

진폭비교 모노펄스시스템의 수치적분 기반 성능분석

함형우¹, 임희윤², 이준호^{1*}

¹세종대학교 정보통신학과, ²세종대학교 전자정보통신공학과

Numerical Integration-based Performance Analysis of Amplitude-Comparison Monopulse System

Hyeong-Woo Ham¹, Hee-Yun Lim², Joon-Ho Lee^{1*}

¹Department of Information and Communication Engineering, Sejong University

²Electrical Engineering, Sejong University

요약 본 논문에서는 부가성 잡음이 존재하는 환경에서 진폭비교 모노펄스 레이더의 각도 추정 성능을 수치해석 기반으로 접근하여 분석한다. 편향 빔에 서로 상관 없는 백색잡음이 추가되었을 때, 모노펄스 레이더의 각도 추정 성능을 평균제곱오차(MSE)를 통해 분석한다. 수치적분 기반의 평균제곱오차 결과는 몬테카를로 기반의 평균제곱오차 결과와 완벽히 겹치는 결과를 보이며 이는 몬테카를로 기반 평균제곱오차 결과에 99.8%에 해당한다. 또한 연산시간 측면에서 수치적분 기반의 평균제곱오차 분석법은 몬테카를로 기반의 평균제곱오차보다 매우 빠른 결과를 보인다. 따라서 제안된 수치적분 기반 평균제곱오차 방법을 통해 다양한 잡음환경에서 진폭비교 모노펄스레이더의 각도 추정 성능을 효율적으로 분석할 수 있다.

주제어 : 추적레이더, 진폭비교 모노펄스 레이더, 평균제곱오차(MSE), 수치해석, 몬테카를로 방법

Abstract In this paper, estimation angle performance analysis of amplitude-comparison monopulse radar under additive noise effect is dealt with. When uncorrelated white noises are added to the squinted beams, the angle estimation performance is analyzed through the mean square error(MSE). The numerical integration-based mean square error result completely overlaps the Monte Carlo-based mean square error result, which corresponds to 99.8% of the Monte Carlo-based mean square error result. In addition, the mean square error analysis method based on numerical integration has a much faster operation time than the mean square error method based on Monte Carlo. the angle estimation performance of the amplitude comparison monopulse radar can be efficiently analyzed in various noise environments through the proposed numerical integration-based mean square error method.

Key Words : tracking radar, amplitude-comparison monopulse radar, mean square error(MSE), numerical analysis, Monte-Carlo method

*The authors gratefully acknowledge the support from ElectronicWarfare Research Center at Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), originally funded by Defense Acquisition Program Administration (DAPA) and Agency for Defense Development (ADD).

*Corresponding Author : Joon-Ho Lee(joonhlee@sejong.ac.kr)

Received October 13, 2021

Accepted December 20, 2021

Revised November 14, 2021

Published December 28, 2021

1. 서론

추적 레이더는 목표물의 거리, 각도 및 속도를 측정하면서 대상을 추적한다. 목표물의 각도는 안테나 구동축의 리졸버(Resolver) 센서를 통해 산출한다. 레이더의 목표물 추적 기능은 안테나를 통해 측정된 추적 각도 오차를 안테나의 지시 방향을 제어하는 폐회로 서보 시스템에 입력하여 추적한다. 일반적으로 모노펄스 시스템을 통해 추적 각도 오차를 산출한다. 진폭비교 모노펄스(Amplitude-Comparison Monopulse : ACM) 시스템은 단 하나의 펄스(monopulse)를 이용해 한 주기마다 목표물의 추적 각도 오차를 정밀하게 측정 가능하다. 진폭비교 모노펄스 시스템은 다중 편향 빔(Squinted beam)을 통해 목표물 반사 RF 신호 전압을 수신한다 [1]. 4개의 편향 빔을 통해 수신한 신호는 차이 채널과 합 채널에 입력되며, 채널의 출력 비율을 통해 추적 오차 전압을 구한다[2,3]. 이러한 추적 오차 전압을 통해 안테나 위치 제어 서보 모터는 방위각 추적 오차와 고각 추적 오차가 0이 되도록 제어된다[4,5].

본 논문에서는 수치 적분 접근방식을 통해 가우시안 잡음이 존재하는 환경에서 ACM 레이더의 추적 각도 오차의 MSE 유도를 다룬다. 수치 적분을 이용한 MSE의 정확도는 이전 연구[6,7]에서 제안한 2차 테일러 전개 기반의 해석적 MSE에 비해 상당히 향상되었으며, MSE는 다양한 잡음에 대한 해석적 MSE보다 매우 정밀하게 계산된다. 수치 적분을 통해 얻은 ACM 추정 각의 MSE는 원래의 모노펄스 알고리즘의 몬테카를로(Monte-Carlo) 방법을 통한 경험적 MSE와 정확하게 동일하다. 또한, 몬테카를로 방법 기반 시뮬레이션 MSE보다 수치적분 기반 MSE가 계산 복잡성이 낮다는 결론을 도출한다.

2. 본론

2.1 잡음을 고려한 ACM레이더의 추정각도

모노펄스 레이더는 하나의 펄스로 목표물의 각도를 정밀하게 측정할 수 있다. 본 논문에서는 4개의 피드 혼(feed-horn)과 3개의 채널을 가진 진폭비교 모노펄스 레이더를 사용한다. Fig. 1은 4개의 편향 각도를 가진 모노펄스 레이더를 보여준다[4]. 채널들은 방위각 차이 채널과 고각 차이 채널, 합 채널로 구성되어있다. ACM 레이더는 편향된 빔들을 이용하여 입사 신호를 수신한다.

입사된 신호 진폭들은 각각 합 채널과 차이 채널들로 입력되며, 수신기의 비교기(comparator)와 검파기(detector)를 통해 추적 오차들을 산출한다.

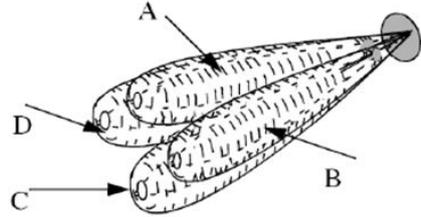


Fig. 1. ACM radar with four squinted beams

Fig. 2와 고각 추적 오차와 방위각 추적 오차를 얻기 위한 비교기 구성을 보여준다[4]. 이러한 추적 오차는 안테나가 움직이는 목표물을 추적하기 위한 폐회로 서보 시스템에 입력된다.

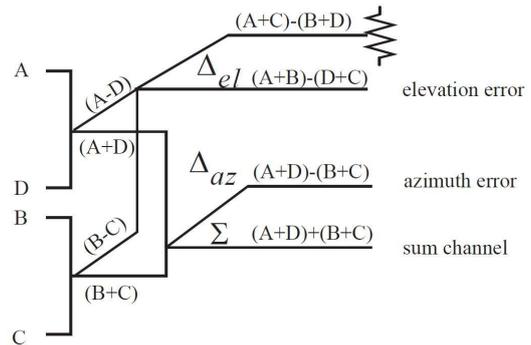


Fig. 2. Monopulse comparator

Fig 3은 모노펄스 레이더 추적 중심축(Track axis)으로부터 목표물에 대한 각도 오차를 나타낸다. 추적 중심축은 목표물을 추적하기 위한 중심축을 의미한다. 4개의 편향된 빔들은 동일한 편향 각을 가지고 있다. 방위각 추적오차와 고각 추적오차는 θ_{azi} , θ_{ele} 로 주어진다.

식 (1)에서, 추적 각도 오차들은 차이 채널들과 합 채널의 신호 비를 통해서 얻어진다.

$$v_{error} = \frac{|\Delta|}{|\Sigma|} \cos\beta \tag{1}$$

β 는 Δ 패턴과 Σ 패턴의 위상 차이를 의미하며, v_{error} 는 각도 오차 전압이다. v_{error} 의 결과로 모노펄스 시스템의 추적 각도 오차를 산출할 수 있다.

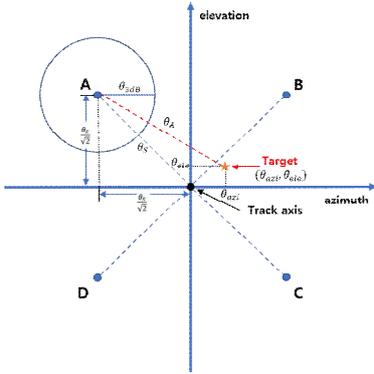


Fig. 3. Track axis and angle error of monopulse radar

모노펄스 레이더의 빔 패턴이 가우시안 패턴일 때 이득은 다음과 같다[8,9].

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

여기서 θ 는 하나의 편향 빔 기준에서 목표물의 각도이고, θ_{3dB} 은 편향 빔의 3dB 빔폭, G_0 는 하나의 편향 빔의 boresight 방향 이득을 의미한다.

Fig 3을 참고하여 나머지 $\theta_A, \theta_B, \theta_C, \theta_D$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_A &= \sqrt{\left(\frac{\theta_s}{\sqrt{2}} + \theta_{azi}\right)^2 + \left(\frac{\theta_s}{\sqrt{2}} - \theta_{ele}\right)^2} \\ \theta_B &= \sqrt{\left(\frac{\theta_s}{\sqrt{2}} - \theta_{azi}\right)^2 + \left(\frac{\theta_s}{\sqrt{2}} - \theta_{ele}\right)^2} \\ \theta_C &= \sqrt{\left(\frac{\theta_s}{\sqrt{2}} - \theta_{azi}\right)^2 + \left(\frac{\theta_s}{\sqrt{2}} + \theta_{ele}\right)^2} \\ \theta_D &= \sqrt{\left(\frac{\theta_s}{\sqrt{2}} + \theta_{azi}\right)^2 + \left(\frac{\theta_s}{\sqrt{2}} + \theta_{ele}\right)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 θ_s 는 편향 각이다.

식 (4)-(6)은 각각 방위각 차이 패턴과 고각 차이 패턴, 합 패턴식이다. Fig. 2을 보면, 방위각 차이 패턴은 (A+D)-(B+C)을 통해서 얻어지고, 고각 차이 패턴은 (A+B)-(D+C)을 통해서 얻어진다. 여기서 A, B, C, D는 4개의 빔을 통해 수신한 신호의 전압을 의미한다.

$$\Delta_{azi} = AG(\theta_A) + AG(\theta_D) - (AG(\theta_B) + AG(\theta_C)) \quad (4)$$

$$\Delta_{ele} = AG(\theta_A) + AG(\theta_B) - (AG(\theta_C) + AG(\theta_D)) \quad (5)$$

$$\Sigma = A [G(\theta_A) + G(\theta_B) + G(\theta_C) + G(\theta_D)] \quad (6)$$

여기서 식 (4)-(6)은 A 입사신호의 전압 진폭을 의미한다. 입사 신호의 크기는 안테나가 지시하는 방향에 따라서 바뀌게 된다. 그러므로 실제 안테나로 입사되는 신호는 수신 이득과 곱해져서 안테나의 수신전압을 산출한다.

일반적으로 수신신호에는 외부 근원에 의한 간섭 및 잡음이 존재한다[10]. 따라서 본 논문에서는 측정 잡음들이 4개의 수신 빔 신호에 목표물 반사 신호와 함께 추가되었다고 가정한다. 식 (7)은 잡음들의 특성을 나타낸다[11].

$$\begin{aligned} n_A &\sim N(0, \sigma_A^2), \\ n_B &\sim N(0, \sigma_B^2), \\ n_C &\sim N(0, \sigma_C^2), \\ n_D &\sim N(0, \sigma_D^2). \end{aligned} \quad (7)$$

모든 잡음들은 평균이 0인 가우시안 랜덤 변수이고, 각각 $\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D$ 의 표준편차를 갖는다고 가정한다. 따라서 잡음이 추가된 채널들의 신호는 다음과 같다 [6].

$$\Delta'_{azi} = (AG(\theta_A) + n_A + AG(\theta_D) + n_D) - (AG(\theta_B) + n_B + AG(\theta_C) + n_C), \quad (8)$$

$$\Delta'_{ele} = (AG(\theta_A) + n_A + AG(\theta_B) + n_B) - (AG(\theta_C) + n_C + AG(\theta_D) + n_D), \quad (9)$$

$$\Sigma' = AG(\theta_A) + n_A + AG(\theta_B) + n_B + AG(\theta_C) + n_C + AG(\theta_D) + n_D \quad (10)$$

식 (7)의 잡음들은 서로 상관이 없다고 가정할 때, 잡음들은 가우시안 랜덤 변수의 합으로 표현하여 보조 변수로 치환할 수 있다. 이는 방위각 차이 패턴과 고각 차이 패턴, 합 패턴에 각각 적용된다.

$$\begin{aligned} n_{azi} &= n_A + n_D - n_B - n_C, \\ n_{ele} &= n_A + n_B - n_C - n_D, \end{aligned} \quad (11)$$

$$n_{sum} = n_A + n_B + n_C + n_D,$$

여기서 $n_{azi}, n_{ele}, n_{sum}$ 은 각 채널 잡음들의 합을 보조 랜덤 변수들로 치환한 것을 의미한다.

따라서 n_{azi} 와 n_{ele} , n_{sum} 의 평균과 분산은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_{azi} &= \mu_A + \mu_D - \mu_B - \mu_C \\ \mu_{ele} &= \mu_A + \mu_B - \mu_C - \mu_D \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mu_{sum} &= \mu_A + \mu_B + \mu_C + \mu_D \\ \sigma_{azi}^2 &= \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_C^2 + \sigma_D^2 \\ \sigma_{ele}^2 &= \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_C^2 + \sigma_D^2 \\ \sigma_{sum}^2 &= \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_C^2 + \sigma_D^2 \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 n_{azi} , n_{ele} , n_{sum} 은 다음과 같이 정규분포형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} n_{azi} &\sim N(0, \sigma_{azi}^2), \\ n_{ele} &\sim N(0, \sigma_{ele}^2), \\ n_{sum} &\sim N(0, \sigma_{sum}^2) \end{aligned} \quad (14)$$

식 (8)–(10)은 식 (11)을 이용하여 정리되어진다.

$$\Delta'_{azi} = A[G(\theta_A) + G(\theta_D) - G(\theta_B) - G(\theta_C)] + n_{azi}, \quad (15)$$

$$\Delta'_{ele} = A[G(\theta_A) + G(\theta_B) - G(\theta_C) - G(\theta_D)] + n_{ele}, \quad (16)$$

$$\Sigma' = A[G(\theta_A) + G(\theta_B) - G(\theta_C) - G(\theta_D)] + n_{sum} \quad (17)$$

식 (18)과 식 (19)는 모노펄스 알고리즘의 추정 각도 식이다.

$$\hat{\theta} = \frac{\theta_{3dB} \Delta_{azi}}{k_m \Sigma} \quad (18)$$

$$\hat{\phi} = \frac{\theta_{3dB} \Delta_{ele}}{k_m \Sigma} \quad (19)$$

여기서 $\hat{\theta}$ 과 $\hat{\phi}$ 은 각각 추정 방위각과 추정 고각을 의미하고, k_m 은 모노펄스 오차 기율기 상수를 의미한다. 식 (15)–(17)을 이용하여 정리하면 잡음을 고려한 추정각도 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\theta} = \frac{\theta_{3dB} \Delta'_{azi}}{k_m \Sigma'} = \frac{\theta_{3dB}}{k_m} \left(\frac{\Delta_{azi} + n_{azi}}{\Sigma + n_{sum}} \right), \quad (20)$$

$$\hat{\phi} = \frac{\theta_{3dB} \Delta'_{ele}}{k_m \Sigma'} = \frac{\theta_{3dB}}{k_m} \left(\frac{\Delta_{ele} + n_{ele}}{\Sigma + n_{sum}} \right), \quad (21)$$

2.2 추정 각도의 MSE 유도

평균제곱오차 (Mean Square Error : MSE)는 정확도를 측정하는 척도이다. 추정 방위각과 추정 고각의 MSE는 다음과 같이 정의된다[12].

$$\begin{aligned} \text{MSE}_{(azi)} &= E[(\hat{\theta} - \theta)^2], \\ \text{MSE}_{(ele)} &= E[(\hat{\phi} - \phi)^2], \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 θ 와 ϕ 는 실제 각도를 의미한다.

본 논문에서는 몬테카를로 기반의 ‘Simulation MSE’와 수치적분을 이용한 ‘Integral MSE’를 유도한다.

2.2.1 수치해석기반 MSE

연속함수의 기댓값연산을 취하면 적분을 수행하게 된다. 이러한 적분 연산은 매트랩(MATLAB)의 수치적분함수를 이용한다. 식 (20)–(21)을 보면 피적분 변수가 2개 있으므로 이중 적분형태로 보인다. 이에 잡음을 고려한 추정 각도 수식의 MSE는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Integral MSE}_{azi} : E[(\hat{\theta} - \theta)^2] &= \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \left(\frac{\Delta_{azi} + n_{azi}}{\Sigma + n_{sum}} \right) - \theta \right]^2 f_{azi} f_{sum} dn_{azi} dn_{sum} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{Integral MSE}_{ele} : E[(\hat{\phi} - \phi)^2] &= \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \left(\frac{\Delta_{ele} + n_{ele}}{\Sigma + n_{sum}} \right) - \phi \right]^2 f_{ele} f_{sum} dn_{ele} dn_{sum} \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 f_{azi} , f_{sum} 은 각각 n_{azi} 와 n_{sum} 의 랜덤 변수의 PDF이다.

일반적으로 두 랜덤 변수가 존재하는 함수의 PDF는 결합 PDF로 정의된다. 하지만 n_{azi} , n_{ele} , n_{sum} 은 zero-mean 가우시안 랜덤 변수이고 분산이 동일하다고 가정하면 서로 상관이 없기 때문에 결합 PDF는 두 개의 PDF로 분리되어진다. f_{azi} , f_{sum} 는 다음과 같다[13].

$$f_{azi} = \frac{1}{\sigma_{azi} \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-n_{azi}^2}{2\sigma_{azi}^2}\right), \quad (25)$$

$$f_{ele} = \frac{1}{\sigma_{ele} \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-n_{ele}^2}{2\sigma_{ele}^2}\right), \quad (26)$$

$$f_{sum} = \frac{1}{\sigma_{sum} \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-n_{sum}^2}{2\sigma_{sum}^2}\right), \quad (27)$$

맷랩(MATLAB)을 이용해서 식 (23)과 (24)의 연산을 수행할 때, 실제로 적분 구간을 무한으로 하지 않고 잡음 표준편차의 몇 배에 해당하도록 적분 범위를 설정한다.

2.2.2 몬테카를로 기반의 경험적 MSE

몬테카를로 기반의 Simulation MSE는 원래의 모노펄스 추정 각도 수식의 수 많은 반복계산을 통해서 경험적으로 MSE를 산출한다. 이 방법은 반복횟수가 증가할수록 정밀해진다. Simulation MSE는 다음과 같다[12].

Simulation MSE_(azi) :

$$E[(\hat{\theta} - \theta)^2] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\theta}_{(i)} - \theta)^2, \quad (28)$$

Simulation MSE_(ele) :

$$E[(\hat{\phi} - \phi)^2] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\phi}_{(i)} - \phi)^2, \quad (29)$$

여기서 N 은 반복회수를 의미한다.

2.3 시뮬레이션 변수 설정

실험에 사용한 모노펄스 안테나는 4분할 피드혼(Feed-Horn)을 가진 모노스태틱(monostatic) 레이더이며, 편향 각은 3-dB 빔폭의 0.44배로 설정하였다. RF 감쇠 효과는 거리에 따른 Path loss 효과만 적용되었으며, 표적의 변동모델과 side-lobe의 영향은 고려하지 않았다. 또한 목표물과 레이더는 고정되어있다고 가정한다.

Table 1. Simulation parameters

Description	Value	Units
Diameter of one antenna element	0.2	m
Frequency	11	GHz
Antenna efficiency	60	%
Antenna impedance	50	Ω
Antenna 3-dB beamwidth (θ_{3dB})	9.53	degrees
Antenna squint angle (θ_s)	4.19	degrees
Target azimuth (θ)	0.5	degrees
Target elevation (ϕ)	0.5	degrees
Effective radiated power	11.1	MW
Target distance	6000	m
Target RCS	30	m^2
Incident receive signal amplitude (A)	2.19	μV
Boresight gain of one beam (G_0)	126	V/V

3. 결과

이 절에서는 2.2절에서 언급한 MSE 식을 사용하여 ACM의 레이더의 성능분석을 다룬다. 몇몇의 잡음 표준편차를 고려하여 성능분석을 진행하였으며, 목표물 반사 수신 신호에 잡음성분을 추가하였다. 또한 4개의 수신 빔을 통해 수신하는 잡음들은 서로 동일한 표준편차를 가진다고 가정한다. Fig 4에서 ‘Simulation $E[(\theta' - \theta)^2]$ ’ 범례의 결과들은 식 (28)으로부터 얻어지고, ‘Integral $E[(\theta' - \theta)^2]$ ’ 범례의 결과들은 식 (23)으로부터 얻어진다. 또한 Fig 5.에서 ‘Simulation $E[(\phi' - \phi)^2]$ ’ 범례의 결과들은 식 (29)으로부터 얻어지고 ‘Integral $E[(\phi' - \phi)^2]$ ’ 범례의 결과들은 식 (24)으로부터 얻어진다.

Table 2 에서 잡음 영향이 낮은 환경을 고려한 실험 변수를 정리하였다. 4개의 잡음 변수들은 0의 평균을 가지고 동일한 표준편차(σ)를 가진다. 이중 적분의 범위는 동일하게 $-4\sigma \sim 4\sigma$ 로 설정하였다.

Table 2. Noise parameter and simulation setting

Description	Value	Units
Mean of the received noises at beam A,B,C,D	0	V
Standard deviations of the received noises (σ)	1.00, 1.12, 1.26, 1.41, 1.59	μV
Monte-Carlo simulation	1,000,000	times
Integration Range	-4σ to 4σ	

추정 방위각 MSE에 대한 그림인 Fig. 4를 보면 Simulation MSE의 결과와 Integral MSE가 거의 완벽하게 겹치는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 추정 고각 MSE에 대한 그림인 Fig. 5의 결과에서도 Simulation MSE의 결과와 Integral MSE의 결과가 완벽하게 겹치는 것을 확인할 수 있다.

해당 결과들에서 Simulation MSE를 기준으로 했을 때 Integral MSE는 Simulation MSE와 평균적으로 99.8% 유사한 결과가 보이는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 본 논문에서 제안한 Integral MSE는 Simulation MSE와 동일한 MSE 산출 결과를 보임을 확인하였다.

또한 Fig 4와 Fig 5를 볼 때, 낮은 잡음영향 환경에서 실험을 진행하였으므로 추정 각도의 MSE는 10^{-7} 단위로 매우 정밀한 결과가 나타나는 것을 확인하였으며, 같은 잡음 표준편차와 동일한 방위각 잡값 및 고각 잡값을 사용하였으므로 결과에서 거의 동일한 양상을 보인다.

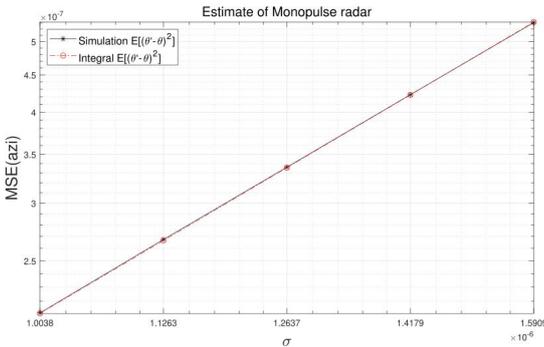


Fig. 4. Azimuth MSEs for standard deviation

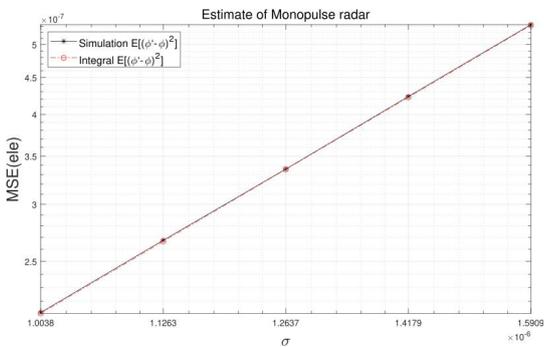


Fig. 5. Elevation MSEs for standard deviation

두 MSE 분석법을 수행한 환경은 동일하며 연산에 사

용된 CPU는 Ryzen7 3800XT이고, RAM은 16GB이다. 또한 매트랩(MATLAB)의 'tic-toc'타이머 함수를 통해 사용하여 계산시간을 분석하였다. Table 3에서, MSE 방법들에 대한 결과 연산시간들이 정리되어있다. 수치적분 기반 Integral MSE의 연산시간은 1,000,000번의 시행 횟수를 가진 몬테카를로 기반의 Simulation MSE보다 무려 785배 빠른 결과를 도출하였다.

Table 3. Comparison of operation times

MSE method	Operation time [sec]
Simulation MSE	15.7
Integral MSE	0.02

4. 결론

본 논문에 사용한 진폭비교 모노펄스 레이더는 4개의 편향된 빔들을 사용하여 목표물로부터 반사된 RF 신호를 수신한다. 4개의 수신 빔을 통해 수신 받은 신호들에 가우시안 잡음이 있다고 가정할 때, 각도 추정 성능을 분석하였다. 진폭비교 모노펄스 레이더의 성능분석은 수치적분을 기반 하여 MSE를 유도함으로써 진행하였다. 이 방법은 무수히 많은 시행횟수를 가진 몬테카를로 기반의 성능분석과 거의 동일한 정확성을 보여주며, 낮은 분산을 가진 잡음환경에서 수치적분기반 MSE는 몬테카를로기반 MSE결과에 99.8% 해당하는 결과를 확인하였다. 또한 수치적분기반 MSE는 1,000,000번의 시행횟수를 가진 몬테카를로기반 MSE보다 수백 배 빠른 연산시간결과를 보여 계산복잡성 측면에서 우수한 것을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] Samuel M. Sherman & David K. Barton. (1984) Monopulse principles and techniques. *Artech House*.
- [2] D.R. Rhodes. (1980). Introduction to monopulse. *Artech House*.
- [3] A.I. Leonov & K.I. Fomichev. (1986). Monopulse radar. *Artech House*.
- [4] Bassem R. Mahafza. (2013). Radar systems analysis and design using MATLAB third edition. *Chapman and Hall*.
- [5] Jerry L. Eaves & Edward K. Reedy. (1987). Principles of modern radar. *Chapman and Hall*.

- [6] D.J. An & J.H. Lee. (2020). Performance analysis of amplitude comparison monopulse direction-of-arrival estimation. *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4.
- [7] D.J. An & J.H. Lee. (2018). Performance of amplitude-comparison monopulse radar. *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 29(12), pp. 969-975.
- [8] Y. J. Han, J.W. Kim, S. R. Park & S.U. Noh, (2017). An investigation into the monopulse radar using tx-rx simulator in electronic warfare settings. *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, pp. 705-706.
- [9] S.R. Park, I.K. Nam, & S.U. Noh. (2018). Modeling and simulation for the investigation of radar responses to electronic attacks in electronic warfare environments. *Security and Communication Networks*, vol. 2018, Article ID 3580536.
- [10] M.A. Richards, J.A. Scheer, & W.a. Holm. (2008). Principles of modern radar basic principles. *SciTech Publishing Inc*, vol. 1.
- [11] Normal distribution. Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Normal-distribution>.
- [12] Mean squared error. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_squared_error
- [13] Roy D. Yates & David J. Goodman. (2014). "Probability and Stochastic Processes third edition," *Wiley*.

이 준 호(Joon-Ho Lee)

[학위]



- 1994년 2월 : 포항공과대학교 전자전 기공학과(공학사)
- 1996년 2월 : 포항공과대학교 전자전 기공학과(공학석사)
- 1999년 8월 : 포항공과대학교 전자전 기공학과(공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 세종대학교 정보

통신공학과 교수

- 관심분야 : 배열신호처리, 레이더신호처리, 스마트안테나
- E-Mail : Joonhlee@sejong.ac.kr

함 형 우(Hyeong-Woo Ham)

[학사학위]



- 2021년 2월 : 세종대학교 전자공학과 (공학사)
- 2021년 2월 ~ 현재 : 세종대학교 정보통신공학과(석사과정)
- 관심분야 : 레이더신호처리
- E-Mail : gkaguddn@gmail.com

임 희 윤(Hee-Yun Lim)

[학사학위]



- 2020년 2월 ~ 현재 : 세종대학교 전자정보통신공학과(학사과정)
- 관심분야 : 레이더신호처리
- E-Mail : lhy000524@naver.com