

## 다중경로 상황에서의 전파 인자 기반 고각 추정 알고리즘 선택기법

# Propagation Factor Based Elevation Estimation Algorithm Selection Method in Multipath Situation

권대현\*

국방과학연구소 항공기레이다체계단

Daihyun Kwon\*

Aircraft Radar system PMO, Agency for Defense Development, Daejeon, 34186, Korea

### [요약]

본 논문은 레이다로 다중경로 상황에서 고각 추정을 할 때 고각 추정 오차가 커지는 문제를 극복하기 위한 방법을 제시하였다. 다중경로 상황이란, 동일한 표적에서 반사된 레이다의 수신신호가 여러경로에서 오는 것을 의미한다. 다중경로 상황이 아닐 때는 모노펄스 방식이 정확하고, 그 반대 상황이면 최소 제곱 오차 추정 방식이 정확하다. 다중경로 상황이면서 고각이 매우 낮은 경우, 최소 제곱 오차 추정이 발산하는 특이 경우가 발생한다. 이 특이경우를 전파 인자 기반으로 판별하여, 모노펄스와 최소 제곱 오차 추정 방식을 선택적으로 운용했다. 그 결과, 고각 추정의 정확도를 높이는 데 성공했다. 본 논문에서 제안한 방법을 검증하기 위하여 매트랩 시뮬레이션을 수행했다.

### [Abstract]

This paper presents a method to overcome the problem of increasing elevation estimation error when estimating elevation in a multipath situation with radar. A multipath situation means that radar reception signals reflected from the same target come from multiple paths. In non-multipath, the monopulse method is accurate. For the opposite case, the least square error method is accurate. In multipath situation and when the elevation angle is very low, a singular occurs where the least square error estimate diverges. This singular was identified based on the propagation factor, and monopulse and least square error estimation methods were selectively used. As a result, we succeeded in increasing the accuracy of elevation estimation. MATLAB simulations were performed to verify the method proposed in this paper.

**Key word** : Radar, Propagation factor, Multipath, Elevation estimation, Least square error.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.2.172>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 19 March 2024; Revised 24 April 2024

Accepted (Publication) 27 April 2024 (30 April 2024)

\*Corresponding Author; Daihyun Kwon

Tel: +82-42-821-2971

E-mail: daihyunkwon@add.re.kr

## 1. 서론

레이더는 전파를 방사하고, 표적에 반사된 수신신호로부터 표적의 위치와 도플러 속도를 측정하는 센서이다. 3차원 레이더는 표적의 위치로써 거리, 방위각, 고각을 측정 할 수 있다. 거리는 펄스 압축, 도플러는 도플러 처리를 통하여 측정 할 수 있다. 모노펄스 레이더는 방위각과 고각을 모노펄스 방식으로 측정한다. 모노펄스 방식은 방위 방향과 고각 방향 각각에 대하여, 합 빔과 차 빔의 기울기를 기반으로 각도를 추정한다. 즉, 모노펄스는 수신 신호의 크기 값을 사용 한다[1].

다중경로 상황은 표적에서 반사된 수신 신호가 여러 경로로 들어오는 것을 의미한다. 예를 들어, 바닥면과 가까이 위치한 저고도 표적은, 표적에서 반사된 신호가 레이더로 직접 수신될 경우와 표적에 반사되고 나서 바닥면에 반사된 다음 레이더로 간접 수신되는 두 가지 경우가 발생한다. 이 신호들을 각각 직접경로의 신호와 간접경로의 신호라고 할 때, 수신 신호는 두 신호의 합이다. 두 수신 신호는 전파이므로 위상을 가지고 있다. 위상이 일치하면 보강 간섭이 발생하여 수신 신호의 크기가 커진다. 반면에, 위상이 반대면 상쇄 간섭이 발생하여 수신 신호의 크기가 작아진다[2]. 즉, 다중경로 상황에서는 수신 신호의 크기가 더 커지거나 더 작아지므로 수신 신호 크기 값을 사용하는 모노펄스 고각 측정 값이 왜곡되게 된다.

최소 제곱 오차 기반으로 고각을 추정하여 다중경로 상황에서 성공적으로 고각을 추정한 연구들이 있다[3]-[5]. 레이더의 수신 신호를 직접 경로의 신호와 간접 경로의 신호의 합으로 모델링하고, 수신 신호의 측정 값과 추정 값의 오차가 최소가 되도록 하는 최적화 문제를 푸는 방식이다[3]. 다만, 다중경로 상황이면서 고각이 매우 낮아지면 최소 제곱 오차 방식의 특이경우가 되고 고각 추정이 발산하는 문제가 발생한다[4].

최소 제곱 오차 추정의 특이경우를 판별하기 위하여 에너지 함수 값의 패턴을 이용한 연구가 있다[5]. 해당 논문에서는 특이 경우 일 때 에너지에 십자 형태의 패턴이 나타나므로, 십자 형태를 판별하는 방식을 제시하였다. 이 연구는 신호처리 단계에서 에너지 함수의 패턴을 파악하고, 여러 스캔의 고각 추정 값들에 지수 평활화 (exponential smoothing) 기법을 적용하므로 단일 스캔에서는 적용이 불가능 하다. 레이더 처리 단계는 신호처리와 통제로 구분되며, 신호처리는 버스트와 드웰, 통제는 드웰과 스캔 그리고 추적필터로 구성된다. 레이더 신호처리의 관점에서 실시간성이 보장되려면, 신호처리 단계인 버스트에서 판단을 할 수 있어야 하는데, 이 연구는 통제의 스캔 그것도 여러 스캔으로 데이터 처리를 수행하므로 신호처리 관점에서 비 실시간성이다.

전파 인자 (propagation factor)란 다중경로 효과로 수신 신호가 왜곡되는 정도를 나타낸 값이다. 자유공간에서의 수신신호 크기 대비, 다중경로 환경에서의 수신신호 크기의 비로 정의 된다[6]. 이때, 모노펄스 추정이 수신신호의 크기 값을 사용하므로, 전파 인자를 기반으로 모노펄스 추정이 왜곡 되는 패턴을

예측할 수 있다.

본 논문에서는 전파 인자를 기반으로 최소 제곱 오차의 특이 경우를 판별하였다. 즉, 제안한 방식은 신호처리 단계인 버스트에서 수행이 가능하므로 신호처리 관점에서 실시간 알고리즘이다. 따라서, 신호처리 관점에서 비 실시간 알고리즘이라는 선행연구의 단점을 극복하였다.

## II. 선행 연구

본 연구에서 제안한 고각 추정 방법은 전파 인자를 판별적으로 사용하여 모노펄스 각도 추정 알고리즘과 최소 제곱 오차 각도 추정 알고리즘을 선택적으로 운용하는 방식 이다. 본 연구를 이해하기 위한 선행연구들을 아래와 같이 서술 하였다.

### 2-1 다중경로 현상과 전파 인자

다중경로 현상이 발생하는 상황에서 안테나 수신 모델은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다[3]. 선 배열 안테나가 다중 수신 빔으로 신호를 수신 하고 있다. 표적에서 반사 된 신호가 안테나에 들어오는 직접 경로의 신호와 바닥면에서 반사되어 안테나로 들어오는 간접 경로의 신호가 발생한다.

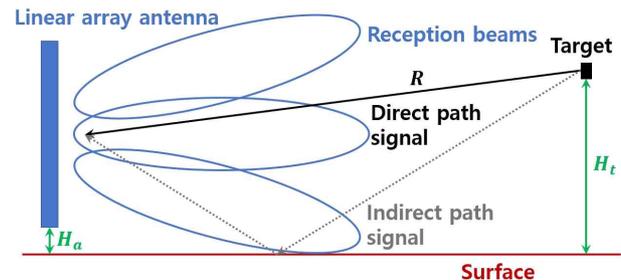


그림 1. 다중경로 상황에서의 안테나 신호 수신 모델  
Fig. 1. Antenna reception model in multipath situation.

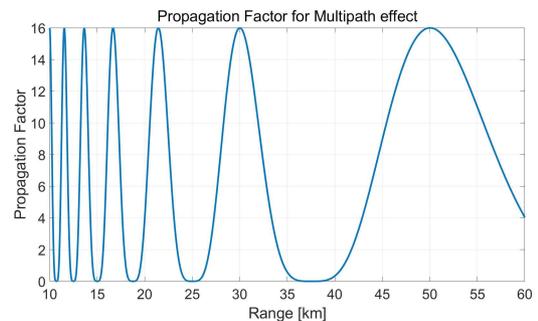


그림 2. 거리에 따른 전파 인자 그래프  
Fig. 2. Propagation factor graph according to range.

이때, 레이더의 파장은  $\lambda$ , 안테나의 높이는  $H_a$ , 표적의 높이는  $H_t$ , 거리는  $R$ 일 때 전파 인자는 식 (1)과 같다[6].

$$PF = 16 \sin^4 \left( \frac{2\pi H_a H_t}{\lambda R} \right) \quad (1)$$

그림 2는 전파 인자 그래프의 예시이다. 전파 인자가 1이면 다중경로 현상이 없는 것을 의미한다. 전파 인자가 1보다 크면 보강 간섭에 의하여 수신 신호 크기가 강해지고, 반대의 경우엔 수신 신호 크기가 약해진다.

### 2-2 최소 제곱 오차 각도 추정

최소 제곱 오차 각도 추정은 수신 신호의 측정 값과 추정 값 간 오차의 제곱이 최소 일 때, 직접 경로의 고각과 간접 경로의 고각을 동시에 구하는 알고리즘 이다[4]. 안테나 수신 모델에 기반하여, 빔 형성 행렬을  $M_B$ , 빔 조향 행렬을  $M_S$ , 수신 신호의 복소 포락선을  $\mathbf{s}$ 라고 하면 수신 신호의 추정 값은 식 (2)와 같다.

$$\hat{\mathbf{x}} = M_B M_S \mathbf{s} = \mathbf{M} \mathbf{s} \quad (2)$$

또한, 수신 신호의 측정 값을  $\mathbf{x}$ 라고 하면, 추정 오차의 제곱이 최소가 되도록 하는 최적화 식을 하단의 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 이때,  $\| \cdot \|$  는 벡터의 크기 이다. 또한,  $\theta_\alpha$  는 직접 경로의 고각이며  $\theta_\beta$  는 간접 경로의 고각을 의미한다.

$$\min_{\theta_\alpha, \theta_\beta, \mathbf{s}} \| \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x} \|^2 \quad (3)$$

수식 (3)에서  $\mathbf{s}$ 에 대한 최적해는 Zero-forcing으로 구할 수 있다. 그 최적해는 다음 식과 같다[5]. 이때,  $( \cdot )^H$ 는 행렬의 복소 전치이며  $( \cdot )^{-1}$ 는 역행렬이다.

$$\mathbf{s}_{\min} = (M^H M)^{-1} M^H \mathbf{s} \quad (4)$$

수식 (3)에 수식 (2)와 수식 (4)를 전부 대입하여 정리하면 하단의 최적화 식 (5)로 정리 할 수 있다. 이때,  $N_B$ 는 다중 수신 빔의 개수 이며,  $I_{N_B}$ 는  $N_B$ 크기의 단위행렬이다.

$$\min_{\theta_\alpha, \theta_\beta} \mathbf{x}^H L \mathbf{x} \quad (5)$$

$$L = I_{N_B} - M(M^H M)^{-1} M^H$$

수식 (5)를 최소화 하는  $\theta_\alpha$ 가 추정 된 고각 이다.

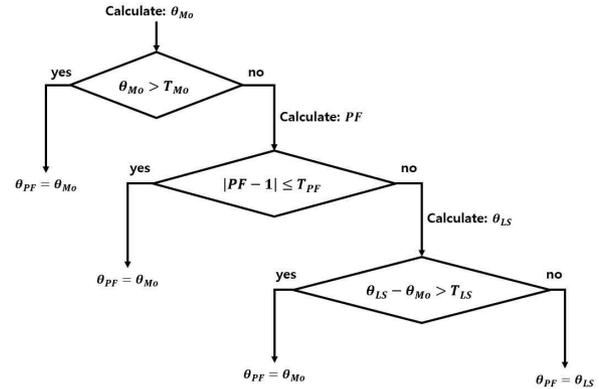


그림 3. 제안된 알고리즘  
Fig. 3. The proposed algorithm.

## III. 제안된 알고리즘

### 3-1 전파 인자 기반 고각 추정 알고리즘 선택기법

제안된 알고리즘은 전파 인자의 값을 기반으로 고각 추정 알고리즘을 선택적으로 사용하는 기법이다.  $\theta_{PF}$ 는 제안된 알고리즘으로 추정된 고각,  $\theta_{Mo}$ 는 모노펄스로 측정된 고각,  $\theta_{LS}$ 는 최소 제곱 오차로 추정된 고각 이다. 구체적으로는 그림 3과 같다. 그림 3의 윗 부분부터 보면  $\theta_{Mo} > T_{Mo}$  이면 표적 고도가 충분히 높아서 다중경로의 영향이 무시 가능한 수준이다. 따라서, 이 경우에는  $\theta_{Mo}$ 를 사용한다. 그 반대의 경우에는 전파 인자를 계산하여, 전파 인자의 값이 1과 가까우면  $\theta_{Mo}$ 를 사용한다. 그렇지 않을 경우에는  $\theta_{LS} - \theta_{Mo} > T_{LS}$ 이면  $\theta_{Mo}$ 를 사용한다. 그렇지 않을 경우는  $\theta_{LS}$ 를 사용한다. 전파 인자는 표적의 고도 값을 필요로 하므로, 고도 값은 추정된 고각 값과 표적의 거리 값으로 계산한다.

### 3-2 임계값 설정

그림 3은 세 가지 조건문으로 구성되어 있고, 그에 따라 세 가지 임계값을 가지고 있다. 세 가지 임계값을 구하기 위하여 이진 탐색 (binary search)를 사용하였다. 입력된 파라미터 값에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 고각 오차가 적은 파라미터를 찾았다. 그 결과,  $T_{Mo} = 3.15^\circ$  이며, 다중경로가 발생하지 않는 조건을 의미한다.  $T_{PF} = 0.1326^\circ$  이며, 다중경로의 영향이 적은 조건을 의미한다. 수식 (1)의 전파 인자 정의에 따라서 전파 인자 값이 1과 가까울 때 다중경로 영향이 적으므로  $\theta_{Mo}$ 이 정확하기 때문이다. 마지막으로  $T_{LS} = 0.4844^\circ$  이며,  $\theta_{LS}$ 가 특히 경우 일 때 발산하여 값이 커지므로 그 경우에는  $\theta_{Mo}$ 를 대신 사용한다. 반대의 경우에는  $\theta_{LS}$ 가 정확하므로  $\theta_{LS}$ 를 사용한다.

표 1. 시뮬레이션 표적 시나리오

Table 1. Simulated target scenario.

	Start	End
Range[km]	60	10
Velocity[m/s]	300	300
Height1[m]	100	100
Height2[m]	125	125
Height3[m]	150	150
SNR1[dB]	15	-
SNR2[dB]	20	-
SNR3[dB]	25	-
SNR4[dB]	30	-
SNR5[dB]	35	-

#### IV. 시뮬레이션 결과

##### 4-1 시뮬레이션 환경 및 설정

저고도의 접근 비행 표적을 가정하여 표 1과 같이 표적 시나리오를 설정하였다. 레이더로부터 60km 거리에서 10 km 까지 속도 300 m/s로 근접한다. 표적의 고도는 100 m, 125 m, 150 m의 세 종류이다. 각각의 고도 별로 표적의 SNR은 15dB, 20 dB, 25 dB, 30 dB, 35 dB의 다섯 종류를 시뮬레이션 하였다. 즉, 총 열 다섯 종류의 시뮬레이션을 수행하였다. 수신되는 잡음은 랜덤 가우시안 잡음을 가정하였다.

##### 4-1 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 시뮬레이션 시나리오는 고도 별 세 종류, SNR별 다섯 종류로 총 열 다섯가지 경우이다. 열 다섯가지 경우 중 다음과 같은 두 가지 경우에 대하여 거리에 따른 고각 추정 결과 그래프를 나타내었다.

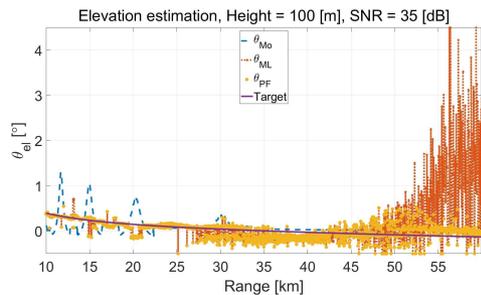


그림 4. 표적 고도 100m, SNR 35 dB의 고각 추정 결과  
Fig. 4. Elevation estimation result for target altitude at 100 m and SNR 35 dB.

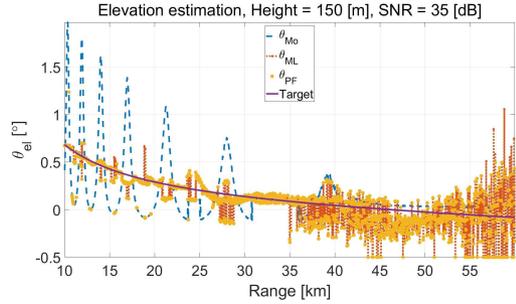


그림 5. 표적 고도 150 m, SNR 35 dB의 고각 추정 결과  
Fig. 5. Elevation estimation result for target altitude at 150 m and SNR 35 dB.

그림 4-5에서 파란 점선이  $\theta_{Mo}$ , 붉은 실선에 ‘x’ 마커가  $\theta_{LS}$ , 노란색 실선에 ‘o’ 마커가 제안된 알고리즘인  $\theta_{PF}$ 이다. 그림 4는 고도 100 m, SNR 35 dB의 고각 추정 그래프이며, 그림 5은 고도 150 m, SNR 35 dB의 고각 추정 그래프이다.

그림 4와 그림 5 두 경우 모두 모노펄스 고각이  $T_{Mo}$ 보다 작은 경우이다. 따라서, 그림 3 기준 위에서 첫 번째 조건문의 ‘no’에 해당한다.

그림 4에서 거리 35 km초과 일 때는  $\theta_{Mo}$ 의 오차가 작은 것을 볼 수 있다. 따라서, 그림 3의 두 번째 조건문에서 ‘yes’에 해당하므로,  $\theta_{PF}$ 가  $\theta_{Mo}$ 를 선택한 것을 볼 수 있다.

반면에, 그림 4에서 거리 35 km이하 일 때  $\theta_{Mo}$ 의 오차가 큰 것을 볼 수 있다. 모노펄스 오차가 클 때는 전파 인자 값이 1과 차이가 큰 경우이다. 따라서, 그림 3의 두 번째 조건문에서 ‘no’에 해당한다. 마지막으로 그림 3의 세 번째 조건문에서도 ‘no’에 해당하여  $\theta_{PF}$ 가  $\theta_{LS}$ 를 선택한 것을 볼 수 있다.

그림 5에서 거리 45 km초과 일 때는  $\theta_{Mo}$ 의 오차가 작은 것을 볼 수 있다. 따라서, 그림 3의 두 번째 조건문에서 ‘yes’에 해당하므로,  $\theta_{PF}$ 가  $\theta_{Mo}$ 를 선택한 것을 볼 수 있다.

반면에, 그림 5에서 거리 45 km이하 일 때  $\theta_{Mo}$ 의 오차가 큰 것을 볼 수 있다. 모노펄스 오차가 클 때는 전파 인자 값이 1과 차이가 큰 경우이다. 따라서, 그림 3의 두 번째 조건문에서 ‘no’에 해당한다. 마지막으로 그림 3의 세 번째 조건문에서도 ‘no’에 해당하여  $\theta_{PF}$ 가  $\theta_{LS}$ 를 선택한 것을 볼 수 있다.

제안된 알고리즘의 성능을 정량적으로 평가하기 위하여, RMSE (root mean square error)를 사용하였다.  $\theta_{PF}$ 의 RMSE는  $RMSE_{The\ proposed}$ 이고,  $\theta_{Mo}$ 의 RMSE는  $RMSE_{Mo}$ 이며,  $\theta_{LS}$ 의 RMSE는  $RMSE_{LS}$ 이다.

그림 6-8은 제안된 알고리즘, 모노펄스, 최소 제곱 오차의 RMSE를 표적 고도와 SNR별로 비교한 그래프들이다. 파란 점선이  $RMSE_{Mo}$ , 붉은 실선에 ‘x’ 마커가  $RMSE_{LS}$ , 노란색 실선에 ‘o’ 마커가  $RMSE_{The\ proposed}$ 이다. 제안된 알고리즘이 기존의 두 가지 알고리즘 보다 RMSE가 작아서 성능이 좋은 것을 볼 수 있다.

RMSE값을 정량적으로 비교하기 위하여 아래와 같이 상대적인 RMSE를 정의하였다.

$$RMSE_{|Mo} = \frac{|RMSE_{Theproposed} - RMSE_{Mo}|}{RMSE_{Mo}} \quad (6)$$

$$RMSE_{|LS} = \frac{|RMSE_{Theproposed} - RMSE_{LS}|}{RMSE_{LS}}$$

또한, 본 논문의 열 다섯 종류의 시나리오에 대하여 상대적인 RMSE를 평균 내어 모든 시나리오에 대하여 제안된 알고리즘이 얼마나 성능이 높은지 비교하였다.

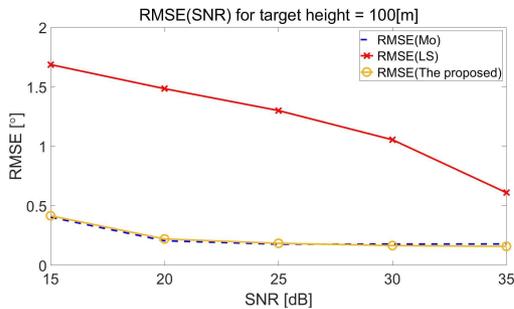


그림 6. 표적 고도 100 m의 RMSE 결과  
 Fig. 6. RMSE result for target altitude at 100 m.

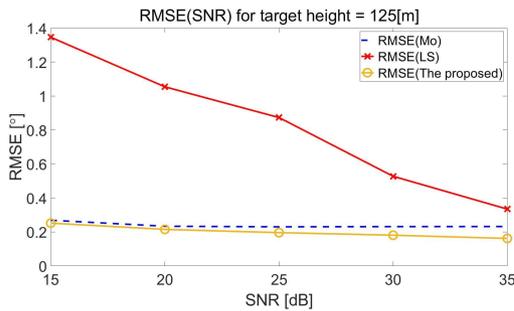


그림 7. 표적 고도 125 m의 RMSE 결과  
 Fig. 7. RMSE result for target altitude at 125 m.

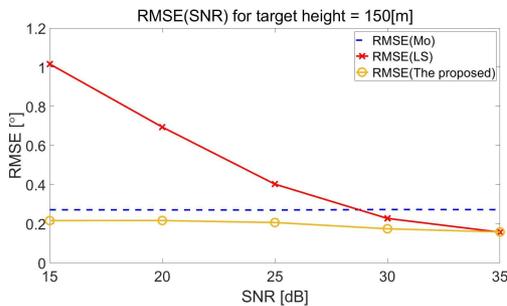


그림 8. 표적 고도 150 m의 RMSE 결과  
 Fig. 8. RMSE result for target altitude at 150 m.

표 2. 상대적인 RMSE의 기댓값들

Table 2. The expectation of relative RMSEs.

Expectation of RMSE	Value
$E(RMSE_{ Mo})$	25.86%
$E(RMSE_{ LS})$	72.69%

따라서, 제안한 알고리즘은 모노펄스에 비하여 25.86% 높은 성능을 보였고, 최소 제곱 오차에 대하여 72.69% 높은 성능을 보였다. 최소 제곱 오차는 저고도 표적 일 때 특이경우가 되어 발산하는 문제가 있으므로, 최소 제곱 오차에 비하여 상대적으로 더 크게 성능이 향상되는 것을 확인 할 수 있었다.

### V. 결론

본 논문은 다중경로 상황에서 레이다로 저고도 표적의 고각을 추정할 때, 전파 인자를 기반으로 모노펄스와 최소 제곱 오차 알고리즘을 선택적으로 운용하는 방안을 제시하였다. 제안한 알고리즘은 MATLAB 시뮬레이션으로 검증하였고, 정량적인 성능평가를 위하여 RMSE를 계산 후 알고리즘 간 상대적인 RMSE 값의 평균 값으로 알고리즘 간 성능을 비교하였다.

다만, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 한계점으로써 레이다의 최소 스캔 시점에서  $\theta_{LS}$ 가 특이경우라서 발산 할 경우에 최초 스캔의 표적 고각이 부정확하다는 문제가 있다. 왜냐하면, 제안한 알고리즘은 전파 인자 값으로 특이 경우를 회피 하는데, 전파 인자 값을 계산하려면 고도 값이 필요하고 고도 값을 계산하려면 고각 추정값이 필요하기 때문이다. 즉, 특이 경우를 회피하려고 전파 인자를 계산하는데 고각 추정 값이 발산하면 계산된 전파인자 값이 왜곡된다는 문제가 있다.

문제가 없으려면, 그림 3에서  $\theta_{Mb} > T_{Mb}$  일 때  $\theta_{Mb}$  값으로 표적의 고도를 계산할 수 있다. 고도 값이 전파 인자를 계산하는데 필요하므로 이 경우는 문제가 없다. 반면에,  $\theta_{Mb} \leq T_{Mb}$  이면 전파 인자를 계산할 필요가 있다. 이 경우 전파 인자를 계산하려면 고각 추정값이 필요하다. 그러나,  $\theta_{Mb} \leq T_{Mb}$ 의 조건에서는 다중경로 현상이 발생하여  $\theta_{Mb}$ 가 부정확하므로,  $\theta_{LS}$ 를 사용하면 된다. 그런데 만약에,  $\theta_{LS}$ 가 특이 경우에 놓여 발산할 경우  $\theta_{LS}$ 가 오히려 더 부정확해지는 문제가 있다.

본 논문에서는 최초 스캔에서 고각을 추정하여 고도 값을 구하고 두 번째 스캔부터는 첫 번째 스캔에서 추정한 고도 값으로 전파 인자를 계산하여 특이 경우를 회피 하는데 성공 했으나, 여전히 최초 스캔 시점에서  $\theta_{LS}$ 가 특이 경우라서 발산할 경우는 해결하지 못하였고, 이 부분이 추후 연구를 통하여 극복해야 할 점이다.

## Acknowledgments

본 연구는 2024년도 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임.

## References

- [1] M. A. Richards, J. Scheer, W. A. Holm and W. L. Melvin, *Principles of Modern Radar Vol. I: Basic Principles*, New York, NY: SciTech Publishing, 2010.
- [2] W. D. White, "Low-angle radar tracking in the presence of multipath," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 6, pp. 835-852, Nov, 1974.
- [3] M. D. Zoltowski and T. S. Lee, "Maximum likelihood based sensor array signal processing in the beamspace domain for low angle radar rtracking," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 39, No. 3, March, 1991.
- [4] K. S. Kim, M. S. Chung, and C. S. Jung, "Hybrid compensation technique on low elevation angle errors for multibeam surveillance radar in multipath environment," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 365-372, Jun, 2013.
- [5] D. Kwon, H. Ko, S. Hong, B. L. Cho, K. S. Kim and C. H. Kim, "Research of selective exponential smoothing method for estimating low-altitude target elevation in marine multipath environment," *Journal of Korea Institute of Information Technology*, Vol. 20, No. 9, pp. 115-123, Sep. 2022.
- [6] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis And Design Using Matlab*, 2nd ed. New York, NY: Chapman and Hall/CRC, 2000.



### 권 대 현 (Daiyun Kwon)

2014년 2월: 한양대학교 전기공학과 (공학사)  
 2016년 2월: KAIST 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 2016년 2월 ~ 2016년 7월: KAIST 위축연구원  
 2018년 5월 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원  
 ※ 관심분야 : 레이더, 신호처리, 성능분석