기법은  $n$ 개 펄스중 몇 개( $m$ ) 펄스가 임계치를 초과하였는지를 식별하여 탐지 여부를 판단하는 부 최적의 비 위상정합 누적(noncoherent integration) 기법이다.

이진 누적기의 성능은 식 (9)와 같이 이항 분포(binomial distribution)에 근거하여 표현된다.

$$P(j) = \frac{n!}{j!(n-j)!} p^j (1-p)^{n-j} \quad (9)$$

여기서,  $P(j)$ 는  $n$  번의 시도에서 임계치를  $j$  번 넘을 확률이며,  $p$ 는 1번의 시도에서 임계치를 넘을 확률이다. 최종 출력단에서 누적 확률은 다음 식으로 표현된다.

$$P(j \geq m) = \sum_{j=m}^n P(j) \quad (10)$$

최종 출력단에서 오경보율은 단일펄스에서 잡음에 의해 오경보가 발생할 확률  $p_{fa}$ 로 표현되며 식 (11)과 같이 나타난다<sup>[5]</sup>.

$$P_{fa} = \sum_{j=m}^n \frac{n!}{j!(n-j)!} p_{fa}^j (1-p_{fa})^{n-j} \quad (11)$$

여러 펄스를 이진 누적(binary integration)하여 부 최적의 탐지성능을 얻고자 하는 경우, 식 (9)로부터 펄스당 요구되는 탐지확률 및 오경보율을 구하고, 이들 값에 따른 요구 SNR을 구할 수 있다.

### III. $m$ 의 최적값

$m$ 의 최적값  $m_{opt}$ 은  $P_{fa}, n, X$ , Swerling 요동 모델이 주어질 때 탐지확률  $P_d$ 를 최대화할 수 있는 값  $m$ 으로 정해진다.  $m_{opt}$ 은 평균 SNR인  $X$ 에 따라 변하며,  $X$ 는 미리 알 수가 없으므로  $m_{opt}$ 를 구하기 어렵다. Schwartz<sup>[1]</sup>와 Weiner<sup>[3]</sup>는 특정 탐지확률  $P_d$ 를 얻기위해 요구되는 SNR이  $m_{opt}$  근처의  $m$  값으로 설정되는 경우 거의 일정한 값이 됨을 제시하였다. 이러한 배경으로부터,  $m$  값이  $m_{opt}$ 에 가까운 값으로 설정된다면  $P_d$ 는  $m$  값에 따라 크게 변하지 않는 것으로

결론 지을 수 있으며, 따라서 평균 SNR인  $X$ 에 따라서도 크게 변하지 않음을 알 수 있다<sup>[7]</sup>.

요동이 없는 표적과 펄스 수  $n$ 이 작은 경우,  $m_{opt}$ 의 근사값은 식 (12)와 같이 주어지며<sup>[1]</sup>

$$m_{opt} \approx 1.5\sqrt{n} \quad (12)$$

Swerling 요동 모델 II에 대해서는 식 (13)와 같이 표현된다<sup>[7]</sup>.

$$m_{opt} \approx \alpha_0 n$$

여기서,

$$\alpha_0 = e^{-1/(1+g(n, P_{fa}))} \quad (13)$$

$$g(n, P_{fa}) = \frac{0.1991n - 0.209}{\ln(P_{fa}) + 0.19 - 0.658n + 0.5\ln(n)}$$

식 (13)은 펄스 개수  $n$ 이 큰 경우에 더욱 적합한 식이며, 식 (12)는  $n \geq 10$ 인 경우에는 신중히 검토되어야 한다<sup>[7]</sup>.

$P_d = 0.9$ ,  $P_{fa} = 10^{-6}$ 인 경우 펄스 수가 2일 때  $m_{opt}$  값은 Swerling I인 경우 2<sup>[7]</sup>이고, Schwartz[1]에 의해 주어진 식 (12)에 의해서도 2이다. 결국 펄스 수가 2인 경우 탐지확률  $P_d$ 를 최대화할 수 있는 값  $m_{opt}$ 는 2가 최적값이다. 그러나, 본 논문에서는 레이더 빔의 표적 체류시간 및 누적시간, 탐지확률등을 고려하여  $m$  값이 1로 정의된 부 최적화 이진누적기법을 적용한 레이더에서  $m=1$ 인 경우의 표적 플롯에 대한 방위각 변화량을 실험적 결과를 바탕으로 분석하여  $m=1$ 인 경우에도 추적성능이 잘 유지될 수 있는 표적 측정오차 감소 알고리즘을 소개하고, 이를 바탕으로 부 최적화상태의  $m$  값이 적용된 레이더의 추적성능을 고찰한다.

### IV. 1/2 이진누적과 2/2 이진누적

III장에서 언급한 바와 같이 펄스 수  $n$ 인 경우  $m$ 의 최적값은 2이다. 레이더에서는 일반적으로 요구 SNR에서 탐지확률을 극대화하고 거리/속도 모호성을 해결하기 위해 이진 누적기법을 많이 사용하며 여러 개의 펄스로 구성되어 위상정합 누적을 하는 버스트 단계, 여러 개의 버스트로 구성되어 비위상정합 누적으로 이진 누적을 하는 드웰 단계로 구분하여 요구 SNR 및

최소탐지신호를 정의한다.

표 1과 같이 레이더 표적 탐지관점에서 요구되는 탐지확률 및 오경보율을 0.8 및  $10^{-6}$  이라고 할 때 드웰(dwell) 단에서 요구되는 SNR은 17.85dB (Swerling I 표적 기준)이며, 버스트(burst) 단에서는 1/2 이진 누적일 경우 요구 탐지확률 및 오경보율은 0.56 및  $5 \times 10^{-7}$  가 되고 이 때 요구 SNR은 13.8dB(그림 2)로, 2/2 이진 누적일 경우 요구 SNR인 18.1dB 보다 약 4.3dB 적게 요구되어 레이더 설계시 보다 최적화가 가능하므로, 대상 레이더에서는 1/2 이진 누적을 하여 표적 탐지/추적에 적용하였다. 또한, 탐지확률 관점에서 드웰(dwell) 단계에서 탐지확률 0.8을 유지하기 위해서 버스트(burst) 단계에서는 1/2 이진누적의 경우 0.56의 탐지확률, 2/2 이진누적의 경우 0.9의 탐지확률이 요구되어 대상 레이더에서는 탐지확률이 적게 요구되는 1/2 이진누적기법을 적용하였다. 그러나 표적 추적시 2 버스트

표 1. 1/2와 2/2 이진누적시 요구 SNR  
Table 1. Required SNR in 1/2 and 2/2 binary integration.

항목	1/2 이진누적		2/2 이진누적	
	버스트 단	드웰 단	버스트 단	드웰 단
탐지확률	0.56	0.8	0.9	0.8
오경보율	$5 \times 10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	$10^{-6}$
$m/n$	1/2	-	2/2	-
요구 SNR[ <i>dB</i> ]	13.8	17.85	18.1	17.85

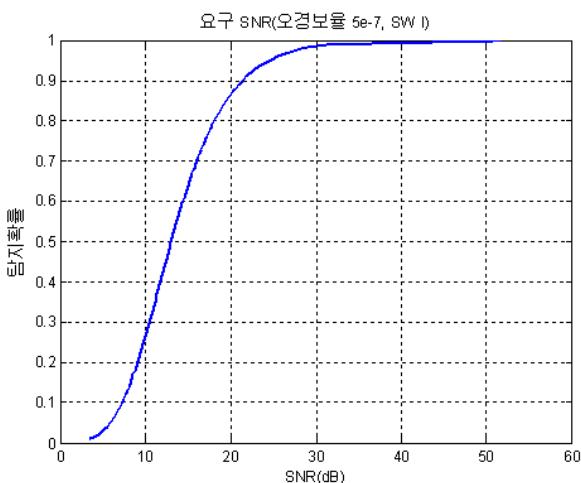


그림 2. 탐지확률에 따른 요구 SNR  
Fig. 2. Required SNR vs. probability of detection.

(burst)중 2 번 표적이 탐지되는 경우는 추적성능이 잘 유지되나, 2 버스트(burst)중 1 번 표적이 탐지되는 경우는 각도 측정 오차가 커져 추적성능이 저하되게 된다. 이 논문에서는 이렇게 2 버스트(burst)중 1 번 표적이 탐지되는 1/2 이진 누적 레이더에서, 측정된 표적 플롯을 선형화하여 각도 변화량을 감소시키므로써 표적 측정오차를 개선하였다.

### V. 실험 결과

탐색레이더에서는 표적의 정확한 위치와 속도 정보를 모두 계산하기 위하여 그림 3과 같이 여러 개의 펄스로 이루어진 버스트(burst) 단위와 여러 개의 버스트로 이루어진 드웰(dwell) 단위로 빔 운용을 하게 된다.

각 버스트 간에는 펄스반복 주파수를 약간 다르게 하여 거리와 속도의 모호성 구간이 겹치지 않게 하여서 표적의 위치 및 속도 정보를 최대한 얻을 수 있도록 설계한다. 한 빔 내에 버스트의 개수가 많을수록 거리와 방위각, 속도성분에 대한 탐지성능은 증대되지만 에너지 사용 효율면에서는 불리하다. 따라서, 적절한 버스트 개수를 선정하고 펄스반복 주파수를 설정하는 것은 시스템 전체 성능을 결정짓는 중요한 요소가 된다.

다중 빔을 사용하는 탐색레이더의 경우 전체 탐색영역(고각 및 360도의 전 방위각)에 대해서 한 빔에 주사할 수 있는 시간적 여유가 많으므로 3개 이상의 버스트를 운용하여 요구 최대탐지거리 및 추적 정확도를 얻는다. 그러나, 대상 탐색레이더의 경우 단일 빔을 사용하므로 주어진 시간 안에 전체 탐색 영역을 탐지하기 위해서는 한 빔에 많은 버스트를 사용하기에는 시간 여유가 부족하다. 따라서, 대상 레이더에서는 각 빔을 2 개의 버스트(그림 3)로 구성하여 시스템을 설계하였으며

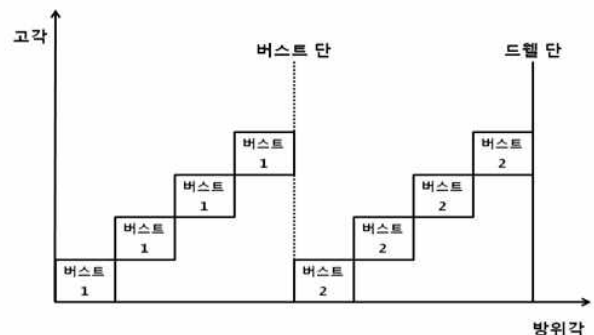


그림 3. 실험 레이더의 빔 운용 개념도  
Fig. 3. Beam scheduling concept of experimental radar.

표적 갱신율을 2초로 유지하여 표적 추적 성능 및 정확도 측면에서 적합한 성능을 입증하였다. 그림 3은 방위각과 고각 방향으로 주사되는 레이더의 빔 운용 개념도이다.

1. 적용된 추적 알고리즘 개요

레이더에서의 추적 알고리즘은 표적의 위치 정보로부터 표적의 상태변수, 즉 표적 위치, 속도, 가속도 정보를 추출하여 레이더 운용자에게 표적의 현 상태 정보를 제공하여 교전시 신속한 판단을 할 수 있도록 도와주는 중요한 역할을 한다. 본 레이더에서는 대공 표적에 대한 추적 알고리즘으로 아래와 같이 가속도 모델(Constant Acceleration)<sup>[8]</sup>을 2개 사용한 IMM(Interacting Multiple Model)<sup>[9]</sup> 알고리즘을 사용하였다.

표적 추적을 위한 시스템 방정식 및 측정치 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_k &= \Phi(M_k)X_{k-1} + \Gamma(M_k)W_{k-1}(M_k) \\
 Z_k &= H(M_k)X_k + V_k(M_k) \\
 W_{k-1} &\sim N(0, q^2) \\
 V_k &\sim N(0, r^2)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

여기서, 상태변수는 각 축별(x, y, z 축) 위치/속도/가속도를 포함하여  $X = [x \dot{x} \ddot{x} \ y \dot{y} \ddot{y} \ z \dot{z} \ddot{z}]$ 와 같이 정의되고, Z는 측정치 행렬,  $\Phi$ 와  $\Gamma, H$ 는 계수 행렬이다.  $W_{k-1}, V_k$ 는 각각 분산  $Q^2, R^2$ 을 갖는 백색 가우시안 분포의 공정 잡음과 측정 잡음이다. 본 IMM 추적 알고리즘에서 사용된 Markovian 매개변수  $M_k$ 는 공정 잡음  $W_{k-1}$ 의 분산으로서 모드별 값은  $Q^1 = 10$ 과  $Q^2 = 50$ 이다.

등가속 운동(Constant Acceleration, CA) 모델에 대하여 식 (14)는 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_k = \begin{bmatrix} I_3 & TI_3 & \frac{T^2}{2}I_3 \\ 0 & I_3 & TI_3 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} X_{k-1} + \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2}I_3 \\ TI_3 \\ I_3 \end{bmatrix} W_{k-1}
 \tag{15}$$

$$z_k = [I_3 \ 0 \ 0] X_k + V_k$$

여기서,  $I_3$ 는  $[3 \times 3]$  단위 행렬이고, T는 표적 획득 주기이다.

2. 단일 플롯(single plot)과

다중 플롯(pair plot)의 방위각 측정 오차

그림 3에서 보듯이 단일 펜슬빔을 사용하는 레이더는 버스트와 드웰 단위로 표적을 탐지하게 된다. 한 표적에 대하여 단일 플롯(single plot)은 한 버스트에서만 탐지된 결과를 말하며 다중 플롯(pair plot)은 2 버스트 이상에서 탐지된 플롯을 말한다. 각 탐지된 플롯 들에 대해서 거리 및 방위각/고각 정보는 버스트간의 클러스터링을 통해 구할 수 있다. 그러나 단일 플롯(single plot)은 방위각 연산을 위한 방위각 클러스터링 없이 해당 버스트의 방위각(빔 조향 방위각, beam pointing direction)이 플롯(plot)의 방위각이 된다. 이러한 경우에는 플롯(plot)의 방위각 정보는 실제 표적의 방위각과 큰 오차를 가질 수 있고 이로 인해 표적 추적 성능에 제한을 줄 수도 있다. 이러한 단일 플롯이 발생하는 구간에서는 등속 운동을 하는 표적이라도 그림 4와 같이 방위각 오차가 큰 궤적으로 전시기상에 나타나게 된다. 그림 4에서 True Target은 추적 레이더로부터 얻은 표적의 위치이며, Plot은 탐색 레이더로부터 얻은 표적의 플롯이다. 이렇게 방위각 오차가 큰 경우 표적의 요구 추적 정확도가 보장되지 못할 수 있으므로 이진 누적기법(binary integration)을 적용한 레이더에서 추적 정확도는 유지하면서 방위각 오차를 감소시킬 필요가 있다. 반면 2개 이상의 버스트에서 탐지된 다중 플롯은 방위각 방향으로 클러스터링을 통해 무게 중심을 구하므로

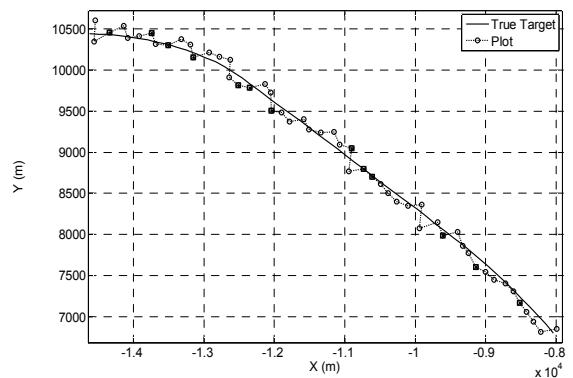


그림 4. 실험 레이더에서 탐지된 플롯 및 표적 궤적  
Fig. 4. Plot and trajectory of target detected from experimental radar.

단일 플롯보다는 플롯(plot)의 방위각 정보를 정확하게 구할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 방위각 오차가 큰 단일 플롯에 대해서 트랙(track)의 추적 성능은 유지하면서 표적 궤적에 대해 선형화하는 방법을 제시하였으며, 그림 4와 같이 실패적 시험을 통해 로깅된 데이터를 기반으로 표적 측정오차 측면과 선형화 측면에서 제시한 알고리즘의 성능을 비교하였다.

제시하고자 하는 추적 알고리즘의 전체 흐름도는 그림 5와 같다.

그림 5에 도시한 바와 같이 표적이 기존에 추적중인 트랙(track)과 연관 검사를 수행한 후, 플롯의 특성이 single이면 단일 플롯의 방위각 정보와 연관된 트랙(track)의 방위각 정보를 통해 보정하는 과정이 들어간다. 즉 부정확한 단일 플롯의 방위각 정보( $\theta_{plot}^{SINGLE}$ )와 연관된 트랙(track)의 방위각 정보( $\theta_{track}$ )에 가중치를 두어 플롯의 방위각을 재계산하는 과정이 들어간다.

만약 이러한 과정을 거치지 않으면 단일 플롯에 의한 방위각 오차가 표적이 기동한 것처럼 위치 변화를 일으키므로 추적 필터는 방위각으로 민감하게 따라가는 역효과를 가져오게 된다. 또한 불필요한 기동 궤적을 표현함으로써 표적의 위치가 선형이 아닌 방위각 변화가 큰 지그재그의 궤적을 나타낸다. 시뮬레이션에서는 단

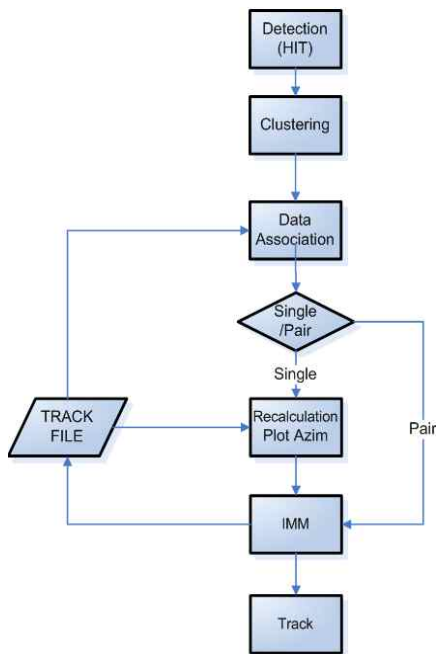


그림 5. 제시하고자 하는 추적 알고리즘의 흐름도  
Fig. 5. Flowchart of suggested algorithm.

일 플롯에 대해서 단일 플롯의 방위각과 트랙(track)의 방위각에 대해  $w_1, w_2$  각각 0.5의 동일한 가중치를 적용하였다.

$$\theta_{plot}^{New} = w_1 \cdot \theta_{plot}^{SINGLE} + w_2 \cdot \theta_{track} \tag{16}$$

$$w_1 + w_2 = 1$$

여기서,  $\theta_{plot}^{SINGLE}$  는 단일 플롯의 방위각 정보,  $\theta_{track}$  은 트랙(track)의 방위각 정보,  $\theta_{plot}^{New}$  은 새로 계산된 플롯의 방위각 정보,  $w_1, w_2$  는 각각 가중치이다.

### 3. 레이더 적응 사례 및 결과

그림 6은 2 버스트 이진누적기법을 사용하는 탐색레이더에서 탐지된 실패적 시험 데이터를 기반으로 본 논문에서 제안된 알고리즘에 의해 수행된 표적측정오차를 나타낸다. 실선은 추적레이더에 의해 획득된 실패적 추적데이터이고, 이 표적에 대한 탐색레이더의 플롯 정보는 그림 6의 범례와 같이 나타나며, 이 플롯들중 사각형 모양은 1 버스트에만 탐지된 단일 플롯 이다.

그림 6의 시뮬레이션 결과는 정상적인 IMM 출력과 단일 플롯에 대해 가중치를 적용한 IMM 출력을 동시에 나타내고 있다. 그림 6에서 보이듯이 단일 플롯에 대한 추적 결과 부분을 살펴보면, 선형의 표적 궤적에 대하여 정상적인 IMM 출력은 방위각 오차가 큰 궤적

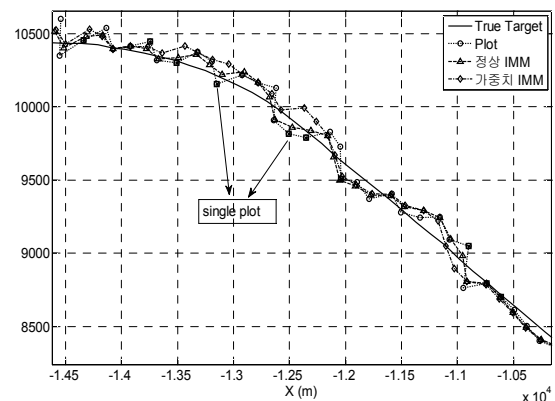


그림 6. 실패적 시험 데이터에 의한 알고리즘 수행 결과  
Fig. 6. Algorithm results performed by real target data.

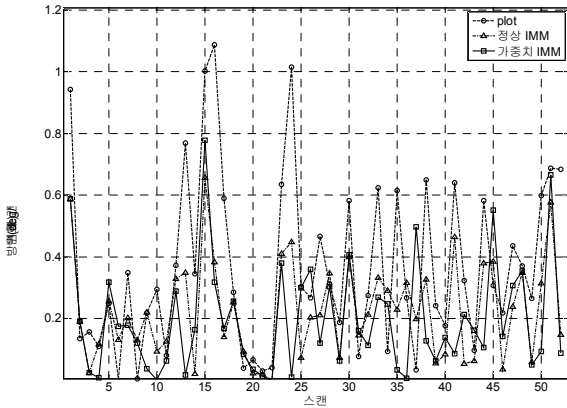


그림 7. 표적의 방위각 변화량 비교  
Fig. 7. Comparison of azimuth variation for real target.

표 2. 정상 IMM 과 가중치 IMM을 적용한 경우의 방위각 변화량

Table 2. Azimuth variation on normal IMM and weighted IMM.

	Plot	정상 IMM	가중치 IMM
평균 변화량	0.3691° (100%)	0.2261° (61.2%)	0.1969° (53.3%)

을 나타내고 있고, 가중치를 적용한 IMM 출력은 좀 더 선형에 더 가까움을 알 수 있다. 물론 다중 플롯에 대한 두 알고리즘의 추정치 결과는 거의 비슷한 결과를 가져올 수 있다. 또한 소형 표적은 한 버스트에서만 탐지될 확률이 높으므로 단일 플롯의 개수가 많아질 것으로 예상이 되며, 소형 표적일 수록 표적추정오차는 더 심해질 것으로 판단이 된다.

그림 7은 실제 레이더에서 탐지된 플롯에 대하여 정상적인 IMM 처리와 단일 플롯에 대해 가중치를 적용한 IMM 처리를 통해 얻은 추적 데이터의 스캔(안테나 1 회전)간 방위각 변화량을 나타낸다. 방위각 변화가 심하면 궤적이 방위각 오차가 큰 지그재그의 모양을 가지게 되는데, 그림 7과 같이 제안된 알고리즘을 적용하면 방위각 변화 차이가 감소함을 알 수 있다.

그림 7의 전체 스캔에 대한 스캔간 평균 방위각 변화량은 표 2와 같다. 플롯의 방위각 변화량을 100%로 할 때, 정상 IMM을 적용한 경우는 방위각 변화량이 61%로 39% 감소하였고, 가중치 IMM을 적용한 경우는 방위각 변화량이 53%로 47% 감소하였다. 전체 스캔 중 단일 플롯이 적은 상황에서도 평균 변화량은 약 8%정도 감소하여 표적 추정오차가 개선됨을 알 수 있다.

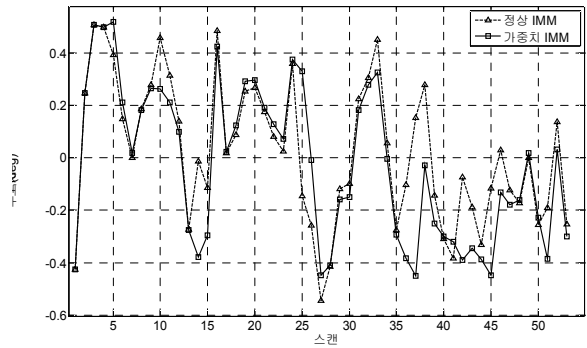


그림 8. 표적의 추적오차 비교  
Fig. 8. Comparison of tracking errors for real target.

그림 8은 실제 추적 오차 결과를 나타낸다. 그림 8에서와 같이 일부 구간에서는 제안된 알고리즘(가중치 IMM)이 추적 오차를 감소시키지만, 일부 구간에서는 추적 오차가 증가됨을 알 수 있다. 이렇게 추적오차가 증가되는 경우는 단일 플롯이 실제 표적과 근접한 위치에 형성되는 경우에 해당이 되며, 실제 표적과 다소 벗어난 경우는 제안된 알고리즘의 추적 성능이 효과적임을 알 수 있다.

결론적으로 본 논문에서 제안한 알고리즘은 단일 플롯에 대한 방위각 정보를 재계산하는 부분을 추가함으로써 등속운동을 하는 표적에 대해 추적 성능의 감소 없이 방위각 변화량이 큰 지그재그의 트랙(track) 궤적을 선형화하여 표적 추정오차를 감소시키는 효과를 가져올 수 있다.

추후 연구과제로서는 각 가중치에 따른 추적 성능 및 선형화 기여도에 대한 심층 분석이 요구되며, 또한 단일 플롯이 많이 발생하는 소형 표적에 대한 궤적에 대하여 제안된 알고리즘의 성능을 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## VI. 결 론

이진누적(binary integration) 기법은 여러 개의 펄스 반복주파수가 사용되는 레이더에서  $n$ 개 펄스중  $m$ 개 펄스가 임계치를 넘었는지를 판단하여 표적을 탐지하는데 이용되는 누적기법이다. 단일 이벤트의 발생확률이 동일하면,  $n$  번 이벤트중 발생하는  $m$  번 이벤트는 이항분포(binomial distribution)로 표현된다. 이 논문에서는  $m$ 의 최적값이 아닌 그 근사값으로 이진누적 기법을 적용한 부 최적 이진누적기법 구현시 발생하는 표적의 방

위각 변화량을 감소시킬 수 있는 표적 측정오차 감소 알고리즘을 소개하고, 그 결과를 실제 레이더의 표적 데이터를 기반으로 분석하여 그 성능이 개선됨을 검증하였다.

추후 연구과제로서는 각 가중치에 따른 추적 성능 및 선형화 기여도에 대한 심층 분석이 요구되며, 또한 단일 플롯이 많이 발생하는 소형 표적에 대한 궤적에 대하여 제안된 알고리즘의 성능을 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Schwartz, "A coincidence procedure for signal detection," *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 135-139, Dec. 1956.
- [2] R. Worley, "Optimum thresholds for binary integration," *IEEE Transactions on Information Theory*, IT-4, pp. 349-353, Mar. 1968.
- [3] M. A. Weiner, "Binary integration of fluctuating targets," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, Vol. 27, no. 1, pp. 11-17, Jan. 1991.
- [4] T. L. Frey, Jr., "An approximation for the optimum binary integration threshold for Swerling II targets," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, Vol. 32, no. 3, pp. 1181-1185, July 1996.
- [5] D. K. Barton, *Radar System Analysis and Modeling*, Norwood, MA, Artech House, ch.2, 2005.
- [6] D. O. North, "An analysis of the factors which determine signal/noise discrimination in pulsed carrier systems," *RCA Labs. Tech. Rep. PTR-6C*, June 23, 1943; reprinted in *Proc. IEEE*, Vol. 51, no. 7, pp. 1015-1027, July 1963
- [7] D. A. Shnidman, "Binary Integration for Swerling target fluctuations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, Vol. 34, no. 3, pp. 1043-1053, July 1998.
- [8] X.Rong Li and Vesselin P. Jilkov, "A Survey of Maneuvering Target Tracking : Dynamic models" in *proceedings of SPIE conference on Signal and Data Processing*, pp. 1-24, April 2000.
- [9] H. A. P. Blom, Y. Bar-Shalom, "The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients," *IEEE Trans. Automat. Contr.* Vol 33, pp. 780-783, Aug 1988.

### 저 자 소 개



남 창 호(정회원)  
1984년 중앙대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
1986년 중앙대학교 전자공학과  
석사 졸업.  
1988년~현재 국방과학연구소  
책임연구원.

<주관심분야 : 레이더, 신호처리>



최 성 희(정회원)  
1998년 한양대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
2002년 한양대학교 전자공학과  
석사 졸업.  
2002년~현재 국방과학연구소  
선임연구원.

<주관심분야 : 레이더, 추적필터, 신호처리>



나 성 응(정회원)  
1976년 서울대학교 전기공학과  
학사 졸업.  
1978년 한국과학기술원 전기 및  
전자공학과 석사 졸업.  
1992년 한국과학기술원 전기 및  
전자공학과 박사 졸업.

1988년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부  
교수.

<주관심분야 : 통신, 디지털 신호처리, 영상처리>