한국정보전자통신기술학회논문지(jkiiect)'21-2, Vol.14 No.1
논문 21-14-01-7 http://dx.doi.org/10.17661/jkiiect.2021.14.1.7

표적 방향 탐지 향상을 위한 위상 오차 감소 방법

이민수*

Phase Error Decrease Method for Target Direction Detection Improvement

Min-Soo Lee*

요 약 본 연구에서는 표적의 방향 탐지 오차를 최소화 시키는 방법을 제안한다. 수신 신호 위상차에 오차가 발생하면 표적 방향을 정확히 탐지 할 수 없다. 본 연구 제안 방법은 각 안테나에 입산한 신호에 대해서 실효치를 적용하여 위상을 획득한 후 최적의 신호 대 잡음비를 이용하여 위상 오차를 감소시킨다. 모의실험결과에서 안테나 간격이 반파장일 때, 표적 방향 탐지 확률이 가장 우수하고 신호 대 잡음비가 25dB일 때 방향 탐지 확률의 기존방법은 $10^{-1.7}$ 이고 제안 방법은 $10^{-3.3}$ 이다. 기존 방법의 표적 탐지 방향은 $[-8^{\circ},8^{\circ}]$로서 2도의 오차를 나타내고, 제안 방법의 표적 탐지 방향은 $[-10^{\circ},10^{\circ}]$로서 표적방향을 모두 정확히 탐지한다. 향후 분해능 감소에 따른 위상오차를 감소시키는 방법에 대한 연구가 필요하다.

Abstract This paper proposes a method to minimize the target`s direction detection error using RADAR. The radar system cannot accurately detect the target direction due to the phase error of he received signal. The proposed method of this study obtains a phase by applying an root mean square to each antenna incident signal, and reduces the phase error by using an optimal signal to noise ratio. In the simulation result, the probability of detecting the target direction is the best when the antenna spacing is half wavelength. The conventional method of direction detection probability $10^{-1.7}$ and the proposed method is $10^{-3.3}$. The target detection direction of the existing method represents $[-8^{\circ},8^{\circ}]$ with an error of 2 degrees. The target detection direction of the proposed method is shown in $[-10^{\circ},10^{\circ}]$, and all target directions are accurately detected. In the future, There is need for a method to reduce the phase error even though the resolution decrease.

Key Words : Array antenna, Phase error, RMS, SNR, Target direction detection,

1. 서론

공간상에서 표적에 대한 방향을 탐지하는 것은 적으로부터 위협에 대비한 중요한 기술이다. 표적방향 탐지는 공간상에 전파를 송신하여 표적으로부터 수신된 신호를 분석하여 위치를 탐지한다. 표적 위치 탐지 기술로는 빔 형성기술, 디지털 다중 수신 빔 기술, 위치 오차 감소 기술 등이 연구되고 있다[1-2]. 표적 방향 탐지 수신 신호는 신호처리기의 전처리 데이터로 사용하여 신호분석효율을 향상 시켜 간섭제거 및 재밍에 대응할 수 있다[3]. 표적 방향 탐지 정확도는 사용 목적에서 매우 중요하며 선진국에서 지속적으로 연구가 진행되고 있다. 표적 방향 탐지의 국내기술은 외국 장비를 도입하여 사용하고 있는 실정으로 독자적인 기술개발이 필수적이다. 표적의 방향을 탐지하는 기술은 회전 방향 탐지, 진폭비교 방식, 위상비교 방식 등이 있다[4]. 회전 방향 탐지 기술은 빔 폭이 작은 송신안테나를 회전하여

*Division of Human IT Convergency, Daejin University
Received January 02, 2021 Revised January 04, 2021 Accepted January 13, 2021

표적의 방향을 탐지하는 방식으로서 정확도는 비교적 높지만 신호 획득 탐지 확률이 매우 낮은 단점 있다. 진폭비교 방식은 배열안테나에 수신된 신호의 진폭을 비교하여 방향을 탐지하는 방식이다. 이 방식은 구조는 간단하나 방향 탐지 정확도 효율이 좋지 않다. 위상 비교 방식은 선형 배열 안테나에 수신된 신호 위상차를 이용하여 표적의 방향을 탐지하는 방식이다. 이 방식은 다른 방향 탐지 방식보다 정확도가 높다. 그러나 주파수 동조에 의하여 광대역 순시 방향 탐지에 제한을 갖는 단점이 있다. 표적 방향 탐지 변수들은 안테나 설치 간격, 주파수 대역, 신호 파장 길이, 표적 측정 범위가장, 위상차에 따라서 방향 탐지의 시스템 성능이 결정된다[5-6]. 특히 수신 안테나의 수신신호 위상차는 매우 중요한 변수이며 표적 위상 탐지에서 주요 오차원인이 된다[7]. 그러므로 수신신호의 위상차에 오차가 발생하면 표적 방향 탐지를 정확히 추정할 수 없다.

본 연구에서는 최적의 신호 대 잡음비에 근거하여 위상차의 오차를 감소시켜 표적 방향 탐지 정확도를 향상 시킨다. 본 논문의 구성은 2장에서는 위상차 신호분석에 대해서 기술하고 3장에서는 위상 오차 신호향상 방법에 대해서 서술한다. 4장에서는 제안 방법과 기존 방법의 성능을 비교분석하고 끝으로 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 위상차 신호 분석

본 장에서는 표적 방향 탐지를 위한 수신신호 위상차 해석과 위상차 오차 분산에 대해서 기술한다. 표적 방향 탐지 시스템 구성은 그림 1과 같이 나타낸다. 그림1의 안테나로부터 수신된 신호는 혼합기에 입력되어 국부발진기신호와 혼합하여 중간주파수를 생성한다. 중간주파수 신호는 제한 증폭기를 거쳐 위상비교기로 입력된다. 위상비교기는 입력신호의 상대 위상차에 따라서 sin과cos 성분을 갖는 두 개의 신호를 출력한다. 두 신호는 방향 탐지 처리기로 전달되어 주파수 정보와 함께 처리되어 표적의 방향 탐지 데이터를 생성한다. 수신 신호의 위상차를 사용한 표적 방향 탐지는 최소 2개 이상의 안테나를 사용한다. 각 안테나 수신신호는 시간시연을 갖으며 위상차를 발생시킨다.

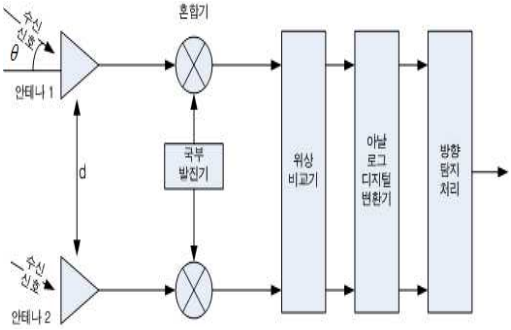

그림 1. 표적 방향 탐지 시스템
Fig. 1. Target direction detection system

표적방향 탐지는 위상비교기에 의해서 측정되는 시간지연, 안테나 사이의 간격 및 주파수에 의해서 추정 할 수 있다. 첫 번째 안테나 수신신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$r_1(t) = V\exp(j\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}z) \quad (1)$$

식(1)에서 V는 신호 세기, ω는 각주파수, z는 전파거리, λ는 신호파장, d는 안테나 사이의 간격을 나타낸다. 두 번째 안테나의 수신신호는 첫 번째 안테나를 기준으로 하였을 때 $d\sin\theta$ 길이 만큼의 위상차로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_2(t) = V\exp(j\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}(z + d\sin\theta)) \quad (2)$$

식(2)에서 θ는 수신 신호의 방위각이고, $d\sin\theta$는 기준 안테나와 근접 안테나까지의 경로를 나타난다. 방향 탐지의 위상차는 2개 안테나 수신 신호 $r_1(t)$와 $r_2(t)$간의 상대적 위상차를 사용하므로, 2개 안테나가 동일하게 진행된 전파거리를 제거하기 위해서 $\frac{2\pi}{\lambda}z = 0$으로 설정한다. 안테나 신호세기는 동일하다고 가정할 때 안테나 수신신호는 다음과 같이 나타 낼 수 있다[9-10].

$$r_1(t) = \exp(j\omega t) \quad (3)$$

$$r_2(t) = \exp\left(j\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} d\sin\theta\right) \quad (4)$$

두 안테나 신호에 대한 위상차를 계산하기 위해서 식(3)과 식(4)에 대해서 자연로그를 취하고 감산을 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln\frac{r_1(t)}{r_2(t)} = j\omega t - j\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} d\sin\theta \quad (5)$$

자연로그의 비를 $\Delta\phi$로 나타내면 식(5)는 다음과 같이 나타낸다[10].

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d\sin\theta \quad (6)$$

식(6)을 $\sin\theta$에 대해서 정리하면 다음과 같이 나타낸다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\phi}{2\pi d}\right) \quad (7)$$

위상차는 안테나 수신신호가 모호성이 있는 입사파장이 d이하인 모든 주파수에서 2π마다 반복되므로 상대적인 위상변이는 $0 < \Delta\phi < 360$ 이다. 위상차는 2π범위 이내로 안테나 간격에 비해 신호 주파수가 크거나 또는 주파수 대역에 비해서 안테나 간격이 클 경우 입사신호 방위각 변화에 따라서 위상차는 360도 범위를 반복한다. $\frac{1}{2} > \frac{d}{\lambda}$ 인 경우 $-\pi/2$에서 $\pi/2$의 각도 범위에서 위상차는 360도 범위 내에서만 변하지만 $\frac{1}{2} < \frac{d}{\lambda}$ 인 경우 위상차는 360도 범위를 반복하므로 방위각 탐지 모호성이 발생한다. 두 안테나에 수신 신호의 위상차를 나타내는 위상비교기는 표적 방향 탐지 성능에 중요한 역할을 한다. 위상비교기는 중간주파수 신호를 이용하여 위상차를 나타내는데 위상차에 따라 신호 특성이 변하게 된다. 식(7)에서 방위각 변화에 대한 위상차 변화율을 구하기 위해서 양변을 방위각으로 미분하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\Delta\phi}{d\theta} = \frac{2\pi}{\lambda} d\cos\theta \quad (8)$$

식(8)에서 미분증감을 Δ로 치환하여 방위각 변화량을 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\phi}{\frac{2\pi}{\lambda} d\cos\theta} \quad (9)$$

방향 탐지의 성능의 방위각 오차에 대한 분산은 다음과 같다[10].

$$\sigma_\theta = \frac{\Delta\phi^2}{\left(\frac{2\pi}{\lambda} d\cos\theta\right)^2} \quad (10)$$

3. 위상 오차 향상 방법 제안

본 장에서는 수신신호의 위상차에 대한 방향 탐지 오차를 감소시키기 위한 방법을 제안한다. 일반적으로 표적 방향을 탐지하기 위한 수신신호 처리는 오보율(False Alarm Rate)을 설정하여 임계치 이상의 신호만을 대상으로 한다[11-12]. 그러나 시스템운영에서는 오보율 또는 신호 검출율에 관계없이 원하는 신호상태에 따라서 달라질 수 있다. 특정 빔폭으로 원하는 해상도를 얻기 위해서는 최소의 신호 대 잡음비(SNR)가 요구되며 표적 방향 탐지 정확도와 안테나의 수신감도는 수신 채널과 좁은 빔폭 및 여러 배열소자 안테나를 사용함으로써 향상 시킬 수 있다. 수신시스템의 안테나 패턴은 가우시안 분포라고 가정하였을 때 두 안테나의 수신신호 전력은 다음과 같이 나타낸다.

$$P_{r_1(t)} = \exp\left[-K\left(\frac{\frac{\theta_s}{2} - \theta}{\theta_o}\right)^2\right] \quad (11)$$

$$P_{r_2(t)} = \exp\left[-K\left(\frac{\frac{\theta_s}{2} + \theta}{\theta_o}\right)^2\right] \quad (12)$$

여기서 θ_s는 안테나 간 이격각도로서 본 연구에서는 $\theta = \theta_o = \theta_s/2$로 설정하고 θ_o는 3dB 안테나 빔폭의 1/2을 나타낸다. 두 안테나의 수신신호전력 차이는 다음과 같이 나타낸다.

$$P_R = 10\log e\left(\frac{P_{r_2(t)}}{P_{r_1(t)}}\right) \tag{13}$$
$$= \frac{10\,K}{\theta_o^2}\log e\left[\left(\frac{\theta_s}{2}+\theta\right)^2-\left(\frac{\theta_s}{2}+\theta\right)^2\right]$$

식(13)을 위상차에 대해서 재정리하면 다음과 같이 나타낸다.

$$\theta = \frac{\theta_o^2\,P_R}{20\,B\,\theta_s\log e} \tag{14}$$

여기서 B는 $\theta=\theta_o=\theta_s/2$인 경우에 결정되는 상수이다. 본 연구에서는 3dB점이 빔의 교차점에서 발생한다고 가정하여 상수 B는 0.69로 설정한다. 상수 B값을 식(14)에 적용하면 다음과 같다.

$$\theta = \frac{\theta_o^2\,P_R}{5.95\,\theta_s} \tag{15}$$

독립적인 열잡음이 존재할 때 식(15)에 최적화 SNR을 사용하면 표적 방향 탐지 오차를 나타낼 수 있다. 신호전력은 전압제곱에 비례하므로 식(15)를 신호전압형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\theta = \frac{\theta_o^2}{5.95\,\theta_s}20\left[\log V_2 - \log V_1\right] \tag{16}$$

여기서 V_1은 첫 번째 안테나 수신 신호 전압이고, V_2은 두 번째 안테나 수신 신호 전압이다. 식(16)의 각 신호전압에 대한 위상차는 편미분을 취함으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial\theta}{\partial V_1} = -\frac{\theta_0^2}{5.95\theta_s}20\log e\left(\frac{1}{V_1}\right) \tag{17}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial V_2} = \frac{\theta_0^2}{5.95\theta_s}20\log e\left(\frac{1}{V_2}\right) \tag{18}$$

각 안테나 수신신호에 위상차는 식(17)과 식(18)을 실효치(RMS)로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\theta_1 = \frac{20\theta_0^2\log e}{5.95\theta_s}\left(-\frac{1}{V_1}\right)\left(\frac{\Delta V_1}{\sqrt{2}}\right) \tag{19}$$

$$\Delta\theta_2 = \frac{20\theta_0^2\log e}{5.95\theta_s}\left(\frac{1}{V_2}\right)\left(\frac{\Delta V_2}{\sqrt{2}}\right) \tag{20}$$

수신신호의 위상차는 각 안테나 수신신호의 실효치의 합 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_1^2+\Delta\theta_2^2} \tag{21}$$

식(19)과 식(20)을 식(21)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\theta = 1.446\frac{\theta_o^2}{\theta_s}\sqrt{\frac{\Delta V_1^2}{2\,V_1^2}+\frac{\Delta V_2^2}{2\,V_2^2}} \tag{22}$$

식(22)에서 신호전압의 제곱 V_1^2 과 V_2^2 은 신호전력이고 ΔV_1^2 과 ΔV_2^2은 잡음전력으로 독립적이다. 식(22)를 신호전력과 잡음전력의 비로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta\theta = 1.446\frac{\theta_o^2}{\theta_s}\sqrt{\frac{N}{S_1}\left(1+\frac{S_1}{S_2}\right)} \tag{23}$$

S_1과 S_2의 신호전력은 두 신호의 파형에 대한 비율로서 식(15)을 이용하여 풀면 $S_2 = G(\theta)\,S_1$으로 나타낼 수 있다. 즉 독립잡음에 대한 표적 방향 탐지 위상 오차는 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta\theta = 1.446\frac{\theta_o^2}{\theta_s}\sqrt{\frac{1}{SNR}\left(1+\frac{1}{G(\theta)}\right)} \tag{24}$$

$$G(\theta) = -\frac{\left(\frac{\theta\,\theta_s}{1.66\,\theta_o^2}\right)}{10} \tag{25}$$

4. 모의실험

본 장에서는 모의실험을 통해서 위상오차를 감소시키는 제안 방법과 기존방법의 성능을 비교 분석한다. 그림2는 안테나 간격이 0.5λ, 1λ, 2λ 일 때 신호 대 잡음비(SNR)의 변화에 대한 방향 탐지 오차를 나타낸다. 신호 대 잡음비가 클수록 위상차 변화량이 작아지므로 방향 탐지 측정 오차가 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 신호 대 잡음비가 증가할수록 방향 탐지 오차가 감소한다. 그리고 안테나 간격이 0.5λ에서 성능이 우수한 것을 나타낸다. 그러나 성능이 향상되면 모호성이 증가하는 단점이 존재한다.

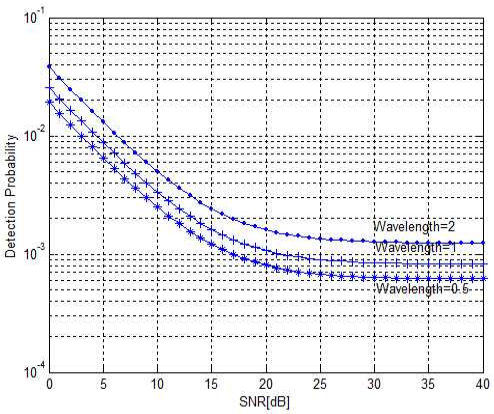

그림 2. 신호대 잡음비의 방향 탐지
Fig. 2. Direction detection of SNR

그림3은 본 연구에서 제안한 방법과 기존 방법에 대한 표적 방향 탐지 오차에 대해서 나타낸다. 안테나 사이 간격은 반 파장으로 설정하였다. 신호 대 잡음비 25dB에서 기존방법은 $10^{-1.7}$ 이고 제안 방법은 $10^{-3.3}$을 나타낸다.

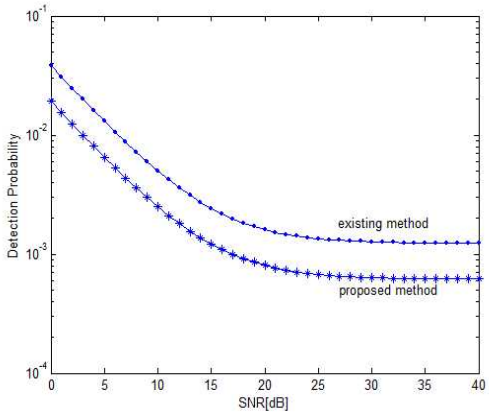

그림 3. 표적 방향 탐지 비교
Fig. 3. Compare of target direction of detection

그림 4와 그림 5의 모의실험 조건은 배열안테나 6개, 신호 대 잡음비 25dB, 안테나 간격 0.5λ로 설정한다. 그림4는 표적탐지 우수한 분해능을 갖는 기존 MUSIC방법을 적용하여 [-10°, 10°]에서 2개의 표적 방향을 탐지한 그래프이다. 그림4는 [-8°, 8°]의 표적 방향 탐지를 하여 약 2°의 오차를 나타난다.

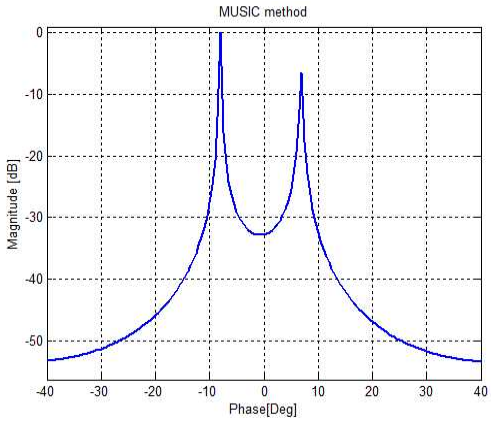

그림 4. MUSIC 방법 표적 방향 탐지 [-10°,10°]
Fig. 4. Target direction detection with MUSIC method at [-10°,10°]

그림5는 수신 신호 위상오차를 보정한 제안방법으로 표적 방향을 탐지한 그래프이다. 표적 방향 [-10°, 10°]에서 오차 없이 탐지 한다.

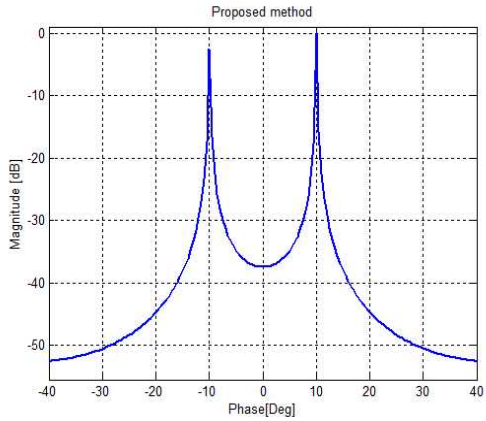

그림 5. 제안 알고리즘 표적 방향 탐지[-10°,10°]
Fig. 5. Target direction detection with proposed method at [-10°,10°]

그림 6은 두 개 의 표적이 [-5°,5°]에 위치하였을 때 제안 방법으로 표적 방향을 탐지한 그래프를 나타낸다. 두 표적의 분해능은 10°로서 제안 방법으로 두 표적을 탐지한다. 그림 7은 두 표적이 [0°,6°]에 위치하였을 때 제안 방법으로 표적 방향을 탐지한 그래프를 나타낸다. 두 표적의 분해능은 6°로서 제안 방법으로 두 표적을 탐지하지 못한다. 본 연구에서 제안한 방법의 표적 분해능은 7° 이상에서

표적을 탐지할 수 있다.

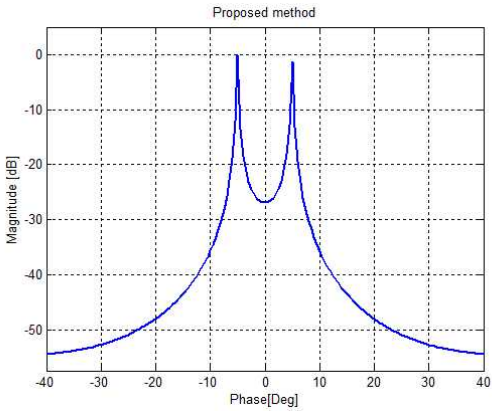

그림 6. 제안 알고리즘 표적 방향 탐지[-5°,5°]
Fig. 6. Target direction detection with proposed method at [-5°,5°]

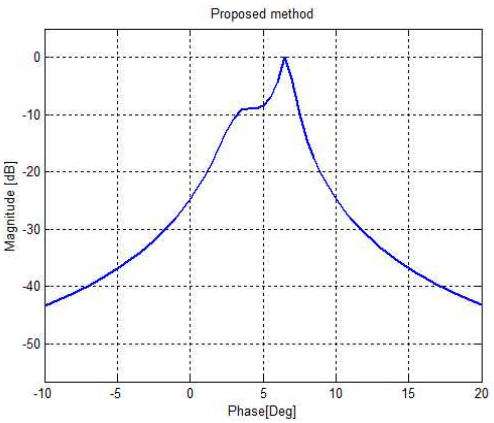

그림 7. 제안 알고리즘 표적 방향 탐지[-5°,5°]
Fig. 7. Target direction detection with proposed method at [0°,6°]

5. 결론

본 논문에서는 표적 방향 탐지를 향상시키기 위해서 수신신호의 위상 오차 감소 방법을 제안하였다. 연구방법은 위상 오차를 감소시키기 위한 방법으로 각 안테나 수신신호 위상에 대해서 실효치를 적용하여 안테나 수신 신호의 위상을 획득한다. 그리고 표적 방향 탐지 모호성을 감소시키기 위해서 최적 신호대 잡음비를 사용하였다.

모의실험을 통해서 표적 방향 탐지 성능은 기존 MUSIC방법과 제안 방법을 비교하였다. MUSIC방법을 사용한 표적 방향 탐지에 대한 위상 오차는 두 표적에 대해서 각각 2°를 나타내었다. 제안 방법은 두 표적에 대해서 모두 정확히 [-10°,10°]를 탐지한 결과를 나타내었다. 모의실험조건은 두 표적에 대한 분해능을 20°로 설정하여 연구를 진행하였다. 그러나 표적들에 대한 위치가 서로 근접하여 분해능이 감소하면 위상오차가 증가하는 단점 있다. 향후 분해능 감소에 따른 위상 오차를 감소시키는 방법에 대해서 연구가 진행 될 필요가 있다고 판단된다.

REFERENCES

[1] Oh Hyun Su, Park Cheol sun, and Chang Lae Kyu, “Study on Monopulse Direction Detection Using Digital Beamforming”, KiCS, Vol.45, No.5, pp.875-881, 2020.
[2] Kong Young Joo, Woo Seon Keol, Park Sung Ho, Ryu Seong Hyun, and Kang Yeong Duk, “Separation of Adjacent Target using Range-Doppler Clustering Method”, JIIBC, Vol.20, No.2, pp.63-73, 2020.
[3] Jang Sung Hoon and Kim Seon Joo, “Radar Countermeasure and Effect Analysis for he Pull-Off Deceptive Jamming signal”, Journal of the KIMST, Vol.23, No.3, pp.221-228, 2020.
[4] Chuk Davis, “Enhancing the accuracy of Direction-Finding EW System”, MSN&CT, pp.52-64, Vol.9, 19898.
[5] A.R. Baron, “Passive Direction Finding and Signal Location”, Microwave Journal, Vol. 9, pp.59-79, 1982.
[6] Willian M.Sherrill, “Bearing Ambiguity and Resolution in Interference Direction Finders”, IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, Vol.5, No.6, pp.959-966, November, 1969.
[7] Kazunari kihira, Toru Fukasawa, and Naofumi Yonda, “Time-Modulated Array Using Phase Shifter for Amplitude-Phase Error compensation,” IEEE Conference PAST, March, 2020.

[8] K.Chang, S.Johnson, R. Flotz, and R.Castner, "Angle Error Simulation for Phased Array for limited Phased Scan System," IEEE Radar Conference, August 2002.
[9] B. Allen and M. Ghavarri, "Adaptive Array Sys tem", Wiley, Feb, 2005.
[10] Lal Chand Godara "Smart Antennas", CRC press, 2004.
[11] S. Unnikrishna Pillai, " Array Signal Processing", Springer-Verlag, 1989.
[12] Bassem R and Mahafza, "Radar System Analysis and Design using Matlab," Chapmn&Hall CRC, 2000.

저자약력

이 민 수(Min-Soog Lee) **[정회원]**

- 1994년 2월 : 한양대학교 전파통신공학과 졸업 공학박사
- 1995년 3월 ~ 현재 : 대진대학교 휴먼IT융합학부 교수

〈관심분야〉 안테나, 마이크로웨이브소자