

진폭비교 모노펄스 레이더의 성능

Performance of Amplitude Comparison Monopulse Radar

안도진 · 이준호*

Do-Jin An · Joon-Ho Lee*

요약

추적 레이더의 주요 기능은 목표물을 자동으로 추적하는 기능이다. 추적 레이더 중 진폭비교 모노펄스 레이더의 추적 원리를 이용하여 목표물의 각도를 추정할 수 있다. 목표물의 각도를 추정할 때 발생하는 잡음을 고려하여, 각도 오차 검출을 통해 동작하는 진폭비교 모노펄스 레이더의 성능을 분석하고자 한다. 또한 Taylor 전개 기반 근사로 얻은 추정값을 이용하여 진폭비교 모노펄스 레이더의 추정 성능을 예측할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 진폭비교 모노펄스 레이더의 성능을 Mean Square Error(MSE) 오차로 정량화하여 해석한다.

Abstract

The main function of the tracking radar is to automatically track the target. The amplitude-comparison monopulse radar utilizes a monopulse radar to estimate the angular components of a target. In this paper, the operating performance of the amplitude-comparison monopulse radar is quantitatively analyzed via the MSEs, with considerations on additive noise. The performance of the amplitude comparison monopulse radar can be predicted by comparing it with an approximated estimate.

Key words: Tracking Radar, Amplitude Comparison Monopule(ACM), Mean Square Error(MSE), Taylor Expansion

I. 서론

레이더는 매우 짧은 시간 동안 임의의 물체를 향하여 안테나를 통해 전자파를 발사함으로써 물체로부터의 미약한 반사파를 발생시킨다.

레이더는 그 기능에 따라 탐색 및 추적 레이더로 크게 나눌 수 있다. 탐색 레이더는 비교적 광범위한 공간 내에 있는 표적물을 찾아내기 위하여 사용되며, 찾아낸 표적 정보는 목표물의 거리와 방위각이다. 이와 달리 추적 레이더는 예리한 안테나 빔을 이용하여 측정할 물체를 향

하여 연속적으로 빔을 방사하여 목표물의 거리, 방위각, 양각과 같은 공간위치정보를 정밀하게 알 수 있다.

추적 레이더는 안테나를 표적 방향으로 지향시키는 각도추적과 거리를 계측하는 거리추적의 두 요소가 있으며, 둘 다 bore-sight에 servo loop를 구성하여 측정을 수행한다. 추적 레이더 빔이 자동 추적 루프의 일부로써 목표물 및 그 목표물의 움직임의 응답한다는 점을 이용한다.

기존의 대다수의 논문들은 모노펄스 알고리즘을 통해 구한 목표물의 각도 추정 오차를 줄임으로써 모노펄스

「이 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 연구되었음.」

「이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2018R1D1A1B07048294)」

세종대학교 정보통신공학과(Department of Information & Communication Engineering, Sejong University)

· Manuscript received August 10, 2018 ; Revised September 11, 2018 ; Accepted November 27, 2018. (ID No. 20180810-081)

· Corresponding Author: Joon-Ho Lee (e-mail: joonhlee@sejong.ac.kr)

레이다의 성능 개선을 다루었다^{[1]-[4]}. 그러나 본 논문에서는 추적 레이다의 각도 추적을 위해 진폭비교 모노펄스 레이다를 이용하여 각도 추적 오차 발생 시 측정되는 추정값과 테일러 근사를 통해 측정한 추정 근사값을 Monte-Carlo simulation을 통해 얻은 각각의 MSE 값으로 비교하여 진폭비교 모노펄스 레이다의 성능을 분석하고자 한다.

II. 레이다에 의한 목표물 각도추적

추적 레이다의 기본 구성도는 그림 1과 같다. 송신기에서 발생한 고주파 전력을 안테나를 통해 공간에 방사한다. 안테나 빔 방향에 있는 목표물로부터 반사된 반사전력은 안테나 빔 방향과의 상대적인 위치에 따라 수신기에 들어가고, 증폭, 필터링을 통해 정규화된 형태로 각도 오차 검출회로에 입력된다.

각도 오차 검출은 안테나 빔의 중심방향과 표적위치와의 각도 오차에 비례한 오차전압과 오차의 극성을 검출하는 것이다. 이 오차신호가 안테나 빔 방향 제어회로에 보내져서 오차신호가 0이 되도록 안테나 빔 방향을 방위각, 양각에 관하여 제어한다^[5].

III. 진폭비교 모노펄스 레이다

모노펄스 레이다는 단일 펄스로 각도 오차를 검출하며 안테나 빔을 동시에 공간에 배치하여 공간 분할적으로 이용하는 방식으로, 진폭을 검출하는 진폭비교 모노펄스와 위상을 검출하는 위상비교 모노펄스 방식으로 나뉘어

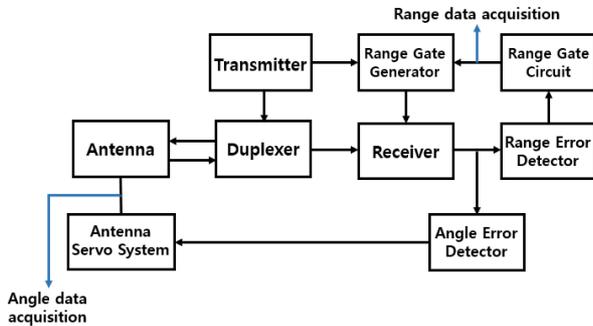


그림 1. 추적 레이다의 기본 계통도
Fig. 1. Basic scheme of tracking radar.

진다.

진폭비교 모노펄스 레이다는 2개의 안테나 빔을 중첩하여 각도 오차를 검출하며, 목표물의 각도를 추정한다. 방위각, 양각의 각각의 각도 오차를 검출하기 위해 4개의 안테나 빔이 필요하다.

기본적인 모노펄스 레이다의 빔 패턴은 2개의 안테나 빔을 중첩한 두 개(방위각과 양각 하나씩)의 차 패턴(Δ)과 4개의 안테나 빔을 중첩한 하나의 합 패턴(Σ)으로 구성된다. 레이다 송신기에서 합 패턴으로 신호를 방사하며, 수신기에서는 합 패턴(Σ)과 차 패턴(Δ)으로 신호를 수신한다. 모노펄스 추적 시스템에서 수신 시 이용된 합 패턴과 차 패턴은 수신 신호의 크기에 비례하며, 식 (1)과 같이 모노펄스 비율을 통해 안테나 bore-sight와 타겟 위치 사이의 크기와 방향의 오차를 나타낼 수 있다^[6].

$$e = \frac{\Delta}{\Sigma} \cos \theta \tag{1}$$

e 는 각 오차 전압이며, Σ 는 합 패턴의 신호의 크기, Δ 는 차 패턴의 크기, θ 는 합 패턴과 차 패턴 사이의 위상차를 나타낸다.

그림 2와 같이 추적 중심축(track axis)에서 squint angle 만큼 기울어져 있는 형태의 빔을 사용하여 신호를 수신하였을 때, 그림 3(a)는 추적 중심축(track axis)에 목표물이 위치하며, 4개의 빔에서 수신되는 펄스의 크기는 같음을 보여준다. 또한 그림 3(b)~그림 3(d)는 추적 중심축(track axis)으로부터 표적이 방위각과 양각 방향으로 (θ_{az}, θ_{el})에 있으며, 4개의 빔에서 수신되는 펄스의 크기가 다른

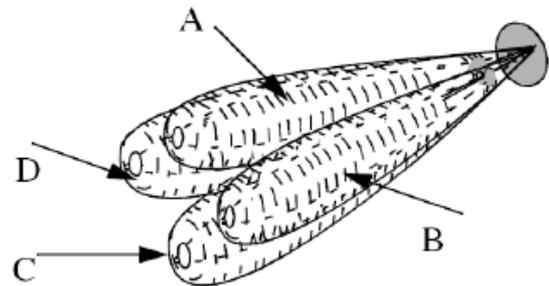


그림 2. 모노펄스 안테나 패턴^[6]
Fig. 2. Monopulse antenna pattern^[6].

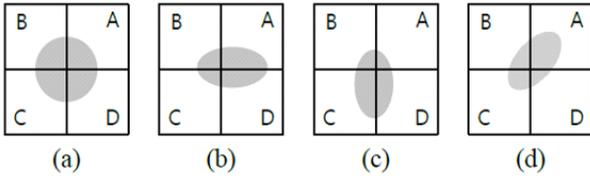


그림 3. 모노 펄스 개념의 그림^[6]
Fig. 3. Illustration of monopulse concept^[6].

원리를 이용함을 나타낸다^[7].

IV. 진폭비교 모노펄스의 각도추적

모노펄스 레이더의 각도 추적기는 그림 4와 같이 나타낼 수 있다^[7].

안테나의 빔 패턴은 가우시안 패턴으로 가정한다^[7].

$$G(\theta) = G_0 \exp \left[-2 \ln 2 (\theta / \theta_{3dB})^2 \right] \quad (2)$$

그림 5에서 목표물(목표물)에 대한 빔 A의 이득은 3 dB 빔폭이 θ_{3dB} 일 때, 다음과 같이 나타낼 수 있다. 안테나 4개의 빔이 각 사분면마다 동일하게 위치하며, 안테나 빔 A에서의 목표물의 위치는 식 (3)과 같다.

$$G(\theta_A) = G_0 \exp \left[-2 \ln 2 (\theta_A / \theta_{3dB})^2 \right] \\ = G_0 \exp \left[-2 \ln 2 \left\{ \left(\frac{\theta_S / \sqrt{2} - \theta_{ele}}{\theta_{3dB}} \right)^2 + \left(\frac{\theta_S / \sqrt{2} + \theta_{azi}}{\theta_{3dB}} \right)^2 \right\} \right] \quad (3)$$

θ_S 는 안테나의 squint angle이며, G_0 는 추적 중심축(track axis)에서의 안테나 빔의 이득(voltage gain)이고, $(\theta_{azi}, \theta_{ele})$ 는 추적 중심축(track axis)을 기준으로 목표물의 위치의

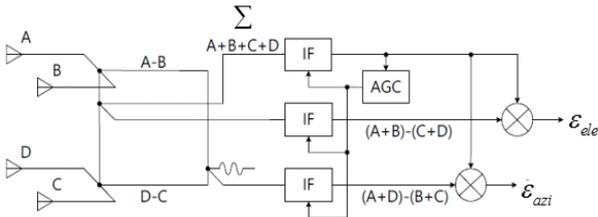


그림 4. 모노펄스 레이더의 각도 추적기 구조
Fig. 4. Monopulse radar angle tracker structure.

각도 성분값이다.

$$\theta_A^2 = \left(-\frac{\theta_S}{\sqrt{2}} - \theta_{azi} \right)^2 + \left(\frac{\theta_S}{\sqrt{2}} - \theta_{ele} \right)^2 \\ = \theta_S^2 - \sqrt{2} \theta_S (\theta_{ele} - \theta_{azi}) + \theta_{azi}^2 + \theta_{ele}^2 \quad (4)$$

목표물이 추적 중심축(track axis)에 가까울수록, 곧 정확한 추적이 이루어져 오차가 작을 때, $(\theta_{az}^2 + \theta_{el}^2 \approx 0)$

$$\theta_A^2 \approx \theta_S^2 - \sqrt{2} \theta_S (-\theta_{azi} + \theta_{ele}) \quad (5)$$

식 (5)를 통해 식 (3)에서 정의한 안테나 빔 A에서 목표물로부터 얻게 되는 voltage는 식 (6)과 같다.

$$G(\theta_A) \\ \approx G_0 \exp \left[-2 \ln 2 \left(\frac{1}{\theta_{3dB}^2} \right) \left[\theta_S^2 - \sqrt{2} (-\theta_{azi} + \theta_{ele}) \right] \right] \\ = G(\theta_S) \exp \left[2 \sqrt{2} \ln 2 \left(\frac{\theta_S}{\theta_{3dB}} \right) \left(\frac{-\theta_{azi} + \theta_{ele}}{\theta_{3dB}} \right) \right] \quad (6)$$

모노펄스 오차 기율기 계수를 $k_m = 2 \sqrt{2} \ln 2 \theta_S / \theta_{3dB}$ 으로 두고, $k_m (\theta_{ele} - \theta_{azi}) / \theta_{3dB} \ll 1$ 으로 가정하면 $G(\theta_S) = G_0$ 이므로 목표물의 위치에 따라 안테나 빔 A에서 얻은 gain을 정리하면 식 (7)과 같다^[8].

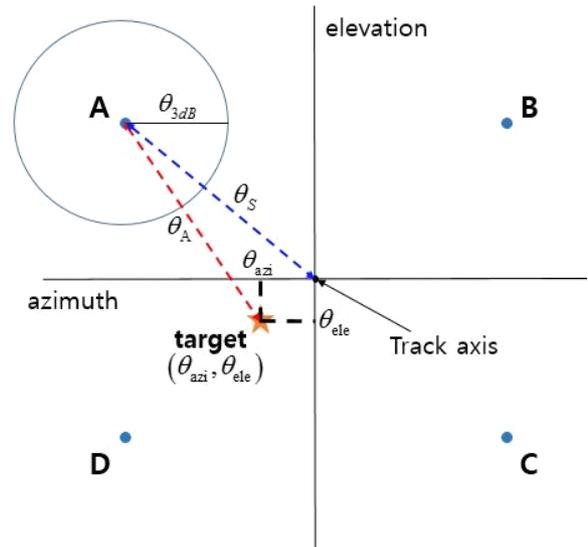


그림 5. 모노펄스 레이더 빔의 추적 중심과 각도 오차
Fig. 5. Track axis and angular error of monopulse radar beam.

$$\begin{aligned}
 G(\theta_A) &= G(\theta_{azi}, \theta_{ele}) \\
 &= G(\theta_S) \left[1 + \frac{k_m}{\theta_{3dB}} (-\theta_{azi} + \theta_{ele}) \right] \\
 &= G_0 \left[1 + \frac{k_m}{\theta_{3dB}} (-\theta_{azi} + \theta_{ele}) \right] \tag{7}
 \end{aligned}$$

식 (7)을 통해 4개의 안테나 빔의 이득(voltage gain)을 구하여 그림 4에 표현된 방위각과 양각의 차 패턴(Δ) ε_{azi} 와 ε_{ele} 을 식 (9)에 나타낸다(식 (9)에 A 는 수신신호의 크기)^[7].

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{azi} &= A [\{G(\theta_A) + G(\theta_D)\} - \{G(\theta_B) + G(\theta_C)\}] \\
 &= 4A G_0 k_m \frac{\theta_{azi}}{\theta_{3dB}} \\
 \varepsilon_{ele} &= A [\{G(\theta_A) + G(\theta_B)\} - \{G(\theta_C) + G(\theta_D)\}] \\
 &= 4A G_0 k_m \frac{\theta_{ele}}{\theta_{3dB}} \tag{8}
 \end{aligned}$$

또한, 4개의 빔의 합 패턴(Σ)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Sigma &= A [G(\theta_A) + G(\theta_B) + G(\theta_C) + G(\theta_D)] \\
 &= 4A G_0 \tag{9}
 \end{aligned}$$

식 (1)을 이용하여, 4개의 안테나 빔이 동위상면에서 안테나 이득임을 고려하면 추적 중심축(track axis)에서의 방위각 오차(ε_{azi})와 양각 오차(ε_{ele})는 다음과 같다.^[7]

$$\frac{\theta_{3dB} \varepsilon_{azi}}{k_m \Sigma} = \hat{\theta}_{azi}, \quad \frac{\theta_{3dB} \varepsilon_{ele}}{k_m \Sigma} = \hat{\theta}_{ele} \tag{10}$$

V. 근사를 통한 진폭비교 모노펄스의 각도추적

안테나 빔에 수신되는 신호의 잡음성분을 고려하여 안테나 빔의 합 패턴(Σ)과 차 패턴(Δ)을 식 (11)~식 (13)으로 나타낸다. 수신신호의 잡음은 백색잡음(zero-mean gaussian noise)으로 가정한다. 안테나 빔 A 에 들어온 잡음은 n_A 으로 표현한다. 유사하게 n_B, n_C, n_D 를 정의한다.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon'_{azi} &= A \left[\begin{aligned} &\{G(\theta_A) + n_A + G(\theta_D) + n_D\} \\ &[-\{G(\theta_B) + n_B + G(\theta_C) + n_C\}] \end{aligned} \right] \\
 &= 4A G_0 k_m \frac{\theta'_{azi}}{\theta_{3dB}} \tag{11}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon'_{ele} &= A \left[\begin{aligned} &\{G(\theta_A) + n_A + G(\theta_B) + n_B\} \\ &[-\{G(\theta_C) + n_C + G(\theta_D) + n_D\}] \end{aligned} \right] \\
 &= 4A G_0 k_m \frac{\theta'_{ele}}{\theta_{3dB}} \tag{12}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma' &= A \left[\begin{aligned} &G(\theta_A) + n_A + G(\theta_B) + n_B \\ &+ G(\theta_C) + n_C + G(\theta_D) + n_D \end{aligned} \right] \\
 &= 4A G_0 + (n_A + n_B + n_C + n_D) \tag{13}
 \end{aligned}$$

잡음의 영향에 따른 방위각 추정값($\hat{\theta}'_{azi}$)과 양각 추정값($\hat{\theta}'_{ele}$)은 식 (14)와 같다.

$$\frac{\theta_{3dB} \varepsilon'_{azi}}{k_m \Sigma'} = \hat{\theta}'_{azi}, \quad \frac{\theta_{3dB} \varepsilon'_{ele}}{k_m \Sigma'} = \hat{\theta}'_{ele} \tag{14}$$

식 (14)의 방위각 추정값($\hat{\theta}'_{azi}$)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \hat{\theta}'_{azi} &= \frac{\theta_{3dB} \varepsilon'_{azi}}{k_m \Sigma'} \\
 &= \left(\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \right) \left(\frac{4A G_0 \frac{k_m \theta_{azi}}{\theta_{3dB}} + n_A + n_D - (n_B + n_C)}{4A G_0 + n_A + n_B + n_C + n_D} \right) \tag{15}
 \end{aligned}$$

식 (15)에서 n_A, n_B, n_C, n_D 에 대한 1차 Taylor 전개를 통하여 방위각 추정값의 근사값과 양각 추정값의 근사값

$$\begin{aligned}
 \hat{\theta}'_{azi} &= \theta_{azi} + \left(\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \right) \left(\begin{aligned} &n_A \left(\frac{1 - k_m \theta_{azi} / \theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ &+ n_B \left(\frac{-1 - k_m \theta_{azi} / \theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ &+ n_C \left(\frac{-1 - k_m \theta_{azi} / \theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ &+ n_D \left(\frac{1 - k_m \theta_{azi} / \theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \end{aligned} \right) \\
 \hat{\theta}'_{ele} &= \theta_{ele} + \left(\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \right) \left(\begin{aligned} &n_A \left(\frac{1 - k_m \theta_{ele} / \theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ &+ n_B \left(\frac{-1 - k_m \theta_{ele} / \theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ &+ n_C \left(\frac{-1 - k_m \theta_{ele} / \theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ &+ n_D \left(\frac{1 - k_m \theta_{ele} / \theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \end{aligned} \right) \tag{16}
 \end{aligned}$$

을 구할 수 있다. 방위각 추정값($\hat{\theta}_{azi}$)과 양각 추정값($\hat{\theta}_{ele}$)을 테일러 전개를 통해 1차 다항함수로 근사 유도한 수식은 다음과 같다.

VI. 진폭비교 모노펄스의 성능분석

진폭비교 모노펄스 레이더는 수신 시 4개의 안테나 빔에 들어오는 반사 신호의 진폭을 비교하여 목표물의 위치를 추적하는 레이더이다. 식 (1)을 통해 설명한 모노펄스 알고리즘의 추정값을 통해 모노펄스 레이더가 목표물의 위치 추적을 시작하기에, 정확한 추정값이 모노펄스 레이더의 중요한 추적 성능이 된다. 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

식 (2)의 가우시안 패턴으로 수신된 신호의 안테나 빔의 이득(voltage gain)의 값을 통해 구한 신호의 평균전력(average power)은 식 (17)과 같다⁹⁾.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (G(\theta))^2 d\theta \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left(G_0^2 \exp \left[-\frac{4\ln 2}{\theta_{3dB}} \theta^2 \right] \right) d\theta \\ &\approx \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(G_0^2 \exp \left[-\frac{4\ln 2}{\theta_{3dB}} \theta^2 \right] \right) d\theta \\ & \quad (\theta_{3dB} \ll \pi) \\ &= \frac{1}{2\pi} G_0^2 \sqrt{\frac{\pi}{4\ln 2}} \\ &= \frac{G_0^2}{2} \sqrt{\frac{\theta_{3dB}}{4\ln 2\pi}} \end{aligned} \quad (17)$$

표 1. 시뮬레이션 환경에 대한 파라미터
Table 1. Parameters for simulation.

Description	Value	Units
Monte-Carlo simulation	10,000	Times
The standard deviation of the noise received at antenna A, B, C, D	$10^{-1}, 10^{-0.9}, \dots, 10^{-0.4}$	Degrees
Antenna 3 dB beamwidth	3	Degrees
Track axis gain	1	Voltage
Antenna squint angle	1	Degrees
Gain of received signal	1	Voltage

또한 수신 신호의 잡음전력은 표 1에서 나타낸 안테나 별 수신된 잡음 표준편차의 제곱인 분산으로 계산하였다.

식 (2)에서 구한 안테나 빔의 이득(voltage gain)과 목표물의 위치가 추적 중심축(track axis)에 비교적 가까운 상황을 고려하여 근사한 식 (7)로 구한 안테나 빔의 이득(voltage gain)을 식 (18)에서 각각의 참값과의 차이로 구한 추정 오차값으로 비교하고자 한다.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{azi} - \theta_{azi} &= \theta_{error}, \quad \left(\frac{\theta_{3dB} \varepsilon_{azi}}{k_m \Sigma} = \hat{\theta}_{azi} \right) \\ \hat{\theta}_{ele} - \theta_{ele} &= \theta_{error}, \quad \left(\frac{\theta_{3dB} \varepsilon_{ele}}{k_m \Sigma} = \hat{\theta}_{ele} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

식 (2)와 식 (7)로 구한 안테나 빔의 이득(voltage gain)을 통해 각각의 방위각 오차(ε'_{azi}), 양각 오차(ε'_{ele})로 표현된 식 (18) 형태의 추정 오차값은 각각 식 (19), 식 (20)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}'_{azi} - \theta_{azi} &= \left(\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \right) \left(\frac{\left(e^{\left(\frac{\theta_A}{\theta_{3dB}} \right)^2} + e^{\left(\frac{\theta_D}{\theta_{3dB}} \right)^2} \right) + (n_A + n_D)}{\left(e^{\left(\frac{\theta_B}{\theta_{3dB}} \right)^2} + e^{\left(\frac{\theta_C}{\theta_{3dB}} \right)^2} \right) + (n_B + n_C)} \right) - \theta_{azi} \\ \hat{\theta}'_{ele} - \theta_{ele} &= \left(\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \right) \left(\frac{\left(e^{\left(\frac{\theta_A}{\theta_{3dB}} \right)^2} + e^{\left(\frac{\theta_B}{\theta_{3dB}} \right)^2} \right) + (n_A + n_B)}{\left(e^{\left(\frac{\theta_C}{\theta_{3dB}} \right)^2} + e^{\left(\frac{\theta_D}{\theta_{3dB}} \right)^2} \right) + (n_C + n_D)} \right) - \theta_{ele} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \hat{\theta}'_{azi} - \theta_{azi} &= \left(\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \right) \left(\frac{4A G_0 \frac{k_m \theta_{az}}{\theta_{3dB}} + n_A + n_D - (n_B + n_C)}{4A G_0 + n_A + n_B + n_C + n_D} \right) - \theta_{azi} \\ \hat{\theta}'_{ele} - \theta_{ele} &= \left(\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \right) \left(\frac{4A G_0 \frac{k_m \theta_{az}}{\theta_{3dB}} + n_A + n_B - (n_C + n_D)}{4A G_0 + n_A + n_B + n_C + n_D} \right) - \theta_{ele} \end{aligned} \quad (20)$$

또한 테일러 전개를 통해 얻은 추정값과 참값의 차이로 구한 추정 오차값은 다음과 같다.

$$\hat{\theta}'_{azi} - \theta_{azi} = \left(\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \right) \left(\begin{array}{l} n_A \left(\frac{1 - k_m \theta_{azi}/\theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ + n_B \left(\frac{-1 - k_m \theta_{azi}/\theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ + n_C \left(\frac{-1 - k_m \theta_{azi}/\theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ + n_D \left(\frac{1 - k_m \theta_{azi}/\theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \end{array} \right)$$

$$\hat{\theta}'_{ele} - \theta_{ele} = \left(\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \right) \left(\begin{array}{l} n_A \left(\frac{1 - k_m \theta_{ele}/\theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ + n_B \left(\frac{-1 - k_m \theta_{ele}/\theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ + n_C \left(\frac{-1 - k_m \theta_{ele}/\theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \\ + n_D \left(\frac{1 - k_m \theta_{ele}/\theta_{3dB}}{4A G_0} \right) \end{array} \right) \quad (21)$$

식 (19)~식 (21)에서 표현된 추정 오차의 비교를 위해 MSE 값으로 정량화한다. 그림 6에서 각 추정 오차의 MSE 값이 나타난다.

표 1의 시뮬레이션 조건을 반영한 그림 6은 식 (2)와 목표물 위치를 고려하여 안테나 빔의 이득(voltage gain)을 근사하여 구한 식 (7)과 테일러 전개를 통해 잡음 성분을 근사하여 추정 오차를 계산한 식 (16)의 각각의 MSE 값을 나타낸다. 수신신호에 SNR에 따라 변하는 MSE 값을 통해 수식 (19)~식 (21)에 따라 유도된 안테나 빔의 성능을 파악할 수 있다.

그림 6에서 표현된 MSE 그래프로 안테나 빔의 이득(voltage gain)식으로 얻게 되는 각도 추정의 오차값을 확인할 수 있다. 식 (2)와 식 (7)을 비교하여 MSE 그래프가 목표물이 모노펄스 레이더 안테나 빔의 합 패턴 중심(추적 중심축(track axis))에 가까울수록 더 낮은 MSE 값을 가짐을 보이므로 더 정밀한 추적 성능을 가짐을 파악할 수 있다. 또한 식 (20)과 잡음성분을 테일러 전개로 근사 유도한 식 (21)을 비교하여, Monte-Carlo simulation으로 얻은 추정값의 MSE 값과 추정근사값의 MSE 값이 비슷함

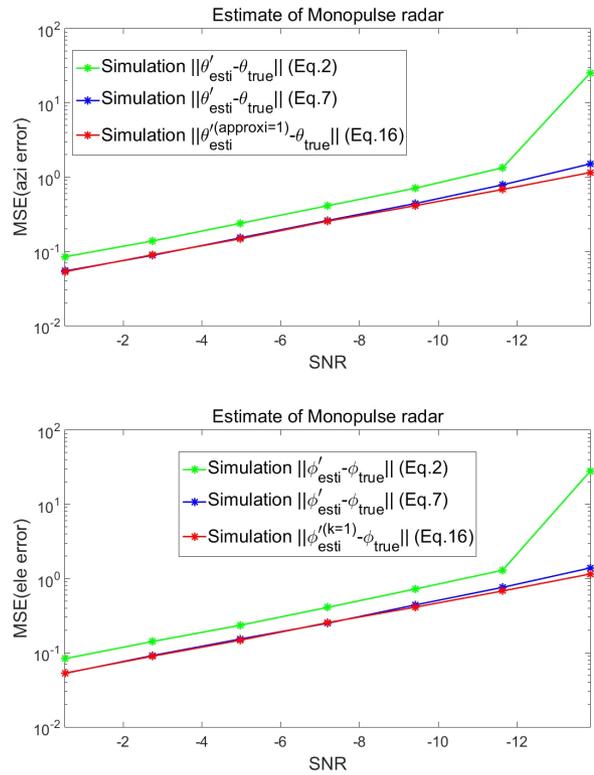


그림 6. 진폭비교 모노펄스 레이더의 성능
Fig. 6. Performance of amplitude comparison monopulse radar.

을 그림 6을 통해 확인하였다.

Ⅶ. 결 론

추적 레이더는 탐지 레이더로부터 목표물의 위치, 이동방향 정보를 얻어 움직이는 목표물을 추적하기 때문에 정확한 추적 성능이 요구된다. 특히, 추적 레이더가 위협체로 함정을 목표물로 인식하고 추적하는 경우 더욱 정확한 추적 성능은 필수적이다.

본 논문에서는 수신신호의 단일 펄스를 통해 각도의 오차를 검출하는 모노펄스 레이더를 사용했다. 4개의 안테나로부터 수신되는 신호가 동일한 위상과 상이한 진폭을 가진다고 가정하여 진폭비교 모노펄스 레이더의 추적 성능을 분석했다. 궁극적으로 수치근사를 통해 진폭비교 모노펄스 각도추정 성능을 예측할 수 있다. 또한 본 논문의 결과는 모노펄스 각도추정의 해석적 MSE 값에 이용될 수 있다.

References

[1] S. Song, "Performance analysis angle tracking using adaptive Kalman filter in monopulse radar," M.S. thesis, Jeju University, Jeju, Korea, 2017.

[2] 최재인, 김승우, 진희철, 최우혁, "전자전장비의 방향 탐지 오차 개선에 관한 연구," 한국산학기술학회논문지, 18(6), pp. 567-575, 2017년 6월.

[3] H. K. Sim, M. A. Jung, and S. C. Kim, "A performance analysis of phase comparison monopulse algorithm for antenna spacing and antenna array," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 40, no. 7, pp. 1413-1419, 2015.

[4] 조병래, 이정수, 이종민, 선선구, "위상 비교 모노 펄스 알고리즘에서 위상평균법을 이용한 추정 각도 정확도 향상," 한국전자파학회논문지, 23(10), pp. 1212-1215, 2012년 10월.

[5] 강정수, *레이더 공학*, 서울, 보성문화사, 1997년 1월.

[6] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab*, 3rd ed. CRC Press, 2016, pp. 639-647.

[7] 한영진, 김진우, 박소령, 노상욱, "전자전 송수신 시뮬레이터를 활용한 모노펄스 레이더 특성 분석," 2017년도 한국통신학회 동계종합학술발표회 논문집, 2017년 1월, pp. 705-706.

[8] A. Golden Jr., *Radar Electronic Warfare*, Reston, VA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988, pp. 211-215.

[9] M. R Spiegel, *Mathematical Handbook of Formulas and Tables*, New York, McGraw-Hill, 1968, p. 98.

안 도 진 [세종대학교/석사과정]



2017년 2월: 세종대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2017년 3월~현재: 세종대학교 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 레이더 신호처리

이 준 호 [세종대학교/교수]



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 2004년 3월~현재: 세종대학교 정보통신공학과 교수

[주 관심분야] Signal Processing (Radar Signal Processing, Array Signal Processing), Smart Antenna