

## 2차원 레이더 간섭계에서 각도 추정 알고리즘의 각도 모호성 해소 성능 비교

### Performance Comparison to Solve Angle Ambiguity Needed to Angle of Arrival Estimation in 2D Radar Interferometer

조병래 · 이정수 · 이종민 · 선선구

Byung-Lae Cho · Jung-Soo Lee · Jong-Min Lee · Sun-Gu Sun

#### 요 약

2차원 레이더 간섭계에서 표적의 공간 도달 각도를 추정하는 방법 중에서 1차원 알고리즘과 디지털 빔 포밍 알고리즘, 위상차의 최소 자승 오차 알고리즘들의 각도 모호성 해소 성능을 비교한다. 위상 비교 모노 펄스 알고리즘의 경우, 2차원 레이더 간섭계에 적용하기 위해 방위각 방향과 고각 방향으로 각각 적용하였다. 성능 비교를 위해 Monte carlo 시뮬레이션 방법을 이용하여 2차원 레이더 간섭계에서 각도 추정 알고리즘 별 각도 모호성 해소 확률과 수행 시간을 비교하였다. 각도 모호성 해소 확률과 수행 시간을 고려할 때 위 여러 방법 중에서 위상 비교 모노 펄스 알고리즘이 실시간 신호 처리 분야에 가장 효율적임을 보여준다.

#### Abstract

This study describes the performance comparison to solve angle ambiguity needed to angle of arrival estimation in 2D radiometer. There are three algorithms to solve its ambiguity such as phase-comparison monopulse method, digital beam-forming method and least square error of the phase difference in 2D radar interferometer. To estimate two direction angles, phase-comparison monopulse method is sequentially applied to azimuth and elevation direction. To analyze the performance of these methods, probability of solving angle ambiguity and execution time have been chosen as performance indexes. Through the Monte Carlo simulation, we have verified that phase-comparison monopulse method is most effective in real-time signal processing application.

Key words : 2D Radar Interferometer, Phase-Comparison Monopulse, Digital Beam-Forming, Least Square Error, Angle of Arrival Estimation

#### I. 서 론

마이크로웨이브를 이용하여 방향 탐지하는 방법에는 모노 펄스, 빔 포밍, 레이더 간섭계, 회전식 안테나 시스템 등이 있다<sup>[1]</sup>. 이 중 레이더 간섭계는 한 개의 송신기와 2개 이상의 수신기를 이용하여 표적의 위치를 추출하는 시스템이다. 송신기에서 송신된

신호가 표적을 맞고 2개 이상의 안테나에 수신될 경우 표적에서 안테나까지의 거리에 따른 경로차에 의해 발생된 위상차를 이용하여 도달 각도를 계산한다. 경로차에 의해 발생하는 위상차는 두 안테나 사이의 거리차에 의해  $2\pi$  간격으로 모호성이 발생하게 된다<sup>[1]</sup>. 두 안테나 사이의 거리가 좁으면 모호성이 없지만 해상도가 좋지 않고, 거리가 멀면 해상도

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 4, 2012 ; Revised February 9, 2012 ; Accepted February 13, 2012. (ID No. 20120104-002)

· Corresponding Author : Sun-Gu Sun (e-mail : sgsun@add.re.kr)

가 좋아지지만 모호성이 발생한다. 이 모호성을 해소하기 위해서는 두 안테나 사이의 거리를 반 파장보다 작게 하는 방법, 관측 범위를 제한하는 방법, 3개 이상의 안테나를 이용하는 방법이 있다<sup>[1]</sup>.

보통의 2차원 레이더 간섭계는 ‘+’자 형태로 5개의 안테나를 이용하여 방위각 및 고각 방향으로 도달 각도를 추정한다.

이 논문에서는 2차원 레이더 간섭계에서 표적의 공간 도달 각도를 추정하는 알고리즘을 소개하고, 알고리즘별 모호성 해소 성능을 비교할 것이다. 표적의 공간 도달 각도 추정 알고리즘은 참고문헌 [2]에서 소개한 위상 비교 모노 펄스(Phase-comparison monopulse) 알고리즘<sup>[3]</sup>과 디지털 빔 포밍(Digital Beam-Forming) 알고리즘, 위상차의 최소 자승 오차(Least Square Error) 알고리즘으로 하였다. 위상 비교 모노 펄스 알고리즘의 경우, 2차원 레이더 간섭계에 적용하기 위해 방위각 방향과 고각 방향으로 각각 적용하여 그 결과를 추출하였다. 2차원 레이더 간섭계 구조는 ‘+’형태로 하였으며, 알고리즘별로 모호성 해소 성능과 수행 시간을 비교하였다.

## II. 도달 각도 추정 알고리즘

### 2-1 위상 비교 모노 펄스 알고리즘

그림 1은 3개의 안테나를 가지는 레이더 간섭계의 동작 원리를 보여주고 있다. 3개의 안테나를 이용하는 레이더 간섭계에서는 안테나 1과 안테나 2 사이의 거리( $B_1$ )와 안테나 1과 안테나 3 사이의 거리

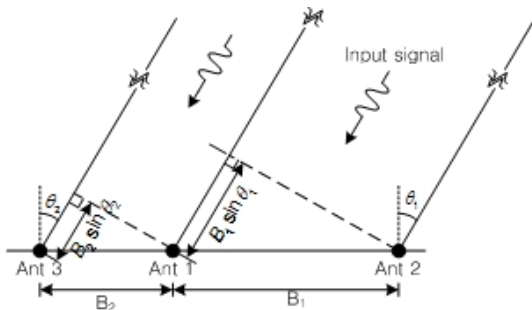


그림 1. 3개의 안테나를 가지는 레이더 간섭계의 동작 원리

Fig. 1. Principle of radar interferometer having three antennas.

( $B_2$ )는 같지 않게 설정한다. 수학적 (1)을 이용하여 표적과 안테나간 경로차에 의한 위상차는 계산할 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$\begin{aligned} \Delta\phi_1 &= \phi_2 - \phi_1 = 2\pi k_1 + \Delta\Psi_1 \\ &= -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot B_1 \cdot \sin\theta_1 \\ \Delta\phi_2 &= \phi_1 - \phi_3 = 2\pi k_2 + \Delta\Psi_2 \\ &= -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot B_2 \cdot \sin\theta_2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $B_1, B_2$ 는 안테나 사이의 거리,  $\lambda$ 는 파장,  $k_1$ 과  $k_2$ 는 모호성 정도를 나타내는 정수이다.  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$ 는 표적과 안테나 1, 2, 3 사이의 실제 위상값이고,  $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ 는 경로차에 의한 실제 위상차이다.  $\Delta\Psi_1, \Delta\Psi_2$ 는 수신기에서 측정된 위상들의 위상차이다.

모호성에 의해 발생한 상수  $k_1, k_2$ 는 수학적 (2)로부터 계산이 가능하다.

$$\begin{aligned} \sin\theta_1 &= -\frac{\lambda}{B_1} \left( \frac{\Delta\Psi_1}{2\pi} + k_1 \right) \\ \sin\theta_2 &= -\frac{\lambda}{B_2} \left( \frac{\Delta\Psi_2}{2\pi} + k_2 \right) \\ \min_{k_1, k_2} |\sin\theta_1 - \sin\theta_2| \\ k_1 &: -|B_1/\lambda| \sim |B_1/\lambda| \text{ 정수} \\ k_2 &: -|B_2/\lambda| \sim |B_2/\lambda| \text{ 정수} \end{aligned} \quad (2)$$

이렇게 모호성을 해소한 후, 표적의 도달 각도는 수학적 (3)을 통해 계산된다<sup>[2]</sup>.

$$\begin{aligned} \theta_{out} &= \sin^{-1}(w_1 \cdot \sin\theta_1 + w_2 \cdot \sin\theta_2) \\ w_1 &= B_1^2 / (B_1^2 + B_2^2), w_2 = B_2^2 / (B_1^2 + B_2^2) \end{aligned} \quad (3)$$

### 2-2 디지털 빔 포밍(Digital Beam Forming) 알고리즘

디지털 빔 포밍 알고리즘은 모든 안테나에 수신된 신호에 위상값을 조절하여 가상의 방향으로 빔을 조향한다. 이렇게 조향된 빔 중 신호의 크기가 최대인 방향이 표적의 도달 각도로 추정한다. 거리  $R_0$ 는 기준 안테나(0번째 안테나)에서 표적까지 거리이며, 기준 안테나에서 수신된 신호를 통해 계산할 수 있다.

$$\max_{u, v} |A(u, v)| \quad (4)$$

여기서

$$A(u, v) = \sum_{k=0}^4 \vec{a}_k \times \exp(-j\phi_k(u, v))$$

$a_k$ : complex signal of  $k^{th}$  antenna

$$\phi_k(u, v) = 2\pi \frac{R_k(u, v)}{\lambda}$$

$$R_k(u, v) = \sqrt{(R_0 \times u - X_k)^2 + (R_0 \times u - Y_k)^2 + R_0^2 \times (1 - u^2 - v^2)^2} \quad (5)$$

수학식 (5)에서  $R_k$ 는  $k$ 번째 안테나와 표적까지의 거리이며,  $X_k, Y_k$ 는 기준 안테나(0번째 안테나)에 대한  $k$ 번째 안테나의 방위각 방향, 고각 방향 위치이다.

### 2.3 위상차의 최소 자승 오차(Least Square Error) 알고리즘

최소 자승 오차 알고리즘은 기준 안테나(0번째 안테나)에 대한 다른 안테나(1~4번째 안테나)에 측정된 위상 차이와 예측한 위상 차이가 최소가 되는 지점을 찾는 것이다.

$$\min_{u,v} A(u, v) \quad (6)$$

여기서

$$A(u, v) = \sum_{k=1}^4 |\exp(j\Delta\phi_k(u, v)) - \exp(j\Delta\Psi_k)|^2$$

$$\Delta\phi_k(u, v) = 2\pi \frac{R_k(u, v) - R_0}{\lambda}$$

$$R_k(u, v) = \sqrt{(R_0 \times u - X_k)^2 + (R_0 \times u - Y_k)^2 + R_0^2 \times (1 - u^2 - v^2)^2}$$

$$\Delta\Psi_k = W\{\theta_k - \theta_0\}$$

$W$ : wrapping operator  $[-\pi, \pi]$

$\theta_k$ : measured phase of  $k^{th}$  antenna (7)

### III. 각도 추정 알고리즘 성능 분석

II장에서 언급한 각도 추정 알고리즘에 대하여 monte carlo 시뮬레이션 방법을 통해 각도 모호성 해소 성능을 비교하였다. 2차원 간섭계는 ‘+’형 구조로 하였으며, 표적의 거리는 100 m, 신호대 잡음비(SNR)는 15~25 dB로 하여 2,000 개의 표적 지점에 대해 수행하였다. 2차원 알고리즘에서 변수  $u, v$ 의 간격은 0.01(각도로 환산하면 약 0.57도)로 하였다. 정확도

표 1. ‘+’형 2차원 간섭계 구조에 대해 각도 모호성 해소 확률 비교.

Table 1. Probability of solving angle ambiguity in ‘+’-type 2D radar interferometer.

방법		SNR(dB)				
		15	17.5	20	22.5	25
PCM	확률 (%)	81.4	89.5	94.6	97.3	98.7
DBF		83.0	91.4	96.6	98.5	99.5
LSE		81.9	89.3	94.9	96.9	98.8

분석을 위해서는 변수  $u, v$ 의 간격을 작게 하여야 하나, 계산량이 많아지는 단점이 있다. 본 논문에서 사용한 변수  $u, v$ 의 간격은 모호성 해소 능력을 비교하는데 타당한 수준으로 결정하였다.

그림 2는 신호대 잡음비가 15 dB일 때 각도 추정 알고리즘에 따른 각도 모호성 해소 예를 보여주고 있다. 그림 2에서 푸른 색 실선은 최상의 표적 도달 각도이며, 붉은 색 점은 각 알고리즘에 따라 추정된 도달 각도이다. 표 1은 신호대 잡음비에 따른 각 알고리즘의 각도 모호성 해소 성능을 보여주고 있다. 표 2는 알고리즘별 2,000개 지점의 시뮬레이션 수행 시간을 비교하고 있다. 그림 2와 표 1의 결과에서 보듯이, 2차원 알고리즘의 경우 위상 비교 모노 펄스 알고리즘과 비교하여 모호성 해소 확률이 다소 높음을 보여주고 있다. 그러나 2차원 알고리즘의 경우 위상 비교 모노 펄스 알고리즘에 비해 약 8~11배 정도 알고리즘 수행시간이 더 걸림을 보여준다. 위상 비교 모노 펄스 알고리즘의 경우 2차원 알고리즘에 비해 모호성 해소 확률이 약 2% 정도 낮다. 그러나, 각도 모호성 해소 능력 및 수행 시간을 고려할 때 고속 표적 추적을 위한 추적 장치와 같은 실시간 신호 처리 적용 분야에서는 위상 비교 모노 펄스 알고리즘이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

표 2. 알고리즘별 수행 시간 비교

Table 2. Execution time comparison between angle of arrival estimation methods

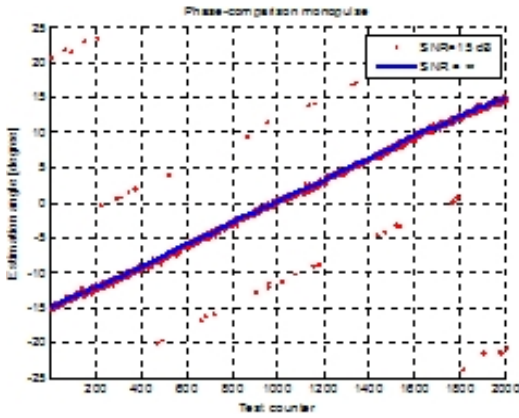
방법	수행 시간(초)
PCM	4.83
DBF	40.23
LSE	52.99

#### IV. 결 론

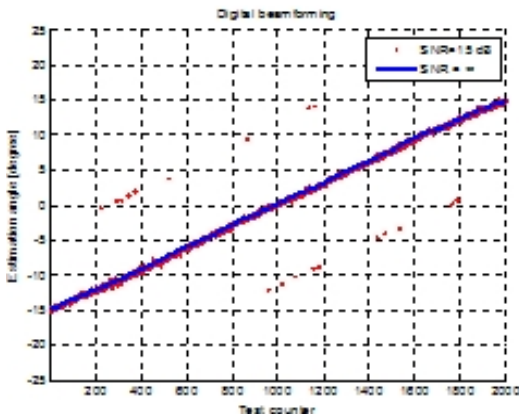
이 논문에서는 2차원 레이더 간섭계에서 표적의 도달 각도를 추정하는 알고리즘에 대해 소개하고, 각도 모호성 해소 성능을 비교하였다. 1차원 알고리즘, 즉 위상 비교 모노 펄스 알고리즘의 경우 2차원 알고리즘에 비해 모호성 해소 확률이 조금 낮지만, 수행 시간을 고려할 때 미사일 추적과 같은 실시간 신호 처리에 적용이 가능한 것으로 보인다. 향후 각도 모호성 해소 확률을 높이기 위해 2차원 알고리즘의 최적화 및 1차원/2차원 각도 추정 알고리즘을 혼용하여 실시간 처리가 요구되는 응용분야에 적용 가능하게 하는 연구가 필요하다.

#### 참 고 문 헌

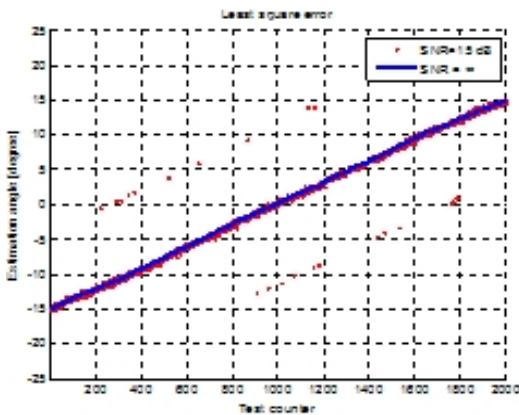
- [1] Stephen E. Lipsky, *Microwave Passive Direction Finding*, John Wiley and Sons, New York, 1987.
- [2] S. G. Sun, J. M. Lee, J. S. Lee, and B. L. Cho, "Ground-based radar interferometer for tracking fast approaching targets", *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 5, iss. 4, pp. 398-404, 2011.
- [3] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw Hill, 2001.



(a) 위상 비교 모노 펄스 방법  
(a) Phase-comparison monopulse method



(b) 디지털 빔 포밍 방법  
(b) Digital beamforming method



(c) 위상차의 최소 자승 오차 방법  
(c) Least square error method

그림 2. 각도 추정 알고리즘에 따른 각도 모호성 해소 성능 비교

Fig. 2. Performance comparison of solving ability of angle ambiguity.