

위상 비교 모노 펄스 알고리즘에서 위상평균법을 이용한 추정 각도 정확도 향상

Accuracy Improvement of the Estimated Angle Using Phase Averaging in Phase-Comparison Monopulse Algorithm

조병래 · 이정수 · 이종민 · 선선구

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

요 약

레이다 간섭계에서 표적의 공간 도달 각도를 추정하는 방법 중에서 위상 비교 모노 펄스 알고리즘의 추정 각도 정확도를 향상시키기 위한 위상평균법 및 시간 지연 보상 방안을 제안하였다. 실시간 신호처리 시스템에 적용할 경우, 저역 통과 필터의 특성을 갖는 위상평균법을 적용하면 필연적으로 시간 지연이 발생한다. 이 문제점을 보완하기 위해 곡선 맞춤법을 이용하여 추정된 각도의 변화율을 계산하고 보상하여 실시간 신호처리 시스템에 적용 가능하도록 하였다. 제안 방법의 효용성을 입증하기 위해 실제 레이다 간섭계를 이용하여 획득된 데이터에 적용하여 추정된 각도의 정확도를 비교하였다.

Abstract

This study describes the accuracy improvement of the estimated angle using phase averaging in phase-comparison monopulse algorithm. In addition, to compensate the time-delay due to the phase averaging, we propose the time-delay compensation algorithm which uses the derivative of the estimated angle. These derivative is calculated by the curve fitting method. Using the real radar interferometer, we have verified that the phase averaging and time-delay compensation algorithms are effective in real-time signal processing application.

Key words : Radar Interferometer, Phase-Comparison Monopulse, Phase Averaging, Estimation Of Arrival Angle

I. 서 론

레이다 간섭계는 한 개의 송신기와 2개 이상의 수신기를 이용하여 표적의 위치를 추출하는 시스템으로 마이크로웨이를 이용하여 방향을 탐지하는 방법 중 하나이다^[1]. 레이다 간섭계에서 표적의 방향을 추정하기 위한 알고리즘으로 위상 비교 모노 펄스 알고리즘, 디지털 빔 포임 알고리즘, 위상차의 최소자승 오차 알고리즘 등이 소개되었다^[2]. 참고문헌

[2]에서 미사일 추적과 같은 실시간 신호처리에 적용 가능한 알고리즘으로 위상 비교 모노 펄스 알고리즘을 소개하였다. 위상 비교 모노 펄스 알고리즘은 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 2π 간격으로 모호성이 발생하게 된다^{[1],[2]}. 이 모호성을 해소

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received July 3, 2012 ; Revised August 20, 2012 ; Accepted August 21, 2012. (ID No. 20120703-079)

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

하기 위해서는 두 안테나 사이의 거리를 반 파장보다 작게 하는 방법, 관측 범위를 제한하는 방법, 3개 이상의 안테나를 이용하는 방법이 있다^[1]. 그러나 참고문헌 [2]의 시뮬레이션 결과에서 보듯이 신호대 잡음비가 낮을 경우, 각도 모호성을 완벽히 해소할 수는 없다. 신호대 잡음비를 높여주는 방법 중 하나로 위상 평균법을 이용한다^[3].

이 논문에서는 레이더 간섭계에서 표적의 공간 도달 각도를 추정하는 알고리즘 중 위상 비교 모노 펄스 알고리즘에서 위상평균법을 적용하여 추정 각도의 정확도 향상 및 지연 시간 보상 방법을 제안하고, 참고문헌 [4]에서 소개한 2차원 레이더 간섭계를 이용하여 제안한 방법의 효용성을 검증하였다.

II. 표적의 도달 각도 추정

2.1 위상 비교 모노 펄스 알고리즘

그림 1은 3개의 안테나를 가지는 레이더 간섭계의 동작 원리를 보여주고 있다. 식 (1)을 이용하여 표적과 안테나간 경로차에 의한 위상차는 계산할 수 있다^[2].

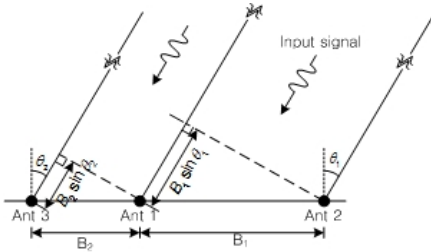


그림 1. 3개의 안테나를 가지는 레이더 간섭계의 동작 원리

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

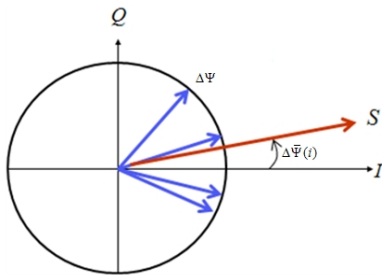


그림 2. 위상평균법 원리

Fig. 2. Principle of phase averaging.

$$\begin{aligned} \Delta\phi_1 &= \phi_2 - \phi_1 = 2\pi k_1 + \Delta\Psi_1 \\ &= -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot B_1 \cdot \sin\theta_1 \end{aligned}$$

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

여기서 B_1, B_2 는 안테나 사이의 거리, λ 는 파장, k_1 과 k_2 는 모호성 정도를 나타내는 정수이다. ϕ_1, ϕ_2, ϕ_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 정수 k_1, k_2 는 식 (2)로부터 계산이 가능하다.

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

이렇게 모호성을 해소한 후, 표적의 도달 각도는 식 (3)을 통해 계산된다^[2].

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

2.2 위상평균법(Phase Averaging)

위상 비교 모노 펄스 알고리즘에서 측정된 위상들의 위상차인 $\Delta\Psi_1, \Delta\Psi_2$ 의 신호대 잡음비를 향상시키기 위해 위상평균법을 적용하였다. 그림 2와 같이 $\Delta\Psi_1, \Delta\Psi_2$ 를 복소 평면상에서 벡터합을 수행하여 위상평균법을 적용하였으며, 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} S &= \sum_i^N \cos(\Delta\Psi(i)) + j \sum_i^N \sin(\Delta\Psi(i)) \\ \Delta\bar{\Psi}_i(i) &= \tan^{-1} \left[\frac{Im\{S\}}{Re\{S\}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 S 는 위상차 $\Delta\Psi_1, \Delta\Psi_2$ 의 복소 평면상 벡터합이고, N 은 위상평균법을 적용할 윈도우 크기이다. j 는 허수 단위이며, $\Delta\bar{\Psi}_i(i)$ 는 i 번째 인덱스에서 $(i - N + 1)$ 번째 인덱스까지 N 개의 데이터를 이용하여 위상평균법을 통해 얻은 위상값이다. $Re\{\cdot\}, Im\{\cdot\}$ 는 각각 복소수의 실수와 허수를 추출하는 연산자이다.

2.3 위상평균법의 시간 지연 보상

실시간 신호처리 시스템에서 위상평균법을 사용하면 $N/2$ 개 인덱스만큼 시간 지연 현상이 발생한다. 실시간 신호처리 시스템이 아닌 경우, 위상평균법의 윈도우의 중심을 현재 인덱스로 설정하면 시간 지연이 발생하지 않지만, 실시간 신호처리 시스템에서는 과거의 데이터를 이용하여야 하므로 시간 지연 현상이 발생한다. 이를 보상하기 위해 곡선 맞춤법(curve fitting)을 이용하였으며, 개략적인 절차는 다음과 같다.

- 절차 a) 각 안테나에 수신된 신호에서 표적의 위상값을 추출한다.
- 절차 b) 표적의 위상값에서 위상차 $\Delta\psi_1, \Delta\psi_2$ 를 계산한다.
- 절차 c) 식 (4)를 이용하여 $\Delta\bar{\psi}_1, \Delta\bar{\psi}_2$ 를 계산한다.
- 절차 d) 식 (2)와 (3)에 위상평균법을 이용하여 계산한 위상차 $\Delta\bar{\psi}_1, \Delta\bar{\psi}_2$ 를 대입하여 표적의 도달 각도($\theta_{out}(i)$)를 계산한다.
- 절차 e) i 번째 인덱스에서 $(i-N+1)$ 번째 인덱스까지 N 개의 표적의 도달 각도를 이용하여 곡선 맞춤법을 수행한다.
- 절차 f) 절차 e)에서 구한 곡선을 통해 도달 각도의 변화율을 계산하고, 식 (5)와 같이 도달 각도를 계산한다.

$$\dot{\theta}_{out}(i) = \theta_{out}(i) + \Delta\theta_{out}(i) \cdot \frac{N}{2} \quad (5)$$

여기서 $\Delta\theta_{out}(i)$ 는 절차 e)에서 구한 곡선을 이용하여 계산된 도달 각도의 변화율이다.

절차 e)에 사용된 곡선 맞춤법은 선형 최소 좌승 방법을 이용하였다. 참고문헌 [4]에 소개된 표적의 경우 2차 곡선으로 충분히 표현이 가능할 것으로 판단되어 식 (6)~(8)과 같이 곡선을 계산하였다.

$$Y = a_1x^2 + a_2x + a_3$$

$$\begin{bmatrix} y_i \\ y_{i-1} \\ \vdots \\ y_{i-N+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i^2 & x_i & 1 \\ x_{i-1}^2 & x_{i-1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i-N+1}^2 & x_{i-N+1} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$X \triangleq \begin{bmatrix} x_i^2 & x_i & 1 \\ x_{i-1}^2 & x_{i-1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i-N+1}^2 & x_{i-N+1} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

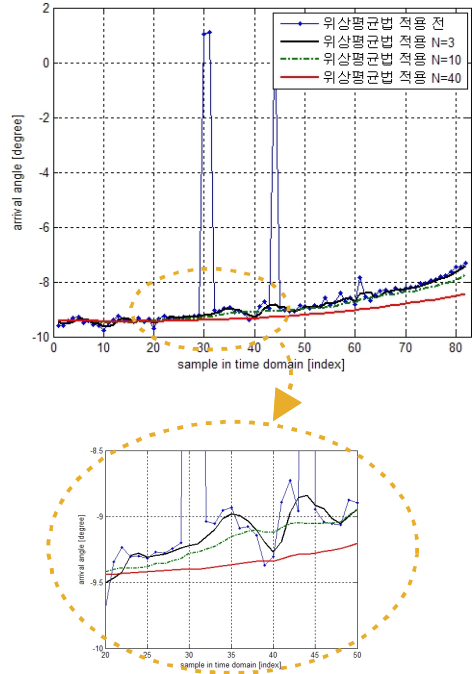


그림 3. 위상평균법을 이용한 각도 모호성 해결 성능
Fig. 3. Performance of the angle ambiguity solving using phase averaging.

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T \begin{bmatrix} y_i \\ y_{i-1} \\ \vdots \\ y_{i-N+1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 x_i 는 i 번째 인덱스이고, y_i 는 i 번째 도달 각도이다. $()^T$ 는 transpose 연산자이며, $()^{-1}$ 는 inverse 연산자이다.

실시간 신호처리 시스템에서는 식 (8)에서 매트릭스 X 를 이용한 연산을 기수행한 결과를 바로 사용하므로 빠른 시간에 연산이 가능하다.

III. 각도 추정 알고리즘 성능 분석

II장에서 언급한 위상평균법과 위상평균법에 의한 시간 지연 보상 방법에 대하여 참고문헌 [4]의 간섭계를 이용하여 획득한 데이터에 적용하여 보았다. 그림 3은 위상평균법을 이용하여 각도 모호성 해결 성능이 향상되는 것을 보여주고 있다. 윈도우 크기가 3이어도 모호성은 모두 해결되는 것을 보여준다. 윈도우 크기가 커지면 시간 지연이 발생하지만 추정된 각도의 출력임이 줄어든다.

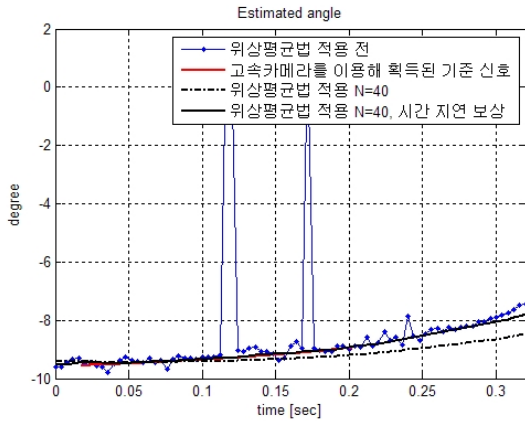


그림 4. 위상평균법에 시간 지연 현상 보상
Fig. 4. Compensation of the time delay in the phase averaging.

표 1. 추정 각도의 정확도 비교.

Table 1. Comparison of the accuracy of the estimated arrival angle.

구분		오차(RMSE, degree)		
		Test 1	Test 2	Test 3
위상평균법 적용 전		0.1542	0.1928	0.2634
N=3	시간 지연 보상 전	0.1136	0.1134	0.1658
	시간 지연 보상(1차)	0.1827	0.2041	0.2563
N=10	시간 지연 보상(1차)	0.0950	0.0666	0.1447
	시간 지연 보상(2차)	0.1148	0.1154	0.1714
N=40	시간 지연 보상(1차)	0.0971	0.1014	0.1949
	시간 지연 보상(2차)	0.0357	0.0728	0.0830

그림 4는 윈도우 크기가 커지면서 발생하는 시간 지연 현상을 제안된 방법으로 보상하였을 때 정확도가 향상되는 것을 보여주고 있다. 그림 4에서 붉은색 실선은 참고문헌 [4]에서 소개한 고속 카메라를 이용해 획득된 기준 신호이다. 표 1은 위상평균법의 윈도우 크기, 시간 지연 보상 곡선의 변경에 따른 각도 정확도를 분석한 것이다.

표 1에서 보면 위상평균법의 윈도우 크기가 작으면 시간 지연 보상을 수행하지 않는 것이 더 정확한 각도를 추정하는 것을 보여주고 있다. 윈도우 크기가 중간 정도 되면 시간 지연 보상 알고리즘에서 1

차원 곡선 맞춤 기법을 사용하는 것이 더 정확한 각도를 추정하는 것을 보여준다. 이는 윈도우 내에서의 추정된 각도들은 거의 1차원 직선에 가깝기 때문이다. 윈도우 크기가 클 경우 시간 지연 보상 알고리즘을 꼭 적용하여야 한다. 2차 곡선 맞춤 기법을 사용하여 시간 지연을 보상할 경우 그 오차가 위상평균법을 적용하기 전 오차의 1/3 수준으로 가장 정확한 각도를 추정하는 것을 보여준다. 이로서 본 논문에서 제안하는 위상평균법과 시간 지연 보상 알고리즘을 실시간 신호처리 분야에 적용 가능할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

이 논문에서는 위상 비교 모노 펄스 알고리즘에서 모호성 해결 능력을 향상하기 위해 위상평균법을 제안하였고, 실시간 신호처리 시스템 적용을 위해 시간 지연 보상 알고리즘도 제안하였다. 제안된 알고리즘은 실제 레이더 간섭계를 이용하여 획득된 데이터에 적용하여 추정 각도의 정확도를 비교하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 미사일 추적과 같은 실시간 신호처리에 적용이 가능한 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] Stephen E. Lipsky, *Microwave Passive Direction Finding*, John Wiley and Sons, New York, 1987.
- [2] 조병래, 이정수, 이종민, 선선구, "2차원 레이더 간섭계에서 각도 추정 알고리즘의 각도 모호성 해소 성능 비교", *한국전자과학회논문지*, 23(3), pp. 410-413, 2012년 3월.
- [3] P. T. Gough, D. T. Long, "Performance expectations of an airborne surveillance radar based on phase monopulse techniques", *IEE Proceedings*, vol. 137, no. 1, pp. 27-31, 1990.
- [4] 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.