

## 간섭계 레이더 고도계에서 안테나 기준선의 각도 모호성 분석

### Angle Ambiguity Analysis of Antenna Baseline for Interferometric Radar Altimeter

하종수 · 장종훈 · 이수지 · 박영식 · 홍성용\*

Jong Soo Ha · Jong Hun Jang · Soo Ji Lee · Young Sik Park · Sung Yong Hong\*

#### 요 약

본 논문에서는 간섭계 레이더 고도계에서 안테나의 기준선을 설계하기 위해 각도 모호성을 분석한다. 간섭계 레이더 고도계는 위상 주기마다 각도 모호성이 발생하는 단일 기준선 안테나의 단점을 극복하기 위해 다중 기준선으로 안테나를 설계하고 위상비교 모노펄스 알고리즘으로 표적 각도를 추정한다. 그런데 다중 기준선 안테나는 위상 오차가 크면 신호처리로는 해결하기 어려운 각도 모호성이 발생하는 문제점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 안테나 설계 단계에서 최소화하기 위해 위상 오차 및 기준선 간격에 따라 각도 모호성을 분석한다. 몬테카를로 시뮬레이션에 기초한 파라미터 연구를 통해 각도 모호성을 분석하고, 시험데이터와 비교하여 분석 결과의 타당성을 검증한다.

#### Abstract

In this study, the angle ambiguity of a single baseline is analyzed to design an antenna baseline for an interferometric radar altimeter (IRA). To overcome the shortcoming of a single baseline in which angle ambiguity occurs during every phase period, the IRA adopts multiple baselines for its antenna and estimates the target angle by employing the phase comparison monopulse algorithm. However, the problem with multiple baselines is that an angle ambiguity that is difficult to solve by signal processing occurs when the phase error is large. To minimize this problem at the antenna design stage, the angle ambiguity is analyzed according to the phase error and the baseline spacing. The analysis is performed by conducting a parameter study based on the Monte Carlo simulation, and the validity of the analysis is verified from the test data.

Key words: Angle Ambiguity, Phase Comparison Monopulse Algorithm, Interferometric Radar Altimeter

#### I. 서 론

지형대조 항법은 미리 DB(database)화하여 보유 중인 DEM(digital elevation model)과 현재 위치에서 측정한 지형 고도를 비교하여 항법기능을 수행하는 정밀 항법으로 위성항법과는 달리 적대적인 GPS(global positioning system)

교란행위에 강인하고, DEM의 해상도와 고도측정센서의 정확도에 따라 정밀한 항법기능을 수행할 수 있는 장점이 있다<sup>[1]</sup>.

DTED(digital terrain elevation data)라고도 불리는 DEM은 지형기복의 변화를 2차원 평면에 표현한 수치표고모형이다. 대개 항공기 LiDAR(light detection and ranging) 측

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

\*충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received April 27, 2021 ; Revised May 18, 2021 ; Accepted June 4, 2021. (ID No. 20210427-046)

· Corresponding Author: Sung Yong Hong (e-mail: syhong@cnu.ac.kr)

량으로 지형고도를 측정하고<sup>[2]</sup>, GPS 및 INS(inertial navigation system) 데이터 전처리, 지형 분류 등의 후처리 및 기준점 대비 정확도 검증 등을 통해 제작되며, 일반에 공개되는 DTED level 1은 한 grid가 90 m×90 m 수준의 해상도를 갖는다.

고도측정센서, 즉 고도계는 지형대조 항법시스템의 성능을 결정하는 핵심 센서로서 기압고도계, 레이저고도계, 전파고도계 등이 있다. 기압고도계는 정확도가 낮고, 레이저고도계는<sup>[3]</sup> 정확도는 높으나 악 기상환경에서는 레이저 투과한계로 사용이 제한된다. 전파고도계<sup>[4],[5]</sup>는 비교적 정확하고 악 기상환경에서도 사용가능하나, 레이저고도계에 비해서는 정확도가 떨어진다.

간섭계 레이더 고도계는 전파고도계의 일종으로 간섭계 방식으로 표적 방위각을 추정한다. 따라서 1차원 거리 정보만을 제공하는 기존의 전파고도계와는 달리 지도 상 특정 지점에 대한 3차원 거리/방위각/(직하방)고각정보를 제공할 수 있어 전파고도계보다 고품질의 정보제공이 가능한 장점이 있다<sup>[6],[7]</sup>.

위상비교 모노펄스 알고리즘은 표적 각도 추정을 위해 안테나의 기준선 간격을 경로차/위상차 계산의 변수로 사용한다. 그런데 단일 기준선에서는 각도 모호성이 발생하기 때문에 다중 기준선으로 안테나를 설계하여 각도 모호성을 해소한다<sup>[8]</sup>. 이와 관련하여 4×1 안테나 구성으로 기준선 간격에 따른 각도 측정 오차를 분석한 사례도 있고<sup>[9]</sup>, 3×1 안테나 구성으로 표적 SNR(signal to noise ratio)에 따라 각도 모호성 해소 성능을 분석한 사례도 있으나<sup>[10]</sup>, 상기 분석은 점 표적을 예정하는 것이어서 지면에 의한 다중 표적을 수신하는 본 논문에는 적합하지 않다. 특히 다중 표적에 의해 일정량 이상의 위상 오차가 발생하면 신호처리로는 해소하기 어려운 수준의 각도 모호성이 발생하기 때문에 이에 대한 별도의 대책이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 각도 모호성 문제를 안테나 설계 단계에서 최소화하기 위해 위상 오차 및 기준선 간격에 따라 각도 모호성을 분석한다. 이를 위해 먼저 단일 및 다중 이중선 설계에 대해 개관한 다음, 실제 설계 결과와 시험데이터로부터 다중 이중선 간섭계의 각도 모호성 문제를 검토한다. 그런 다음 수식 전개 및 몬테카를로 시뮬레이션에 기초한 파라미터 연구를 통해 각도 모호성을

분석하고, 시험데이터와 비교하여 분석 결과의 타당성을 검증한다. 끝으로 설계 제한 조건 내에서 안테나의 다중 기준선 간격을 도출한다.

## II. 본 론

### 2-1 단일 기준선의 각도 모호성

간섭계는 원래 빛의 간섭 현상을 이용하여 변위를 측정하는 광학계를 의미한다. 간섭계 원리는 경로의 길이가 같은 기준광과 신호광에 대해, 측정 점의 변화로 신호광의 경로가 변화하면 경로차가 발생하고, 간섭을 일으키게 되어 이로부터 원하는 정보를 산출하는 것이다. 위상비교 모노펄스 알고리즘은 간섭계 원리에서 착안하여 표적 각도(방위각 정보)를 추정한다.

$$S_r(t) = A_r \exp \left\{ j2\pi \left[ f_c(t-\tau) + \frac{k}{2}(t-\tau)^2 \right] + \phi \right\} \quad (1)$$

그림 1과 같이 단일 기준선에 배치된 2개의 안테나 Ant1, Ant2로 식 (1)의 표적반사신호  $S_r$ 이 수신된다고 하면 각 안테나에서의 수신신호 위상은 각각  $\phi_1, \phi_2$ 가 된다. 이 때  $A_r$ 은 수신전력이며,  $f_c$ 는 송신주파수,  $\tau$ 는 표적반사신호가 수신될 때까지의 지연시간,  $k$ 는 주파수 변조신호의 시간대주파수 기울기,  $\phi$ 는 초기위상이다.

이 때 측정값  $\phi_1, \phi_2$ 는 수신신호의 Inphase 성분  $I$ 와 Quadrature 성분  $Q$ 의 비로부터 구할 수 있으므로, 측정 위상차  $\Delta\phi$ 는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

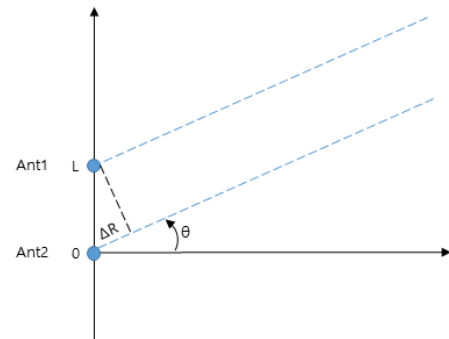


그림 1. 단일 기준선 간섭계 개념

Fig. 1. The concept of single baseline interferometry.

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{I_1}{Q_1}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{I_2}{Q_2}\right) \quad (2)$$

한편, 추정 위상차  $\Delta\psi$ 는 그림 1의 경로차  $\Delta R$ 로부터 식 (3)과 같이 구할 수 있다. 이 때  $L$ 은 단일 기준선 간격,  $\theta$ 는 표적 각도,  $\lambda$ 는 파장을 나타낸다.

$$\Delta\psi = \frac{2\pi\Delta R}{\lambda} = \frac{2\pi L \sin\theta}{\lambda} \quad (3)$$

그런데 식 (2)에서 측정 위상차  $\Delta\phi$ 는 주기성이 있어 위상 주기  $2\pi$ 마다 위상 모호성이 발생한다.<sup>[11]</sup> 따라서 식 (2)와 식 (3)으로부터  $\Delta\phi$ 와  $\Delta\psi$ 는 식 (4)와 같은 관계를 갖는다. 이 때  $n$ 은 주기성을 나타내기 위한 정수값이다.

$$\Delta\psi = \Delta\phi + n \times 2\pi \quad (4)$$

식 (4)로부터 식 (5)와 같이 표적 각도를 추정한다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda(\Delta\phi + 2n\pi)}{2\pi L}\right) \quad (5)$$

위 식에서 위상 주기  $2\pi$ 에 따른 각도 모호성을 회피하기 위해서는  $|\Delta\psi| = \left|\frac{2\pi L \sin\theta}{\lambda}\right| \leq \pi$ 를 만족해야 한다.

이 때  $L$ 이  $\lambda/2$  이하를 만족하면  $|\theta| \leq \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2L}\right) \leq \frac{\pi}{2}$ 가 되므로 각도 모호성이 발생하지 않게 된다.

그러나 안테나 소자의 물리적 크기, 이득, 빔폭, 격리도 등의 설계 제한 요소를 고려할 때 안테나 간격을 반파장 이하로 설계하는 것은 사실상 불가능에 가까우므로, 일반적으로 간섭계 안테나를 다중 기준선으로 설계하여 각도 모호성 발생을 해소한다<sup>[8]</sup>.

## 2-2 다중 기준선에 의한 각도 모호성 해소

단일 기준선 간섭계의 각도 모호성을 해소하기 위해 2쌍 이상의 다중 기준선 간섭계를 구성하여 위상비교 모노펄스 알고리즘으로 위상을 추정하고, 이들 위상을 비교하여 표적 각도를 추정한다<sup>[12],[13]</sup>. 이를 위해 3개 이상의 안테나를 구성하는데, 본 논문에서는 3개의 안테나로 각도 모호성을 해소한다.

그림 2와 같이 다중 기준선에 배치된 3개의 안테나 Ant1, Ant0, Ant2로 식 (1)의 표적반사신호  $S_r$ 이 수신된다

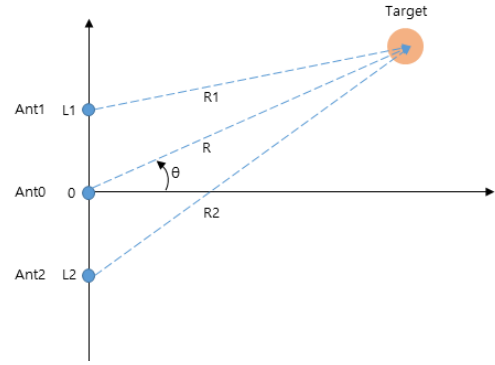


그림 2. 다중 기준선 간섭계 개념

Fig. 2. The concept of multiple baseline interferometry.

고 하면 각 안테나에서의 수신신호 위상은 각각  $\phi_1, \phi_0, \phi_2$ 가 된다. 수신신호의 각 안테나 채널 간에 측정한 상대 위상차를  $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ 라고 할 때 이들은 식 (2)와 동일한 방법으로 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\phi_1 = \phi_1 - \phi_0, \quad \Delta\phi_2 = \phi_2 - \phi_0 \quad (6)$$

한편, 추정 위상차  $\Delta\psi_1, \Delta\psi_2$ 는 그림 2의 기하구조로부터 구할 수 있다. 중심 안테나 Ant0과  $L_1$ 만큼 이격되어 있는 Ant1과의 경로차  $R_1 - R$ 은  $R$ 이 매우 클 때 테일러 전개 및 포물선 근사에 의해 식 (7)로부터 식 (8)과 같이 간략화할 수 있다<sup>[14]</sup>. 이 때  $\Delta\psi_1$ 은 식 (3)에 의해 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$R_1 = \sqrt{(R \cos\theta)^2 + (R \sin\theta - L_1)^2} \quad (7)$$

$$R_1 - R \cong -L_1 \sin\theta + \frac{L_1^2}{2R} \quad (8)$$

$$\Delta\psi_1 = \frac{2\pi(R_1 - R)}{\lambda} = -\frac{2\pi L_1}{\lambda} \times \sin\theta + \frac{\pi L_1^2}{R\lambda} \quad (9)$$

동일한 방법으로 중심 안테나 Ant0과  $L_2$ 만큼 이격되어 있는 Ant2와의 추정 위상차  $\Delta\psi_2$ 는 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\psi_2 = -\frac{2\pi L_2}{\lambda} \times \sin\theta + \frac{\pi L_2^2}{R\lambda} \quad (10)$$

단일 기준선 간섭계와 동일한 이유로 측정 위상차  $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ 와 추정 위상차  $\Delta\psi_1, \Delta\psi_2$ 는 식 (11)과 같은 관

계를 갖는다. 이 때  $n$ 과  $m$ 은 주기성을 나타내기 위한 정수값이다.

$$\Delta\psi_1 = \Delta\phi_1 + n \times 2\pi, \Delta\psi_2 = \Delta\phi_2 + m \times 2\pi \quad (11)$$

이 값을 식 (9), 식 (10)에 대입하면 식 (12), 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\sin(\theta_1) = -\frac{\lambda}{L_1} \left( \frac{\Delta\phi_1}{2\pi} + n \right) + \frac{L_1}{2R} \quad (12)$$

$$\sin(\theta_2) = -\frac{\lambda}{L_2} \left( \frac{\Delta\phi_2}{2\pi} + m \right) + \frac{L_2}{2R} \quad (13)$$

위 식과 관련하여, 다중 기준선 간섭계에서는 간격  $L_1$ ,  $L_2$ 를 다르게 함으로써  $\sin(\theta_1)$ 과  $\sin(\theta_2)$ 가 다른 기울기와 다른 절편을 갖도록 설계하고, 두 값의 차이가 최소가 되는 값이 참값일 것이라는 가정하에 식 (14)를 만족하는 변수  $n$ ,  $m$ 을 구한다.

$$\min_{n,m} |\sin(\theta_1) - \sin(\theta_2)|, |\theta| < \theta_{width} \quad (14)$$

위 식에서 각도  $\theta$ 는 안테나의 반전력 빔폭  $2\theta_{width}$ 이 내 값이다.  $\sin(\theta_1)$ 과  $\sin(\theta_2)$ 의 차이가 최소가 될 때의 변수  $n$ ,  $m$ 을 구하여 식 (12), 식 (13)에 대입함으로써  $\sin(\theta_1)$ 과  $\sin(\theta_2)$ 를 구하고, 이 값을 산술평균하여 식 (15)와 같이 표적 각도  $\hat{\theta}$ 를 추정한다.

$$\hat{\theta} = \text{asin} \left[ \frac{\sin(\theta_1) + \sin(\theta_2)}{2} \right] \quad (15)$$

### 2.3 다중 기준선 간섭계의 각도 모호성 현상

간섭계 안테나를 슬롯 배열로 설계하고<sup>[15]</sup>, 이득, 빔폭, 격리도 등을 고려하여 기존의 다른 방법들처럼<sup>[9],[10]</sup> SNR과  $L_1$ ,  $L_2$ 를 기반으로 각도 측정 오차와 각도 모호성을 분석하여 그림 3의 형태로  $L_1$ ,  $L_2$ 를 설계 및 제작하였다.

이 때 안테나의 3 dB 빔폭은 방위각  $30^\circ$ , 고각  $10^\circ$  수준이며, 안테나 방향은 비행방향과 비행기 하부에 부착되는 점을 고려하여 Ant1을 오른쪽 안테나, Ant2를 왼쪽 안테나로 규정하였다. 이를 이용하여 비행탐재시험을 수행하였고, 분석 결과 중 한 컷을 그림 4에 나타내었다.

위 그림 4(a)는 현재 GPS 위치에서의 DEM 고도를 비

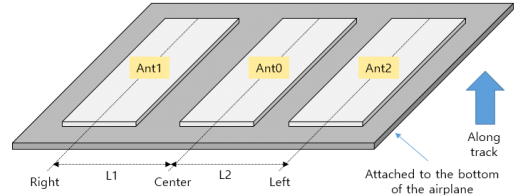
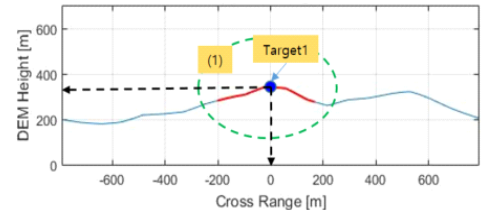
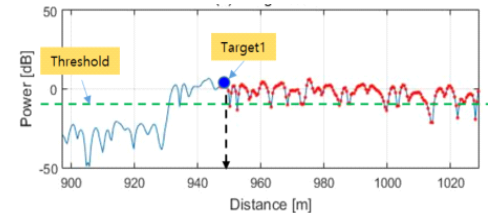


그림 3. 다중 기준선 간섭계 안테나

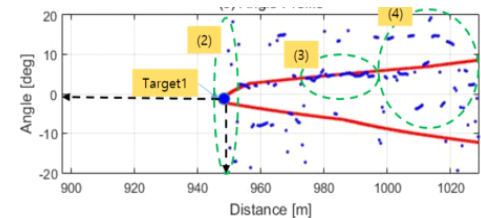
Fig. 3. The multiple baseline interferometric antenna.



(a) DEM 고도  
(a) DEM height



(b) 거리 단면도  
(b) Range profile



(c) 각도 단면도  
(c) Angel profile

그림 4. 시험 결과 분석

Fig. 4. The test result analysis.

행 진행(along track) 방향의 직각(cross range) 방향에 대해 나타낸 것으로 간섭계 레이더 고도계의 관측 가능 영역 (1)을 붉은색으로 표시하였다. 이 때 최근점 Target 1의 고도  $H_d$ 는 350 m 수준이며, 각도(방위각)는  $0^\circ$  수준으로 판단된다.

그림 4(b)는 간섭계 레이더 고도계에서 관측한 이격거리(식 (7)의  $R$ )별 수신 전력을 나타낸 것으로 그림 4(a)의 붉은색 영역에 대응하는 거리를 붉은색으로 표시하였다. 이 때 Threshold 이상의 신호를 표적군으로 추정하는데, 간섭계 레이더 고도계와 최근점 Target1 사이의 이격거리  $R$ 과 GPS 상의 고도  $H_g$ 는  $H_d = H_g - R$ 의 관계를 만족한다.

그림 4(c)는 식 (15)에서 추정한 이격거리별 각도(푸른색)와 관측 가능 영역 (1)에서의 실제 DEM 각도(붉은색)를 함께 나타낸 것이다. 만약 추정 각도가 정확하다면 붉은색 점선과 푸른색 점선은 유사할 것이고, 추정 각도에 오차가 있더라도 일반적으로는<sup>[9],[10]</sup> 붉은색 점선 근방에 푸른색 점선이 있을 것으로 예상할 수 있다.

그러나 영역 (1)에서 최근점 주변의 DEM 각도는  $0^\circ$  부근이지만, 영역 (2)에서 식 (15)는  $0^\circ$ 가 아니라  $-10^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  등 다양한 각도를 추정하고 있음을 알 수 있다. 그래도 영역 (3)에서는 붉은색 점선과 푸른색 점선이 유사하나, 영역 (4)에서는 다시 일정 간격으로 도약하면서 발생하는 각도 오차(푸른색 점선)가 존재함을 확인할 수 있다.

이는 점 표적이 아닌 연속적인 지형을 관측하는 간섭계 레이더 고도계 특성 상, 유사 거리에 있는 지형끼리는 위상 중첩이 발생하여 점 표적 대비 큰 위상 오차가 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 도약에 의한 각도 오차가 일정 간격으로 빈번하게 발생하는 것을 미루어 볼 때 기존<sup>[9],[10]</sup>과 다른 형태로 다중 기준선 간섭계에 각도 모호성이 발생하고 있는 것으로 예측할 수 있다.

## 2.4 간섭계 레이더 고도계의 각도 모호성 분석

본 장에서는 2-3절에서 예측된 간섭계 레이더 고도계의 특유의 각도 모호성을 다음과 같은 방법으로 분석한다. 먼저 식 (12), 식 (13)을 식 (16), 식 (17)과 같이 변환한다. 이 때  $R \gg L_1$ 이므로  $\frac{L_1}{2R}$ 은 생략한다.  $\frac{L_2}{2R}$ 도 마찬가지로 지이다.

$$\Delta\phi_1 = -\frac{2\pi L_1}{\lambda} \sin(\theta_1) - 2\pi n \quad (16)$$

$$\Delta\phi_2 = -\frac{2\pi L_2}{\lambda} \sin(\theta_2) - 2\pi m \quad (17)$$

식 (16), 식 (17)에서  $L_1$ ,  $L_2$ 를 설정하고,  $n$ 과  $m$ 에 음수부터 양수까지 여러 정수 값을 대입하면 그림 5와 같이 관심 각도 영역에서의 각도 대 위상 그래프를 구할 수 있다. 이 때  $L_1$ 은 오른쪽 안테나 중심점(좌표상 양수),  $L_2$ 는 왼쪽 안테나 중심점(좌표상 음수)으로 규정한다.

이를 기반으로 다중 기준선 간섭계에 대한 위상비교 모노펄스 알고리즘을 적용하면 그림 6과 같이 입력 각도(참값)에 대한 출력 각도(추정 값) 그래프를 구할 수 있다.

따라서 이론적으로는 위상비교 모노펄스 알고리즘이 입력 각도를 잘 추정하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 2-3절에서, 실제 추정 결과는 ‘참값  $\pm$  오차’가 아니라, 오차가 수시로 도약하면서 변했기 때문에 도약 오차가 다중 기준선 설계와 관련이 있는지를 분석할 필요가 있다.

각도 모호성 현상 분석을 위해 식 (16), 식 (17)을 아래 식 (18), 식 (19)와 같이 변환한다. 이 때 입력 각도  $x_1$ 은

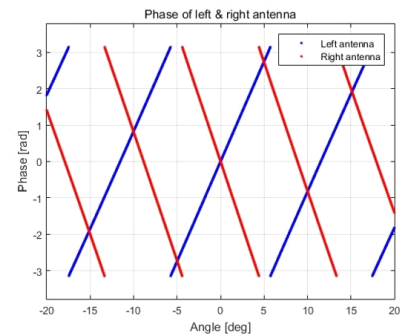


그림 5.  $L_1$ ,  $L_2$ 에 따른 각도 대 위상 변화  
Fig. 5. Angle vs. phase change according to  $L_1$  and  $L_2$ .

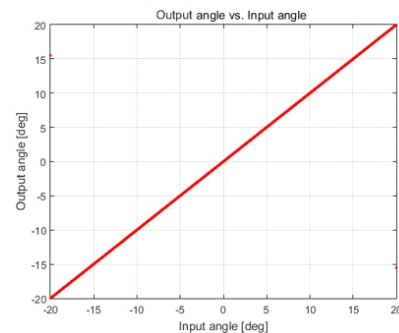


그림 6. 입력 각도 대 출력 각도  
Fig. 6. Input angle vs. output angle.

모수가  $\theta_1$  과  $\sigma^2$  인 정규분포를 따른다.  $X_2$  도  $\theta_2$  에 대해 마찬가지로이다. 그리고 가능한 많은 도약 각도 오차를 관찰하기 위해, 시스템 설계 오차  $\sigma_s$  의 2배 수준의 위상 오차  $\sigma_0$  를  $\sigma$  에 대입하고,  $X_1$  및  $X_2$  에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 그림 7과 그림 8의 그래프를 구하였다.

$$\Delta\phi_1 = -\frac{2\pi L_1}{\lambda} \sin(X_1) - 2\pi n, \quad X_1 \sim N(\theta_1, \sigma^2) \quad (18)$$

$$\Delta\phi_2 = -\frac{2\pi L_2}{\lambda} \sin(X_2) - 2\pi m, \quad X_2 \sim N(\theta_2, \sigma^2) \quad (19)$$

그림에서, 입력 각도가  $10^\circ$  라면 빈도의 차이는 있지만 참값(푸른색)  $10^\circ$  가 가장 빈번하게 발생하고,  $20^\circ(10^\circ + 10^\circ)$ ,  $0^\circ(10^\circ - 10^\circ)$  부근의 각도 모호성(초록색) 또한 빈번하게 발생할 수 있고,  $-15^\circ$  부근의 각도 모호성(초록색)도 가끔 발생할 수 있음을 알 수 있다.

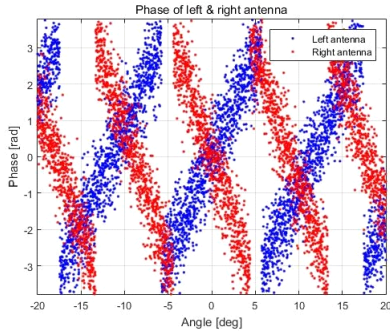


그림 7.  $\sigma_0$ 에 따른 각도 대 위상 변화

Fig. 7. Angle vs. phase change according to  $\sigma_0$ .

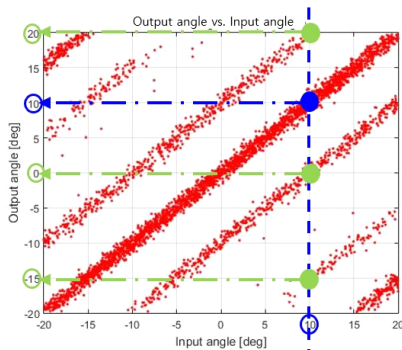


그림 8.  $\sigma_0$ 에 따른 입력 각도 대 출력 각도

Fig. 8. Input angle vs. output angle according to  $\sigma_0$ .

그리고 그림 4(c) 영역 (3)에서 참값  $6^\circ$ 에 대한 추정각도가 큰 폭으로 도약하는 현상으로부터, 실제 시험에서 발생하는 각도 모호성 현상을 본 논문의 각도 모호성 분석 결과가 잘 설명할 수 있음을 확인할 수 있다.

## 2-5 각도 모호성 분석 기반 안테나 기준선 설계

다중 기준선에 내재하는 각도 모호성이 간접계 레이더 고도계의 주요 각도 오차 중 하나임을 확인하였다. 그런데 이 각도 오차는 일반적인 오차처럼 무작위로 발생하는 게 아니라, 그림 8처럼 뚜렷한 경향성을 가지고 발생하기 때문에 신호처리로는 참값과의 구분이 쉽지 않다.

따라서 본 논문에서는 신호처리 전 단계에서 이러한 각도 모호성을 최소화하기 위해 식 (18), 식 (19)를 기반으로 여러  $L_1$ ,  $L_2$ 에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 각도 모호성(표 1)과 각도 측정 오차(표 2)를 분석하고, 최적의 설계 파라미터  $L_1$ ,  $L_2$ 를 도출하였다.

이 때 위상 오차는 시스템 설계 오차  $\sigma_s$ 를 분석하여 대입하였고, 설계 제한 요소를 고려하여 제작 가능한  $L_1$ ,  $L_2$  값을 후보군으로 선정하였다. 참고로 표 1의 각도 모호성은 입력값 대비 출력값이 허용오차(예:  $\pm 5^\circ$ )를 초과하는 도약 오차 값의 빈도를 계산한 결과이고, 표 2의 각도 측정 오차는 도약 오차 값의 배제하고, 참값 주변 값으로만 참값과의 측정 오차를 계산한 결과이다.

표 1에서 각도 모호성이 다른  $L_1$ ,  $L_2$  후보군 3쌍을 선정하였다. 이 중  $6\lambda / -4.5\lambda$  과  $6.5\lambda / -5\lambda$  는 각도 모호성이 작은 쌍으로서 선정 후보군이고,  $7\lambda / -4.5\lambda$  는 각도 모호성이 약간 높은 쌍으로서 비교 후보군이다.

표 1. 각도 모호성 분석 결과 [%]

Table 1. The result of angle ambiguity analysis.

$L_2 \backslash L_1$	$4.5\lambda$	$5\lambda$	$5.5\lambda$	$6\lambda$	$6.5\lambda$	$7\lambda$
$-7\lambda$	21.98	14.86	12.88	22.59	47.61	79.51
$-6.5\lambda$	19.94	12.18	19.25	44.51	77.94	47.53
$-6\lambda$	7.27	16.04	40.98	76.10	44.47	22.54
$-5.5\lambda$	12.80	37.12	73.92	41.00	19.33	12.80
$-5\lambda$	32.82	71.29	37.03	16.01	12.18	14.90
$-4.5\lambda$	68.10	32.73	12.86	7.26	19.83	22.05



표 2. 각도 측정 오차 분석 결과 [deg]

Table 2. The result of angle ambiguity analysis

$L_2 \backslash L_1$	$4.5 \lambda$	$5 \lambda$	$5.5 \lambda$	$6 \lambda$	$6.5 \lambda$	$7 \lambda$
$-7 \lambda$	0.27	0.26	0.26	0.25	0.24	0.23
$-6.5 \lambda$	0.29	0.28	0.27	0.26	0.24	0.24
$-6 \lambda$	0.31	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25
$-5.5 \lambda$	0.32	0.31	0.29	0.28	0.27	0.26
$-5 \lambda$	0.34	0.32	0.31	0.29	0.28	0.27
$-4.5 \lambda$	0.36	0.34	0.32	0.31	0.29	0.27

그리고 이 후보군들의 각도 측정 오차를 표 2에 나타내었다. 그 결과, 각도 측정 오차는 대부분  $0.3^\circ$  수준으로 큰 차이가 없었다. 이에 이 후보군들의 입력 각도 대 출력 각도 그래프를 그림 9와 같이 분석하였다.

그림 9에서 좌측 열은 시스템 설계 오차  $\sigma_s$ 에 대해 분석한 결과로서 기준선 설계를 위해 나타내었으며, 우측 열은 그림 8에서 대입했던 오차  $\sigma_0$ 를 동일하게 대입한 결

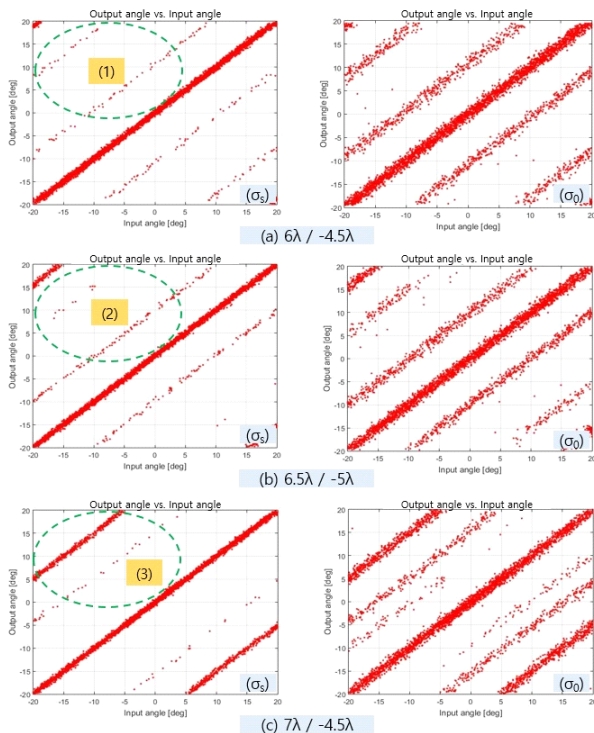


그림 9. 후보군별 입력 각도 대 출력 각도

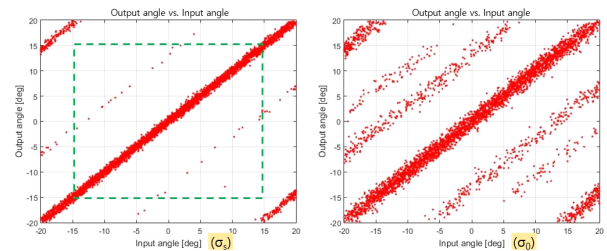
Fig. 9. Input angle vs. output angle of candidates.

과로서 결과 비교를 위해 나타내었다.

그림 9(a)~그림 9(c)의 좌측 열에 대해 영역 (1)~(3)을 관찰해 보면, 영역 (1)에서는 영역 (2)의 도약 오차군보다는 빈도가 낮은 2쌍( $\pm 12^\circ$ ,  $\pm 28^\circ$  수준)의 도약 오차군이  $-15^\circ \sim 15^\circ$  구간에서 발생한다. 영역 (2)에서는 참값보다는 빈도가 낮은 1쌍( $\pm 10^\circ$  수준)의 도약 오차군이  $-15^\circ \sim 15^\circ$  구간에서 발생하나,  $15^\circ \sim 20^\circ$ 와  $-20^\circ \sim -15^\circ$  구간에서는 참값과 유사한 빈도의 치명적인 도약 오차군이 발생한다. 영역 (3)에서는 3개 영역 중 빈도가 가장 낮은 1쌍( $\pm 15^\circ$  수준)의 도약 오차군이  $-5^\circ \sim 5^\circ$  구간에서 발생하나,  $5^\circ \sim 20^\circ$ 와  $-20^\circ \sim -5^\circ$  구간에서는 참값과 유사한 빈도의 치명적인 도약 오차군이 발생한다.

이 결과로부터 안테나의 반전력 빔폭이  $30^\circ (= \pm 15^\circ)$  이내라면  $L_1$ ,  $L_2$ 를  $6 \lambda / -4.5 \lambda$ 나  $6.5 \lambda / -5 \lambda$ 로 설정하는 것이 합리적인 것으로 판단되나, 그림 9의 우측 열처럼 위상 오차  $\sigma_0$ 가 클 경우에는 각도 모호성이 빈번하게 발생할 수 있음을 예상할 수 있다. 이에 본 논문에서는 안테나의 설계 제한 요소 중 격리도 조건을 완화하여  $L_1$ ,  $L_2$ 를  $3.5 \lambda / -5 \lambda$ 로 설정하고, 시뮬레이션을 수행하여 결과를 그림 10에 나타내었다.

그림 10에서 좌측 열은 시스템 설계 오차  $\sigma_s$ , 우측 열은 오차  $\sigma_0$ 를 대입한 결과이다. 좌측 열에서 각도 모호성은 8.49 %로, 각도 측정 오차는 0.38°로 추정되었다. 다만 이 경우  $L_1$ 과 중심과의 거리가 너무 가깝기 때문에 안테나 이득 및 빔폭 등에 따라 안테나 간 격리도가 떨어져 표적 탐지 성능이 저하될 수도 있다. 참고로 안테나 수신 영역을 영역 (1)  $-15^\circ \sim 15^\circ$ 으로 한정하면 각도 모호성은 3.92 % 수준으로 감소한다. 우측 열은 그림 8과의 비교를 위해 나타내었다. 우측 열에서 그림 8보다는 도약 오차

그림 10. 입력 각도 대 출력 각도 ( $3.5 \lambda / -5 \lambda$ )Fig. 10. Input angle vs. output angle ( $3.5 \lambda / -5 \lambda$ ).

빈도가 낮음을 알 수 있으나, 큰 위상 오차  $\sigma_0$ 에 대해서는 각도 모호성이 빈번하게 발생할 수 있음을 예상할 수 있다.

비록 다양한 설계 조건에 대한 분석 결과는 아니지만, 본 논문에서 제시하는 바와 같이 주어진 설계 제한 조건 내에서 파라미터를 설정하고 각도 모호성을 분석하면, 신호처리 전 단계에서 도약 각도 오차에 의한 각도 모호성을 최소화할 수 있는 안테나 기준선을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

### III. 결 론

본 논문에서는 간접계 레이더 고도계와 관련하여, 설계 제한 조건 내에서 최적의 안테나 다중 기준선을 설계하기 위해 위상 오차 및 기준선 간격에 따라 각도 모호성을 분석하였다. 이를 위해 단일 및 다중 기준선에 대한 위상비교 모노펄스 알고리즘을 이론적으로 고찰하고, 실제 설계 결과와 시험데이터로부터 다중 기준선 간접계의 각도 모호성 현상을 검토하였다.

그런 다음 점 표적에 대한 기존의 연구들과 다른 관점에서 지형 다중 표적에 의한 간접계 레이더 고도계의 각도 모호성을 분석하고, 이를 시험데이터와 비교하여 분석 결과의 타당성을 검증한 다음, 이를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션에 기초한 파라미터 연구를 수행하여 각도 모호성을 분석하고, 설계 제한 조건 내에서 각도 모호성을 최소화하기 위한 안테나 기준선을 도출하였다.

향후 본 논문에서 분석한 결과를 적용하여 간접계 안테나의 다중 기준선을 설계함으로써 위상비교 모노펄스 알고리즘에 의한 각도 모호성을 최소화한 후, 후처리 차원에서 각도 모호성 해소 확률을 높이기 위한 신호처리 연구를 수행할 예정이다.

### References

[1] S. Carreño, P. Wilson, P. Ridao, and Y. Petillot, "A survey on terrain based navigation for AUVs," in *OCEANS 2010 MTS/IEEE Seattle*, Seattle, WA, Sep. 2010, pp. 1-7.

[2] N. Polat, M. Uysal, and A. S. Toprak, "An investigation

of DEM generation process based on LiDAR data filtering, decimation, and interpolation methods for an urban area," *Measurement*, vol. 75, pp. 50-56, Nov. 2015.

[3] F. Amzajerdian, D. Pierrottet, L. Petway, G. Hines, and V. Roback, "Lidar system for precision navigation and safe landing on planetary bodies," in *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Laser Sensing and Imaging; and Biological and Medical Applications of Photonics Sensing and Imaging*, Beijing, Aug. 2011, vol. 8192, p. 819202.

[4] H. E. BiNgöl, B. Akin, and Ö. KOC, "Radar altimeter as a navigation aid using hierarchical elevation map clustering", in *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Myrtle Beach, SC, Apr. 2012, pp. 377-381.

[5] J. H. Choi, J. H. Jang, J. H. Lee, and J. E. Roh, "Implementation of signal processing algorithms for an FMCW radar altimeter," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic and Science*, vol. 26, no. 6, pp. 555-563, Jun. 2015.

[6] R. Raney, "The delay/Doppler radar altimeter," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 5, pp. 1578-1588, Sep. 1998.

[7] I. C. Park, S. I. Lee, J. H. Chun, H. J. Lee, and J. H. Jang, "Simulation study of altitude and angle estimation with an InSAR altimeter," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic and Science*, vol. 25, no. 8, pp. 838-848, Aug. 2014.

[8] J. Jensen, "Angle measurement with a phase monopulse radar altimeter," *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 47, no. 4, pp. 715-724, Apr. 1999.

[9] H. K. Sim, M. A. Jung, and S. C. Kim, "A performance analysis of phase comparison monopulse algorithm for antenna spacing and antenna array," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Science*, vol. 40, no. 7, pp. 1413-1419, Jul. 2015.

[10] B. L. Cho, J. S. Lee, J. M. Lee, and S. G. Sun, "Performance comparison to solve angle ambiguity needed to angle of arrival estimation in 2D radar



interferometer," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic and Science*, vol. 23, no. 3, pp. 410-413, Mar. 2012.

- [11] S. E. Lipsky, *Microwave Passive Direction Finding*, New York, NY, John Wiley and Sons, 1987.
- [12] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2001.
- [13] S. M. Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*,

Dedhan, MA, Artech House, 2001.

- [14] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Norwood, MA, Artech House, 2005.
- [15] R. S. Elliott, "An improved design procedure for small arrays for shunt slots", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 31, no. 1, pp. 48-53, Jan. 1983.

하 중 수 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4745-0773>



2001년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)  
2003년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)  
2003년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원  
[주 관심분야] 근접신관, 레이다고도계, 센서 신호처리 등

박 영 식 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6097-346X>



2013년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)  
2015년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)  
2015년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원  
[주 관심분야] 근접신관, 레이다고도계, 회로설계 등

장 중 훈 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8890-7384>



2004년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)  
2007년 2월: 포항공과대학교 정보통신대학원 (공학석사)  
2007년 1월~2011년 10월: LG전자 MC연구소  
2011년 11월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 안테나 설계, FMCW 레이다 설계 등

홍 성 용 [충남대학교/정교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6505-7663>

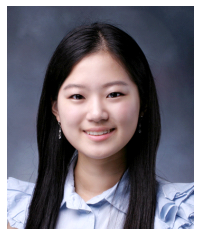


1985년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
1988년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
1994년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
1994년 2월~1996년 8월: 한국쌍신 전자통신 연구소장

1996년 9월~현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 교수  
[주 관심분야] 초고주파 회로

이 수 지 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7265-7963>



2011년 2월: 경북대학교 IT대학 (공학사)  
2017년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
2017년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원  
[주 관심분야] 초고주파 회로, 송수신기, 빔포밍 등