

## 저고도 해상표적 추적에서 다중경로 영향 억제를 위한 다중 주파수 모노펄스 방향 탐지 방법

### Multi-Frequency Monopulse Direction Detection Method for Suppression of Multipath Effects in Low-Altitude Sea Target Tracking

이창현 · 전상미 · 박종국 · 나형기 · 김상현

Chang-Hyun Lee · Sang-Mi Chon · Jongkuk Park · Hyung-Ki Na · Sang-Hyun Kim

#### 요 약

본 논문에서는 저고도 해상표적의 추적에서 해수면 반사 및 회절로 인한 주 빔 안에서의 다중경로 간섭 문제를 해결하기 위해 다중 주파수를 이용한 새로운 모노펄스 방향 탐지 방법을 제안한다. 제안 방법은 3개의 인접한 주파수에서 측정된 복소수 형태의 모노펄스 신호비에 절대값을 취한 결과와 주 빔 내의 가상 표적으로 다중경로 간섭 신호를 포함하여 계산한 결과를 비교하여 표적의 고각 후보군을 결정한다. 최종 표적 고각은 다중경로 간섭이 포함된 신호비의 특징을 이용하여 설정한 비용함수를 이용하여 후보군 중에서 최종 결정된다. 제안 방법은 표적 거리와 측정된 모노펄스 신호비만을 필요로 하므로 기존 모노펄스 레이더 시스템에도 별도의 구성 없이 간단히 적용할 수 있다는 장점이 있으며, 제안 방법의 다중경로 영향 억제 효과는 저고도 해상표적을 추적하는 상황을 가정한 모의실험으로 검증하였다.

#### Abstract

This paper proposed a monopulse method using multiple frequencies to overcome multipath interference in the tracking of low-altitude sea targets. The method determines target elevation candidates by comparing the difference between the measured complex monopulse ratios and those calculated considering multipath interference at three adjacent frequencies. The final target elevation is determined among the candidates by using a cost function set based on the characteristics of the results considering multipath interference. Because the proposed method requires solely the measured target distance and monopulse ratios, it can be applied to the existing monopulse radar system without additional configuration. The suppression effect of multipath interference was verified by a simulation conducted for tracking low-altitude targets in a multipath environment.

Key words: Monopulse, Low-Altitude Sea Target, Multipath, Multiple Frequencies, Tracking Accuracy

#### I. 서 론

저고도 해상표적 추적에서 발생하는 해수면에서의 반사 및 회절로 인한 다중경로 간섭은 표적의

정확한 위치추적을 어렵게 한다. 특히 해수면 반사 간섭 신호는 표적 신호와 유사하고 주 빔 내에 존재하기 때문에 일반적인 방법으로는 구별하기 어렵다. 이러한 상황으로 인해 기존 해상 레이더들은 저

LIG 넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received February 3, 2021 ; Revised February 23, 2021 ; Accepted March 4, 2021. (ID No. 20210203-011)

· Corresponding Author: Chang-Hyun Lee (e-mail: changhyun.lee@lignex1.com)

고도 해상표적 추적에서 다중경로 간섭에 의한 추적 정확도 열화를 경험하고 있으며, 이 문제를 해결하기 위해 다양한 연구가 수행되고 있다<sup>[1]~[7]</sup>.

방향 추적 정확도 향상을 위한 방법 중 기존 레이다 시스템에서 주로 사용하는 모노펄스 방향 탐지 방법은 다른 방법들에 비해 상대적으로 간단한 과정으로 높은 정확도의 방향 탐지 성능을 보여주며, AM(amplitude modulation) 재밍이나 ECM(electronic counter measure)에 영향을 받지 않는다는 장점<sup>[8],[9]</sup>이 있다. 하지만 주 빔 내에 간섭 신호가 존재하는 저고도 해상표적의 추적 상황에서는 큰 오차를 유발하며 취약한 모습을 보인다<sup>[10]</sup>.

본 논문에서는 주 빔 내에 간섭이 존재하는 다중경로 환경에서, 모노펄스 방향 탐지 방법의 고각 추적 정확도를 개선하는 방법을 제안한다. 다중경로 환경에서 기존 모노펄스 방법은 간섭 신호가 포함되지 않은 합·차 패턴의 수신 신호비를 간섭 신호가 포함된 측정 신호비와 비교하기 때문에 표적의 고각 추측에 필연적으로 오차가 발생하게 된다. 이러한 오차 발생 원인을 제거하기 위하여, 제안 방법은 측정 신호비와 간섭 신호를 포함하여 계산한 신호비를 직접 비교하며, 비교에는 복소수 형태의 신호비의 절대값을 이용한다. 하지만 이처럼 간섭 신호를 고려한 모노펄스 신호비로 표적의 고각을 산출하면 표적의 고각이 하나로 특정되지 않고 다수의 후보군을 형성하는 문제가 발생하게 된다. 다수의 후보 중 실제 표적의 고각을 결정하기 위하여 3개의 인접한 주파수에서 모노펄스 합·차 패턴의 수신 신호비를 비교하여 우선 표적의 고각 후보의 수를 최소화한다. 여기서 간섭 신호를 포함한 모노펄스 신호비의 특징을 분석하여 설정한 비용함수로 표적의 최종 고각을 결정한다. 이러한 방법은 기본적인 모노펄스 방법으로부터 얻을 수 있는 정보만을 이용하기 때문에 별도의 추가적인 구성없이 기존 레이다 시스템에도 적용 가능하다는 장점이 있다.

본 논문은 총 4장으로 구성되어 있으며, 2장에서는 지구환경을 고려한 다중경로 환경을 정의하고, 저고도 해상표적 추적 시에 해수면에서 반사된 간

섭 신호로 인한 기존 모노펄스 방법의 고각 추적 오차를 모의실험을 통해 확인한다. 3장에서는 제안 방법으로 다중경로 환경에서 저고도 해상표적의 고각을 결정하는 과정을 설명하고, 제안 방법의 고각 추적 성능을 모의실험을 통해 검증한다. 마지막으로 4장에서는 논문의 전체 내용을 요약하고 마무리한다.

## II. 저고도 해상표적의 다중경로 환경

그림 1은 지구 곡률을 고려한 다중경로 환경을 보여준다.  $\alpha_E$ 는 지구 곡률과 대기가 고려된 지구의 실효 반지름<sup>[11],[12]</sup>을 의미하며, 그림의 파란색 원 A와 C는 각각 레이다와 표적의 위치, 그리고 B는 해수면에서 신호가 반사되는 지점을 의미한다. 레이더로부터 송신된 전파가 표적에 도달하는 경로는  $\overline{AC}$ 와  $\overline{ABC}$ , 그리고 표적에서 산란 후 레이더로 수신되는 경로는  $\overline{CA}$ 와  $\overline{CBA}$ 이다. 따라서 레이더가 수신하는 총 4개의 신호는 그림 1과 같이 표현된다.

$$\sigma_{00} \mathbf{w}_{RX}^H(\theta_0) \mathbf{a}(\theta_T) + A e^{j\phi_2} \sigma_{0i} \mathbf{w}_{RX}^H(\theta_0) \mathbf{a}(\theta_R) \quad (1)$$

$$A e^{j\phi_1} \times \left\{ \sigma_{i0} \mathbf{w}_{RX}^H(\theta_0) \mathbf{a}(\theta_T) + A e^{j\phi_2} \sigma_{ii} \mathbf{w}_{RX}^H(\theta_0) \mathbf{a}(\theta_R) \right\} \quad (2)$$

식 (1)은  $\overline{AC}$ 의 경로로 송신된 신호로부터 수신된 2개의 신호를, 식 (2)는  $\overline{ABC}$ 의 경로로 송신된 신호

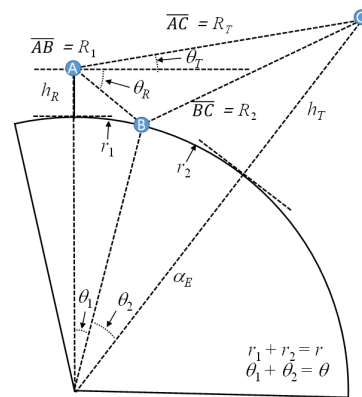


그림 1. 지구 곡률을 고려한 다중경로 환경  
Fig. 1. Multipath environments in spherical earth.

로부터 수신된 2개의 신호를 보여준다. 여기서  $w$ 와  $a$ 는 레이더에 입력된 가중치와 입력신호 벡터를 의미하며,  $\theta_0$ 는 레이더의 빔 조향각을,  $\sigma$ 는 4개의 각 수신 신호에서 표적의 레이더 반사 면적(RCS: radar cross section)을 의미한다.  $\theta_T$ 와  $\theta_R$ 은 그림 1에서 볼 수 있듯이 표적 신호 각도와 간섭 신호의 각도를 의미한다.  $A$ 와  $\phi_d$ 는 해수면의 반사계수( $\Gamma$ )<sup>[13]</sup>, 발산 지수( $D$ )<sup>[12]</sup>, 분산 계수( $\rho_s$ )<sup>[14]</sup>, 그리고 지구 곡률과 대기<sup>[11],[12]</sup>를 고려한 직접 수신 신호와 반사 수신 신호 사이의 크기 비와 위상차를 의미하며, 다음과 같이 풀어 쓸 수 있다.

$$Ae^{j\phi_d} = \Gamma D \rho_s e^{-j \frac{2\pi(R_1 + R_2 - R_T)}{\lambda}} \quad (3)$$

여기서 저고도 해상표적의 경우, 식 (1)과 식 (2)의  $\sigma_{00}$ ,  $\sigma_{0i}$ ,  $\sigma_{i0}$ ,  $\sigma_{ii}$ 의 입사각과 산란 후 반사각이 매우 근소한 차이를 보이기 때문에 레이더 반사 면적은 모두 같다고 가정한다. 이를 적용하여 식 (1)과 식 (2)의 4개의 수신 신호를 전부 합친 후 잡음 성분을 추가하면 전체 수신 신호의 합을 아래와 같은 식으로 간단하게 표현할 수 있다.

$$\sigma \{w_{RX}^H(\theta_0)a(\theta_T) + Ae^{j\phi_d}w_{RX}^H(\theta_0)a(\theta_R) + N\} \quad (4)$$

$N$ 은 정규분포를 따르는 복소수 형태의 잡음을 의미하며, 신호대잡음비에 의해 크기가 결정된다. 식 (4)의 수신 신호를 계산하는 데 필요한 표적 관련 정보는 직접 수신 신호와 반사 수신 신호와의 경로차( $R_1 + R_2 - R_T$ )와 수신 신호 입사각  $\theta_T$ 와  $\theta_R$ 이다. 여기서 표적과 레이더 사이 거리  $R_T$ 와 표적의 고각  $\theta_T$ 는 레이더에서 표적을 관측하면 획득하는 정보이기 때문에 표적의 고각 산출에 필요한 나머지 정보는  $\theta_R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ 이 되며, 이들은 식 (5)와 식 (6)으로 계산할 수 있다<sup>[15],[16]</sup>.

$$\theta_R = \sin^{-1} \left( \frac{2\alpha_E h_R + h_R^2 + R_1^2}{2(\alpha_E + h_R)R_1} \right) \quad (5)$$

$$R_1 = \sqrt{h_R^2 + 4\alpha_E(h_R + \alpha_E)\sin^2\left(\frac{r_1}{2\alpha_E}\right)} \quad (6)$$

$$R_2 = \sqrt{h_T^2 + 4\alpha_E(h_T + \alpha_E)\sin^2\left(\frac{r_2}{2\alpha_E}\right)} \quad (7)$$

여기서  $r_1$ 의 값은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$r_1 = \frac{r}{2} - \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4\alpha_E(h_R + h_T) + r^2} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{3}\right) \quad (8)$$

여기서  $r = r_1 + r_2 = \theta\alpha_E$ 이며,  $\theta$ 는 식 (9)로 계산할 수 있다.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{(\alpha_E + h_R)^2 + (\alpha_E + h_T)^2 - R_T^2}{2(\alpha_E + h_R)(\alpha_E + h_T)} \right) \quad (9)$$

위와 같은 과정을 통해 직접 수신 신호와 반사 수신 신호를 계산하는 데 필요한  $\theta_R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ 가 얻어지며, 이들은 다중경로 환경에서 해수면에서 반사된 간섭 신호가 고려된 모노펄스 합·차 패턴의 수신 신호비를 계산하는 데 사용된다.

해수면에서 반사된 간섭 신호가 기존의 모노펄스 방법을 이용한 추적에 미치는 영향을 확인하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험 조건은 레이더 높이( $h_R$ )가 15 m일 때, 35 m의 높이( $h_T$ )를 갖는 표적이 14 km에서 최초 탐지되어 레이더 방향으로 접근하는 경우를 가정하였다. 직접 수신 신호와 반사 수신 신호비( $Ae^{j\phi_d}$ )에 영향을 주는 해상 상태(sea state)<sup>[17]</sup>는 0.15 m의 파고를 갖는 2단계로 설정하여 해수면에서 반사된 간섭 신호가 상대적으로 큰 영향을 주는 상황을 가정하였다. 추적 고각은 표적이 100 m 이동할 때마다 갱신하였으며, X-대역에서 반파장 간격의 80개의 방사소자가 고각 방향으로 등간격 배열된 선형배열 레이더를 모의실험에 사용하였다. 모노펄스 방법을 적용하기 위하여 송신 패턴에는 균일 가중치를, 그리고 합·차 패턴에는 각각 Taylor와 Bayliss 30 dB 가중치<sup>[18]</sup>를 적용하여 패턴을 형성하였다. 사용된 레이더의 합 패턴의 고각 방향 반전력 빔 폭은 1.6°이다. 그림 2는 잡음이 없는 상태에서 X-밴드에서 수행한 모의실험 결과이며, 모노펄스 방법을 이용해 저고도 해상표적의 추적을 수행하면 다중경로 간섭 신호의 영향으로 1° 이상의 큰 오차가 발생하는 것을 보여준다.

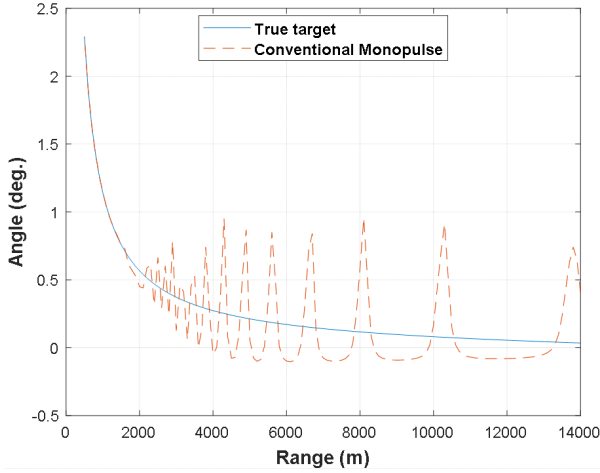


그림 2. 잡음이 없는 조건에서 모노펄스 방법을 이용한 고각 산출 결과

Fig. 2. Elevation estimation results in noise-free conditions using monopulse method.

간섭 신호가 주 빔에서 벗어나 부엽으로 수신하는 1.5 km 이내의 근접 거리에서만 간섭 신호의 영향이 완화되어 신뢰할 수 있는 수준의 추적을 수행하는 것을 확인할 수 있다.

### III. 다중 주파수 모노펄스 방향 탐지 방법

이번 장에서는 주 빔 내에 간섭 신호가 존재하는 다중경로 환경에서 모노펄스 방법의 추적 정확도를 개선하는 방법을 제안한다. 그림 3은 제안 방법의 순서도를 보여준다. 우선 표적 탐지로부터 표적 거리( $R_T$ )와 측정 모노펄스 합·차 패턴의 수신 신호비( $(\Delta/\Sigma)_{mea.}$ )를 얻고, 빔 조향 방향( $\theta_0$ )을 기준으로 반전력 빔 폭( $\theta_{3dB}$ ) 범위에서 다중경로 간섭 신호가 포함된 각도별 모노펄스 신호비( $(\Delta/\Sigma)_{cal.}$ )를 계산한다. 식 (4)를 이용하면 합·차 패턴의 수신 신호비를 계산할 때 표적의 레이더 반사 면적이 약분되어 상쇄되기 때문에 표적의 거리정보만으로 모노펄스 신호비를 계산할 수 있다.

제안 방법에서는 측정된 모노펄스 신호비와 계산된 신호비의 차 제곱( $\{ |(\Delta/\Sigma)_{cal.}| - |(\Delta/\Sigma)_{mea.}| \}^2$ )을 계산하고, 이것의 특징을 이용하여 최종 표적의 고

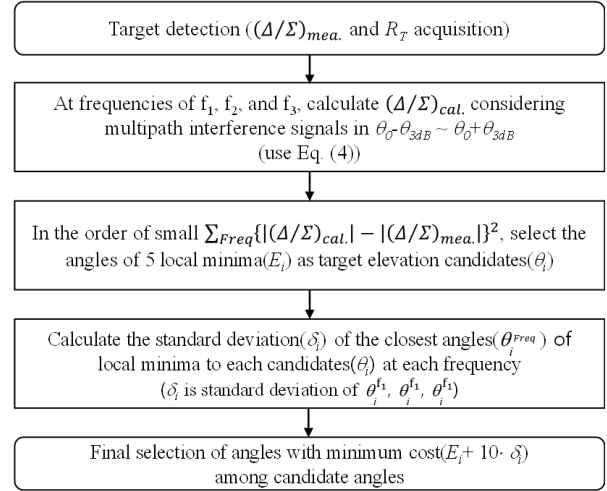


그림 3. 제안 방법의 순서도

Fig. 3. Flow chart of proposed method.

각을 산출한다. 그림 4는 잡음이 없는 상태에서 인접한 3개의 주파수에서 측정된 모노펄스 신호비와 다중경로 간섭 신호를 포함하여 계산한 신호비의 절대값의 차 제곱( $\{ |(\Delta/\Sigma)_{cal.}| - |(\Delta/\Sigma)_{mea.}| \}^2$ )의 예시를 보여주며, 세로축은 빔 조향 방향( $\theta_0$ )을 기준으로  $\theta_0 + \theta_a$ 에 표적이 있다고 가정하고 계산한 모노펄스 신호비의 차의 제곱, 그리고 가로축은 빔 조향 방향( $\theta_0$ )에서 더해진 각도( $\theta_a$ )를 의미한다. 그림 4로

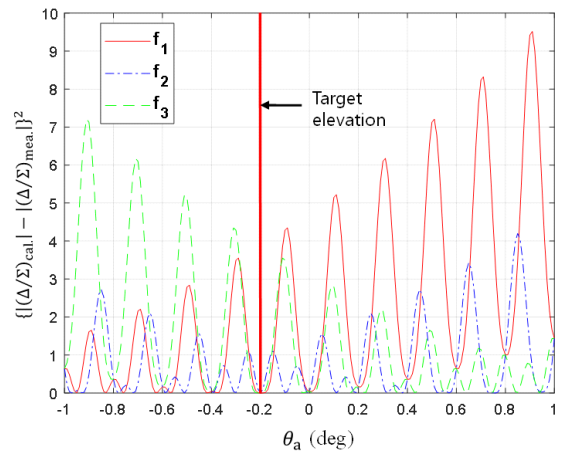


그림 4. 측정 신호비와 계산 신호비의 차의 제곱

Fig. 4. Squared difference between measured and calculated monopulse ratios.

부터 간섭 신호가 포함된 신호비의 차의 제공의 특징을 살펴보면 우선 일반적인 모노펄스 방식과는 다른 결과를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 일반적인 모노펄스 방식은 측정 신호비가 계산 신호비와 일대일로 대응하여 하나의 표적 고각을 특정할 수 있지만, 다중경로 간섭 신호를 포함하여 계산한 모노펄스 신호비는 다수의 각도가 표적 고각의 후보가 되어 일반적인 방법으로 하나의 표적 고각을 결정할 수 없다. 따라서 제안 방법은 인접한 다수의 주파수에서 계산한 결과를 사용하고, 모든 주파수에서 공통으로 보이는 특징 2가지를 이용하여 최종 표적 고각을 결정한다. 제안 방법의 고각 추적 정확도는 사용하는 주파수의 개수가 많을수록 높아지는 양상을 보이지만, 주파수의 개수 증가에 따른 연산량은 주파수 수에 비례해서 증가하는 반면, 정확도 개선 정도는 점차 줄어든다. 제안 방법은 연산량과 정확도 개선 정도를 고려하여 3개의 주파수를 사용하여 표적의 고각을 추정한다.

모든 주파수에서 보이는 첫 번째 공통 특징은 실제 표적 고각에서 모두 0, 즉, 최소값을 갖는다는 것이다. 이 특징으로 인해 하나의 주파수에서 다수의 해가 존재하더라도 3개의 주파수에서 공통으로 해가 될 수 있는 각도는 단 하나만 존재하게 된다. 하지만 잡음이 있는 경우, 최소값의 위치가 변경될 수 있으므로 이를 보정하여 더욱 정확한 표적 고각을 산출하기 위하여, 제안 방법은 3개의 주파수에서의 계산 결과를 모두 더한 값( $\sum_{Freq} \{ |(\Delta/\Sigma)_{cal.}| - |(\Delta/\Sigma)_{mea.}| \}^2$ )에서 작은 신호비 차 제공을 갖는 순서로 5개의 극소값( $E_i$ )의 각도를 표적 고각 후보( $\theta_i$ )로 선택한다. 5개의 표적 고각 후보 중 하나의 최종 표적 고각을 결정하기 위하여, 모든 주파수에서의 계산 결과는 실제 표적 고각에서 모두 극소값을 갖는다는 두 번째 주파수 공통 특징을 이용한다. 이 특징으로 인해 잡음이 있는 상태에서도 실제 표적 고각에서 주파수별 극소값의 각도는 수렴하게 된다. 특히, 저고각인  $0^\circ$  근처에서는 후보각의 극소값들이 거의 0에 근접하게 되어 극소값의 위치로만 표적 고각을 결정하게 되면 작은 잡음으로도 오차

가 크게 발생할 수 있으므로 두 번째 주파수 공통 특징을 이용한 결과의 보정이 필요하다. 최종 표적 고각을 결정하기 위하여 우선 각 고각 후보군( $\theta_i$ )에서 가장 인접한 극소값을 갖는 주파수별 각( $\theta_i^{Freq}$ )을 찾아 이들의 표준편차( $\sigma_i$ )를 계산하고, 앞에서 계산한 5개의  $E_i$ 와  $\sigma_i$ 에 그림 3의 비용함수를 적용하여 최종 표적 고각을 결정한다.

제안 방법의 추적 성능을 검증하고, 최종 표적 고각을 선택하는 과정을 확인하기 위하여, 그림 2와 같은 조건에서 저도고 해상표적을 추적하는 상황을 가정하고, 잡음을 추가하여 모의실험을 수행하였다. 그림 5와 그림 6은 신호대잡음비가 30 dB이고, 표적의 거리가 10 km일 때 X-대역에서 표적의 고각을 산출하는 모의실험 과정을 보여준다. 추적에 사용되는 주파수 범위가 증가하면 각 주파수에서 측정 및 계산되는 수신신호 간 연관성이 줄어들기 때문에 추적 정확도가 높아지게 된다. 하지만 단일대역 레이더에서는 사용할 수 있는 대역폭에는 한계가 있으므로, 기존의 X-대역 레이더에 적용할 수 있는 수준인 800 MHz의 대역폭에서 400 MHz 간격의 3개의 주파수를 사용하여 모의실험을 수행하였다. 그림 5에서는 사용된 3개의 주파수에서의 측

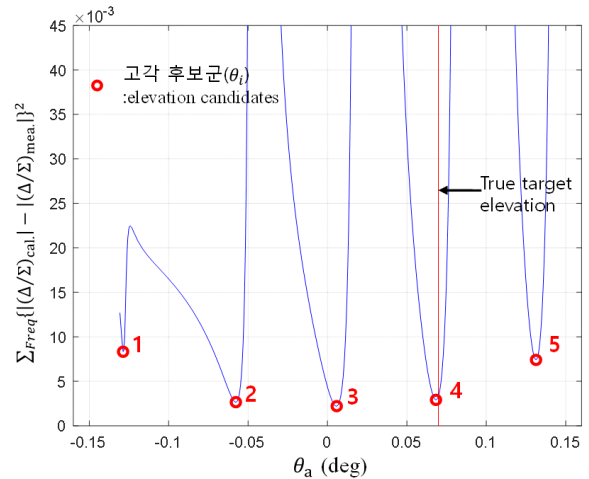


그림 5. 주파수별 측정 신호비와 계산 신호비의 차의 제공의 합

Fig. 5. Sum of squared difference between measured and calculated monopulse ratios for each frequency.

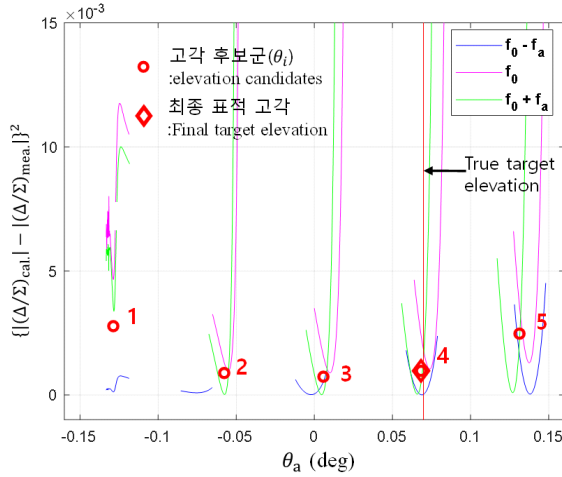


그림 6. 주파수별 측정 신호비와 계산 신호비의 차의 제곱

Fig. 6. Squared difference between measured and calculated monopulse ratios for each frequency.

정 신호비와 계산 신호비의 차의 제곱의 합( $\sum_{Freq} \{ |(\Delta/\Sigma)_{cal}| - |(\Delta/\Sigma)_{mea}| \}^2$ )을 보여준다. 붉은색 세로선은 실제 표적의 고각을 의미하며, 붉은색 원 표시는 전역 최소값을 포함한 작은 신호비 차의 제곱의 합을 갖는 5개의 극소값( $E_i$ )을 의미한다. 그림 5로부터 5개의 극소값을 갖는 표적 고각 후보군( $\theta_i$ ) 중 실제 표적의 고각과 인접한 후보 각 4번이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 실제 표적의 고각과 인접한 4번은 잡음의 영향으로 전역 최소값을 갖는 각도가 아니기 때문에, 신호비 차의 제곱의 합이 최소값을 갖는다는 특징만으로 표적의 고각을 결정하게 되면 3번 후보각이 최종 선택되어 큰 오차가 발생하게 된다. 따라서 실제 표적 고각에서는 두 번째 주파수 공통 특징인 실제 표적 고각에서 각각의 주파수에서의 계산 결과가 극소값을 갖는다는 특징을 이용하여 잡음으로 인한 오차 발생을 최소화해주는 과정이 필요하다. 그림 6은 주파수별 측정 신호비와 계산 신호비의 차의 제곱을 보여주며, 붉은색 마름모 표시는 최종 선택된 표적의 고각을 의미한다. 그림 6의 결과로부터 실제 표적의 고각과 가장 근접한 각도가 잘 선택된 것을 확인할 수 있는데, 이것은 신호비 차 제곱의 극소값인  $E_i$ 가

4번보다 작은 2번과 3번의 경우, 주파수별 극소값을 갖는 각도( $\theta_i^{Freq}$ )의 표준 편차( $\sigma_i$ )가 4번에 비해 매우 커서 그림 3의 비용함수에 의해 탈락했기 때문이다. 이것으로  $E_i$ 와  $\theta_i^{Freq}$ 의 표준편차인  $\sigma_i$ 로 구성된 비용함수를 이용하여 주 빔 내에 간섭 신호가 존재하는 다중경로 환경에서 표적의 고각 추적 정확도를 높이는 방법을 확인하였다.

그림 7은 그림 2와 같은 조건에서 수행한 잡음이 없는 상태에서 기존 모노펄스 방법의 표적 고각 추적 오차이며, 그림 8은 동일한 조건에서 잡음을 추가하여 1,000회 반복 Monte Carlo 모의실험을 통해 계산한 전체 거리에서의 평균 제곱근 오차를 보여준다. 모의실험은 신호대잡음비가 20 dB, 30 dB, 40 dB인 3가지 경우에서 수행하였다. 잡음이 없는 조건임에도 불구하고, 1° 이상의 오차를 보여주는 그림 7의 기존 모노펄스 방법과 비교하면, 제안 방법은 잡음이 추가되었음에도 훨씬 높은 정확도를 보이는 것을 확인할 수 있다. 제안 방법은 잡음의 수준이 매우 높은 신호대잡음비 20 dB 조건에서도 전체 구간에서 0.17° 이내의 오차를 보이며, 특히 신호대잡음비가 40 dB인 조건에서는 최초 탐지거리인 14 km부터 시작하여 전체 표적 거리에서 0.04°

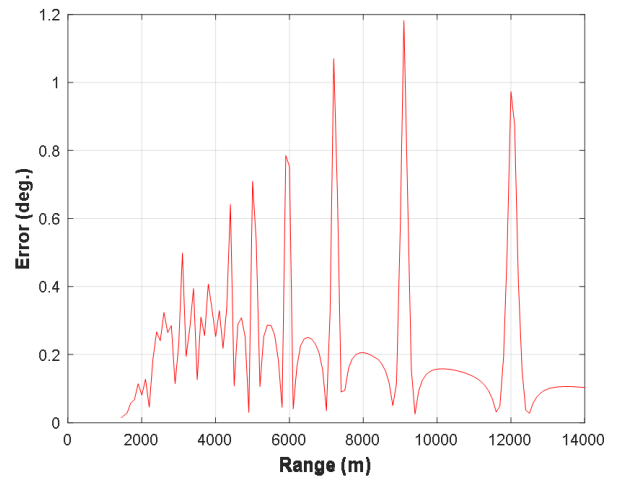


그림 7. 잡음이 없는 상태에서 기존 모노펄스 방향 탐지 방법의 오차

Fig. 7. Error of conventional monopulse direction detection method without noise.



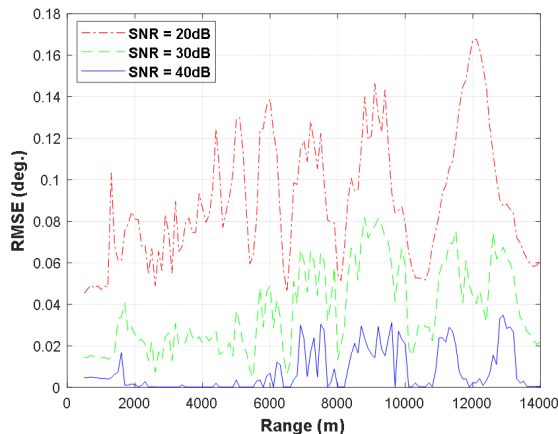


그림 8. 평균 제곱근 오차 (1,000회 반복 수행)  
Fig. 8. Root mean square error (1,000 iterations).

이내의 우수한 추적 정확도를 보여준다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 주 빔 내에 간섭이 존재하는 다중 경로 환경에서 모노펄스 방향 탐지 방법의 고각 추적 정확도를 개선하는 방법을 제안하였다. 제안 방법은 3개의 인접한 주파수에서 측정된 모노펄스 신호비와 다중경로 간섭 신호를 포함하여 계산한 신호비를 비교하여 표적의 고각 후보군을 지정하고, 간섭 신호를 포함한 신호비의 특징을 기반으로 비용함수를 설정하여 최종 표적 고각 결정에 사용한다. 400 MHz 간격의 3개의 X-대역 주파수를 사용한 모의실험으로 제안 방법이 저고도 해상표적의 추적 정확도를 크게 개선할 수 있음을 입증하였다. 또한, 제안 방법은 모노펄스 방향 추적 방법을 사용하는 기존의 레이더 시스템에 별도의 추가 구성없이 간단하게 적용할 수 있기 때문에 다중경로에 취약한 삼면이 바다로 둘러싸인 한국의 환경에서 저고도 해상표적의 탐지정확도를 향상하는 데 도움이 될 것을 기대한다.

#### References

[1] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter

estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.

[2] T. Shan, M. Wax, and T. Kailath, "On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 34, no. 4, pp. 806-811, Aug. 1985.

[3] S. U. Pillai, B. H. Kwon, "Forward/backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 37, no. 1, pp. 8-15, Jan. 1989.

[4] C. Qi, Z. Chen, Y. Wang, and Y. Zhang, "DOA estimation for coherent sources in unknown nonuniform noise fields," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 43, no. 3, pp. 1195-1204, Jul. 2007.

[5] A. Jaffer, "Maximum likelihood direction finding of stochastic sources: A separable solution," in *Proceedings of the 1988 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, New York, NY, Jul. 1988, pp. 2893-2896.

[6] A. Sinha, Y. Bar-Shalom, W. Blair, and T. Kirubarajan, "Radar measurement extraction in the presence of sea-surface multipath," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 550-567, Apr. 2003.

[7] M. Djedou, A. Belouchrani, and S. Aouada, "Maximum likelihood angle-frequency estimation in partially known correlated noise for low-elevation targets," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, no. 8, pp. 3057-3064, Aug. 2005.

[8] M. D. Skolnik, *Radar Handbook*, New York, NY, McGraw-Hill, 1990.

[9] S. E. Lipsky, *Microwave Passive Direction Finding*, Raleigh, NC, John Wiley and Sons, 1987.

[10] D. Park, E. Yang, S. Ahn, and J. Chun, "Adaptive beamforming for low-angle target tracking under multipath interference," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 4, pp. 2564-2577, Oct. 2014.

- [11] D. C. Livingston, *The Physics of Microwave Propagation*, 1st ed. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1970.
- [12] L. V. Blake, *Radar Range-Performance Analysis*, vol. 1, Norwood, MA, Artech House, 1986.
- [13] S. J. Wu, A. Fung, "A theory of microwave apparent temperature over the ocean," NASA, Washington, DC, NASA Contractor R-2329, 1973.
- [14] D. Y. Northam, "A stochastic simulation of low grazing angle, forward scatter, over-water multipath effects," Naval Research Laboratory, Washington, DC, NRL Report 5658, Dec. 1981.
- [15] S. Kingsley, S. Quegan, *Understanding Radar Systems*, Raleigh, NC, SciTech, 1999.
- [16] D. E. Kerr, *Propagation of Short Radio Waves*, New York, NY, McGraw-Hill, 1964.
- [17] J. I. Bowditch, *American Practical Navigator*, 2nd ed. Defense Mapping Agency Hydrographic Center, 1920.
- [18] R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Norwood, MA, Artech House Boston, 2005.

이 창 현 [LIG 넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0297-2204>



2013년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)  
 2015년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 2020년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학박사)  
 2020년 1월~현재: LIG 넥스원(주) 선임연

구원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나, 메타구조 안테나, 능동 위상 배열 안테나 시스템 등

박 종 국 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5834-9238>



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2001년 8월: 서울대학교 전자컴퓨터공학부 (공학박사)  
 2001년 11월~현재: LIG 넥스원(주) 수석

연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 안테나 시스템, 다기능 레이더 시스템, 적응형 빔 형성 및 전자파 수치해석 등

전 상 미 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4047-8474>



1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)  
 2006년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)  
 2006년 5월~현재: LIG 넥스원(주) 수석연구원

[주 관심분야] 안테나 및 능동 위상 배열 레이더, 다기능 레이더 시스템 설계 등

나 형 기 [LIG 넥스원/연구위원]

<https://orcid.org/0000-0002-3031-8998>



1991년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)  
 1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)  
 1996년 1월~현재: LIG 넥스원(주) 연구위원

원

[주 관심분야] 레이더, 안테나 등



김 상 현 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2923-1788>



2002년 2월: 한국항공대학교 항공우주공학  
학과 (공학사)

2017년 2월: 고려대학교 국방기술경영학  
과 (공학석사)

2007년 4월~현재: LIG 넥스원(주) 수석연  
구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 안테나, 체  
계설계, 사격통제체계, 구동장치, 진동/충격/소음 등