

## 技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.8.766

## 지상레이더의 동적 자세 측정을 통한 추적 정확도 개선

김완규\*

The Improvement of Tracking Accuracy of the Ground-Based Radar  
By the Measurement of Dynamic Attitude

Wan Kyu Kim\*

## ABSTRACT

The inclination attitude of the Ground-Based Radar can be measured by the accelerometer due to its static operation environment, but the measurement error is generated from the angular acceleration of the accelerometer, which is created in mechanical oscillation by the dynamic environment, like the wind, gust, rotating antenna, etc. In this paper, the technique of reducing the measurement error of the attitude by the dynamic attitude is proposed and the result of the simulation and the analysis of tracking error by the attitude error are presented.

## 초 록

항공기용, 함정용 레이더에 비해 비교적 정적인 지상 레이더의 운용 환경을 고려하면 정적인 환경에서 경사면을 측정하는 경사계 등에 사용되는 가속도계로 레이더의 정적인 자세각을 측정할 수 있지만, 바람 및 돌풍 또는 회전하는 안테나의 원심력 등에 의해 동적인 움직임이 발생하게 되는 경우 각가속도가 발생하여 자세각 측정에 오차가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 위와 같이 발생한 자세각 측정 오차와 표적 위치에 따른 추적 오차에 대해 분석하고, 가속도계만을 사용한 동적 자세각 측정방법을 제시하고 이에 따라 개선된 추적오차를 시뮬레이션을 통해 결과를 나타내었다.

**Key Words** : Ground-Based Radar(지상레이더), Accelerometer(가속도계), Radar Attitude(레이더 자세), Tracking error(추적 오차)

## 1. 서 론

현재 사용되고 있는 군사용 레이더의 목적은 대상 표적의 거리, 속도, 각도 등의 정확한 정보 획득하는 것이다. 레이더는 레이더 자체의 기준 좌표계를 기준으로 하는 상대적인 값을 측정하며, 따라서 표적의 절대적인 정보의 획득을 위해서는 측정된 상대적인 값에 레이더 자체의 속도,

자세, 위치 등의 항법 정보에 의한 보정이 반드시 필요하다.

특히 레이더 단독 체계가 아닌 외부 표적 지정(External Target Designation / Cueing), 교전 유도탄 추적을 위한 포착 기능(Missile Lock-on) 등의 핵심적인 연동 기능이 포함된 교전레이더의 경우 독립된 각 외부 연동 체계(사격통제 시스템, 비행 유도탄)와 주고받는 전송 데이터의 좌표계 변환이 필수적이므로 이러한 항법 정보의 중요성은 더욱 커진다<sup>(1)</sup>.

항공기용 레이더나 함정용 레이더의 경우 레이더가 탑재되어 있는 모체인 항공기나 함정의 기동 등에 의해 위치, 속도, 자세 등이 실시간으

† 2011년 4월 18일 접수 ~ 2011년 7월 26일 심사완료

\* 정회원, 국방과학연구소

교신저자, E-mail : oneq99@kaist.ac.kr,

대전광역시 유성구 수남동 111

로 변하는 상황에서 이의 보상을 위해 여러 가지 항법 장치와 복잡한 항법 알고리즘이 사용된다.<sup>(2), (3)</sup>

지상레이더의 경우는 운용 환경상 앞서 설명한 항공기용, 함정용 레이더 등에 비해 그 특성에 약간의 차이점이 있다. 고정형 지상레이더의 경우 레이더 배치 사이트에 고정되어 설치가 되고 나면 운용 중에는 위치가 변하지 않으며, 이동형 지상레이더인 경우도 이동 중에 운용하는 경우는 거의 없다. 따라서 대부분의 경우 배치 장소의 경사각에 따른 초기 자세 정렬만이 필요할 뿐, 이외의 실시간 항법 정보 획득의 필요성은 극히 적어지기 때문에 항공기용, 함정용 레이더에 일반적으로 사용되는 자이로 등의 관성항법 장치(Inertial Navigation System) 및 복잡한 항법 알고리즘의 사용이 단순해질 수 있다.

이와 같이 본 논문에서는 지상레이더의 자세각 측정시 일반적으로 정적인 환경에서 경사각 측정에 사용되는 가속도계를 이용한 경사계(Tilting Sensor)를 사용하여 지상레이더의 자세를 측정할 경우 외부의 동적인 요소에 의해 발생할 수 있는 자세각 측정 오차에 대해 분석하고, 동적인 환경에서도 가속도계를 사용하여 자세각을 측정하면서 이러한 오차를 제거할 수 있는 방법을 제시한다. 또한 자세 오차 및 좌표변화에 의한 표적 추적 오차를 분석하며 최종적으로 실제 동적 환경과 비슷한 조건을 사용하여 시뮬레이션 함으로써 제안된 자체 측정방법이 유효함을 나타내었다.

## II. 본 론

### 2.1 동적인 환경 하에서 가속도계를 사용한 자세 측정의 문제점

서론에서 설명한 바와 같이 일반적으로 위치가 고정되어 있는 물체의 자세 즉, 기움각을 측정하는 가장 쉬운 방법은 가속도계를 사용하는 것이다. 기울어진 지상 레이더에 장착된 가속도계는 그림 1과 같이 기움각 만큼의 중력가속도  $g$ 를 측정하며, 측정 가속도를  $f$ 라하고 기움각을  $\alpha$ 라 하면 이 관계는 아래 식 (1)과 같다.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{f}{g}\right) \quad (1)$$

하지만 정적(static)인 기움각 이외에 바람이나 돌풍, 또는 안테나의 회전 등의 외력에 의해 동적(dynamic)인 자세 변화가 유발될 수 있다. 이는 레이더의 기구적인 특징, 즉 레이더 구조물

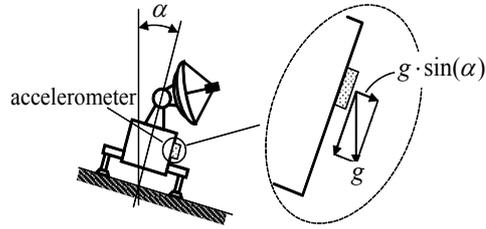


그림 1. Attitude Measurement using the accelerometer in static environment

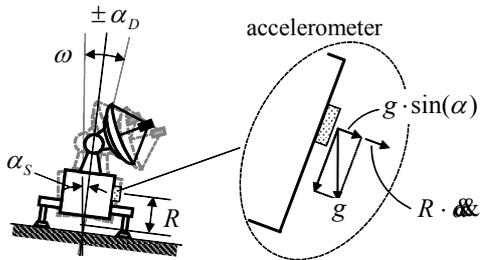


그림 2. Radar attitude in dynamic environment

자체의 특성인 기구적 진동주파수, 기구적 무게 중심 및 회전하는 안테나의 무게와 회전속도 등과 레이더 몸체를 지지하는 유압잭 등의 댐핑 특성에 따라 달라지고, 이에 따라 레이더에 기구적 진동이 발생할 수 있으며 진동하는 진폭 및 진동수에 따라 각가속도가 발생하여 가속도계가 측정하는 기움각의 크기에 오차가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 기구적인 분석은 생략하고 위와 같은 동적인 움직임에 의한 측정 각도 오차만을 분석하지만, 안테나를 포함한 레이더 몸체는 강체이고 강체가 아닌 부분은 몸체를 지탱하는 유압잭이라 가정을 기본 전제로 한다.

그림 2에서  $\alpha_s$ 는 레이더 배치장소의 경사면에 의한 정적인 기움각이며,  $\alpha_D$ 는 외력에 의해 발생한 진동의 최대 진폭,  $\omega$ 는 진동 주파수이며  $R$ 은 진동의 반경이다. 따라서 순간적인 레이더의 기움각  $\alpha$ 는 식 (2)과 같이 표현되며

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_D \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

이에 대한 각속도 및 각가속도는 다음과 같다.

$$\dot{\alpha} = \alpha_D \cdot \omega \cdot \cos(\omega t), \quad \ddot{\alpha} = (-\alpha_D) \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad (3)$$

이 때 가속도계는 중력가속도에 의한 가속도 및 각가속도에 의한 가속도를 더한 값을 측정하므로 가속도계 측정값은 식 (4)와 같다.

$$f = g \cdot \sin(\alpha) + R \cdot (-\alpha_D) \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad (4)$$

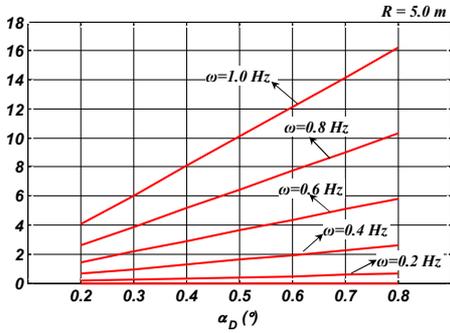


그림 3. The attitude measurement angle error by using the 1 accelerometer in the dynamic environment

측정된 가속도 값이 식 (4)와 같을 때 측정된 각도  $\alpha'$ 는 식 (5)에 따라 실제 기울기 각  $\alpha$ 과 다른

$$\alpha' = \sin^{-1} \left( \frac{g \cdot \sin(\alpha) + R \cdot (-\alpha_D) \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)}{g} \right) \quad (5)$$

이 되고 이에 따른 각도 오차인  $\alpha - \alpha'$ 는 그림 3과 같다. 그림 3은 가속도계 장착위치가 진동 중심으로부터 5m,  $\alpha_D$ 의 값은  $0.2^\circ \sim 1.0^\circ$ ,  $\omega$ 의 값은 0.2~1.0Hz라 가정하였으며, 뒷부분에서도 설명하였지만 이 값은 레이더 구조물의 형상 및 기구적 특성, 레이더 몸체를 지지하는 유압잭 특성과 풍속 등에 의한 운용조건에 따른 분석결과를 토대로 정해져야 한다.

위와 같이 정적인 환경이 아닌 경우 가속도계로부터 측정되는 가속도는 동적인 움직임에 의해 각가속도 성분을 포함하므로 그림 3에서 보는 바와 같이 레이더의 자세 측정에 큰 오차를 발생시킨다. 항공기나 함정과 같은 경우는 이러한 동적인 자세의 측정을 위해 관성항법장치를 사용하고 있으나<sup>(4)</sup>, 지상레이더의 경우 대부분의 경우 정적인 움직임만이 존재하는 환경에서 운용하므로 이러한 고가의 관성항법장치를 사용하는 것은 비용적인 측면에서 효율적이지 못하다. 따라서 기존에 경사각을 측정하는 가속도계만을 사용하여 이러한 동적인 움직임이 있는 상태에서 자세각을 정확히 측정하는 방법이 필요하다.

가속도계만을 사용하여 동적인 움직임에 의한 측정 각도 오차를 제거하기 위해서는 식 (4)의 두 번째 항  $R \cdot (-\alpha_D) \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)$ 의 각가속도 성분을 제거해야 한다. 단순히 생각하면 이를 위해  $\omega$  주파수 성분의 신호를 차단하는 저역통과 필터를 가속도계 신호에 추가하는 방법을 생각할

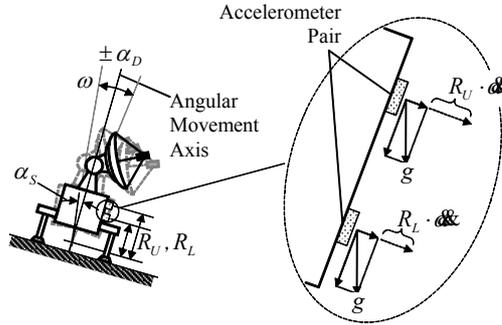


그림 4. Dynamic attitude measurement using accelerometers pair

수 있다. 하지만 식 (4)의 첫 번째 항  $g \cdot \sin(\alpha)$ 의 실제 자세각  $\alpha$ 는 식 (2)와 같이  $\alpha = \alpha_s + \alpha_D \cdot \sin(\omega t)$ 이므로 이러한 방법은 실제 자세각인  $\alpha$ 의  $\alpha_D \cdot \sin(\omega t)$ 인 동적인 움직임에 의한 자세 성분 또한 제거하므로 적용할 수 없다.

이처럼 동적인 환경에서 가속도계를 사용하여 동적인 움직임에 대한 오차가 제거된 자세각 측정을 위해 본 논문에서 제안하는 방법은 가속도계 두 개를 쌍으로 진동 축으로부터 각각 다른 위치에 적용하는 것으로 그림 4와 같다.

이 경우 두 가속도계에서 측정되는 각가속도  $\ddot{\alpha}$ 는 같고 진동 반경  $R_U, R_L$ 만 다르므로 측정되는 값  $f_U, f_L$ 는 아래의 식 (6), (7)과 같다.

$$f_U = g \cdot \sin(\alpha) + R_U \cdot \ddot{\alpha} \quad (6)$$

$$= g \cdot \sin(\alpha) + R_U \cdot (-\alpha_D) \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)$$

$$f_L = g \cdot \sin(\alpha) + R_L \cdot \ddot{\alpha} \quad (7)$$

또한 식 (6), 식 (7)로부터 다음 식 (8)을 얻을 수 있으며

$$\ddot{\alpha} = \frac{f_U - f_L}{R_U - R_L} \quad (8)$$

다시 이를 식 (6)에 대입하면 식 (9)와 같이 각가속도에 의한 오차가 제거된  $\alpha$ 를 얻을 수 있다.

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_D \cdot \sin(\omega t) \quad (9)$$

$$= \sin^{-1} \left( \frac{1}{g} \cdot \frac{R_U \cdot f_L - R_L \cdot f_U}{R_U - R_L} \right)$$

식 (9)에서  $f_U, f_L$ 는 가속도계에서 측정된 값이고  $R_U, R_L, g$ 는 이미 알고 있는 값이므로 동적 움직임 상황에서도 정확한 자세각을 측정할 수 있다.

**2.2 자세 측정 오차 및 표적 위치에 따른 추적 오차분석**

레이더 자세 측정에 오차가 있는 경우 추적하는 표적에 대한 위치에 오차가 생기며 이는 표적의 속도, 거리보다는 방위각, 고각 방향으로 발생한다.

본 절에서는 측정된 레이더의 자세에 오차가 있는 상태에서 운용할 경우 추적 중인 표적의 추적 방위각 오차, 고각 오차를 구하여 본다.

표적의 위치를 LGCCS (Local Ground Cartesian Coordinate System) 좌표계 상에서 NUE 좌표로 정의할 때  $x$ (North),  $y$ (Up),  $z$ (East)로 표현하고 레이더 기준 좌표를  $x_R, y_R, z_R$ 로 표현한다면, LGCCS 좌표계에서 레이더 기준 좌표계로 변환하는 방법은 그림 5와 같이 측정된 레이더의 헤딩( $ah$ ), 피치( $\alpha z$ ), 롤( $\alpha x$ )의 오일러 각으로 오일러 좌표변환을 사용하는 것이다<sup>(6)</sup>.

위와 같은 상황에서 LGCCS상 표적의 좌표를  $X = [x \ y \ z]^T$ 라 하고 레이더 기준의 표적의 좌표를  $X_R = [x_R \ y_R \ z_R]^T$ 이라 하면 식 (10)과 같은 관계가 성립하며,

$$A_{\alpha x} \cdot A_{\alpha z} \cdot A_{ah} \cdot X = X_R \tag{10}$$

(10)에서  $A_{\alpha x}, A_{\alpha z}, A_{ah}$ 는 LGCCS상의 좌표계에서 각각  $x$  축,  $z$  축,  $y$ 축을 중심으로 회전하는 오일러 좌표변환 행렬이며 이는 식 (11)과 같다. 또한 지상레이더의 경우 배치 완료 후 레이더

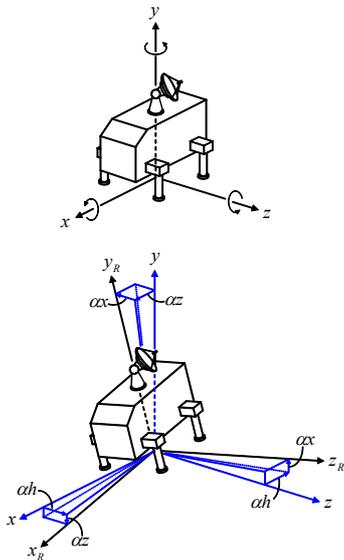


그림 5. Target Position in LGCCS and Radar Referenced Coordinate

$$\begin{aligned}
 A_{\alpha x} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha x) & -\sin(\alpha x) \\ 0 & \sin(\alpha x) & \cos(\alpha x) \end{bmatrix} \\
 A_{\alpha z} &= \begin{bmatrix} \cos(\alpha z) & -\sin(\alpha z) & 0 \\ \sin(\alpha z) & \cos(\alpha z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_{ah} &= \begin{bmatrix} \cos(ah) & 0 & \sin(ah) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(ah) & 0 & \cos(ah) \end{bmatrix} \tag{11}
 \end{aligned}$$

의 헤딩에 변화가 없으므로, 롤, 피치 방향의 측정 오차만 발생한다고 가정하고 자세의 측정 오차가  $\Delta\alpha x, \Delta\alpha z$  만큼 발생한 상태의 레이더 기준의 표적 좌표를  $X_{RE} = [x_{RE} \ y_{RE} \ z_{RE}]^T$ 라 하면 식 (10)과 같은 방법으로 식 (12)과 같이 되고,  $A_{(\alpha x + \Delta\alpha x)}, A_{(\alpha z + \Delta\alpha z)}$ 는 식 (11)의 행렬식에서  $\alpha x, \alpha z$  대신  $\alpha x + \Delta\alpha x, \alpha z + \Delta\alpha z$ 를 대입한 행렬식이다.

$$A_{(\alpha x + \Delta\alpha x)} \cdot A_{(\alpha z + \Delta\alpha z)} \cdot A_{ah} \cdot X = X_{RE} \tag{12}$$

LGCCS 좌표 기준의 표적 위치  $X$ 는 동일하므로 식 (10), (12)를  $X$ 에 대해 정리하면

$$\begin{aligned}
 A_{ah}^{-1} \cdot A_{\alpha z}^{-1} \cdot A_{\alpha x}^{-1} \cdot X_R &= \\
 A_{ah}^{-1} \cdot A_{(\alpha z + \Delta\alpha z)}^{-1} \cdot A_{(\alpha x + \Delta\alpha x)}^{-1} \cdot X_{RE} &\tag{13}
 \end{aligned}$$

이 되고, 또한 좌표변환 행렬의 특성에 따라  $A_{(\alpha x + \Delta\alpha x)} = A_{\alpha x} \cdot A_{\Delta\alpha x} = A_{\Delta\alpha x} \cdot A_{\alpha x}, A_{(\alpha z + \Delta\alpha z)} = A_{\alpha z} \cdot A_{\Delta\alpha z} = A_{\Delta\alpha z} \cdot A_{\alpha z}$ 이 성립하므로 식 (13)으로부터  $X_R$ 과  $X_{RE}$ 의 관계는 식 (14)와 같다.

$$X_{RE} = A_{\alpha x} \cdot A_{\Delta\alpha x} \cdot A_{\Delta\alpha z} \cdot A_{\alpha x}^{-1} \cdot X_R \tag{14}$$

$\Delta\alpha x, \Delta\alpha z$ 이 충분히 작다고 가정하면  $\sin\Delta\alpha x \approx \Delta\alpha x, \sin\Delta\alpha z \approx \Delta\alpha z, \cos\Delta\alpha x \approx \cos\Delta\alpha z \approx 1$ 이고,  $\Delta\alpha x \cdot \Delta\alpha z \approx 0$ 이 되어 식 (14)의 변환행렬은 식 (15)과 같이 근사화가 가능하다.

$$\begin{aligned}
 A_{\alpha x} \cdot A_{\Delta\alpha x} \cdot A_{\Delta\alpha z} \cdot A_{\alpha x}^{-1} &\approx \\
 \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\alpha z \cdot \cos(\alpha x) & -\Delta\alpha z \cdot \sin(\alpha x) \\ \Delta\alpha z \cdot \cos(\alpha x) & 1 & -\Delta\alpha x \\ \Delta\alpha z \cdot \sin(\alpha x) & \Delta\alpha x & 1 \end{bmatrix} &\tag{15}
 \end{aligned}$$

또한 실제 자세각인  $\alpha x, \alpha z$ 도 미소각 조건을 만족한다고 가정하면 식 (15)으로부터 한 번 더 근사화가 가능하며 아래 식 (16)과 같은 Skew symmetric 행렬 형태로 정리된다.<sup>(6)</sup>

$$\begin{aligned}
 A_{\alpha x} \cdot A_{\Delta\alpha x} \cdot A_{\Delta\alpha z} \cdot A_{\alpha x}^{-1} &\tag{16} \\
 \approx \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\alpha z & 0 \\ \Delta\alpha z & 1 & -\Delta\alpha x \\ 0 & \Delta\alpha x & 1 \end{bmatrix} &
 \end{aligned}$$

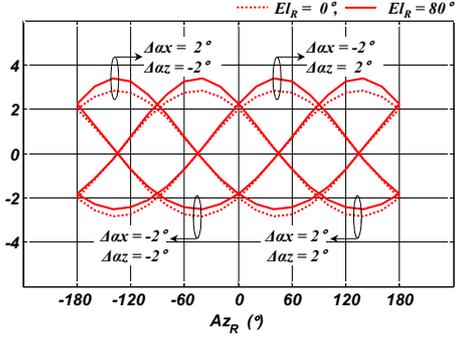


그림 6. Tracking error (Elevation) by radar attitude measurement error

$X_R = [x_R \ y_R \ z_R]^T$ ,  $X_{RE} = [x_{RE} \ y_{RE} \ z_{RE}]^T$  이므로 식 (14), 식 (16) 의해 식 (17)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} x_{RE} &= x_R - \Delta\alpha_z \cdot y_R \\ y_{RE} &= \Delta\alpha_z \cdot x_R + y_R - \Delta\alpha_x \cdot z_R \\ z_{RE} &= \Delta\alpha_x \cdot y_R + z_R \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)은 직각좌표계(Cartesian Coordinate)로 표현된 레이더 기준의 표적 추적 좌표이므로 자세각 오차로 유발되는 표적 추적 각도(방위각, 고각)의 영향을 확인하기 위해서는 이를 구좌표로 변환해야 하며, 추적 오차에 의한 거리에 대한 영향은 없으므로 거리에 대해 Normalize 하면 아래 식 (18)과 같다.

$$\begin{aligned} X_R &= \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos El_R \cdot \cos Az_R \\ \sin El_R \\ \cos El_R \cdot \sin Az_R \end{bmatrix} \\ X_{RE} &= \begin{bmatrix} x_{RE} \\ y_{RE} \\ z_{RE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos El_{RE} \cdot \cos Az_{RE} \\ \sin El_{RE} \\ \cos El_{RE} \cdot \sin Az_{RE} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (17), 식 (18)를 정리하면 피치 오차( $\Delta\alpha_x$ ), 롤 오차( $\Delta\alpha_z$ )에 의한 레이더 기준의 추적 방위각, 고각 오차를 구할 수 있다.

먼저 고각 방향의 추적 오차를 구하기 위해  $y$  방향을 계산해보면 식 (17)과 식 (18)로부터 아래 식 (19)이 얻어지고

$$\begin{aligned} El_{RE} &= \sin^{-1}\{\sin El_R + \cos El_R \cdot (\Delta\alpha_z \cdot \cos Az_R - \Delta\alpha_x \cdot \sin Az_R)\} \end{aligned} \quad (19)$$

그 결과는 그림 6과 같다.

마찬가지로 방위각 방향의 추적 오차는  $Az_{RE} = \tan^{-1}(z_{RE}/x_{RE})$  이므로 식 (17)과 식 (18)

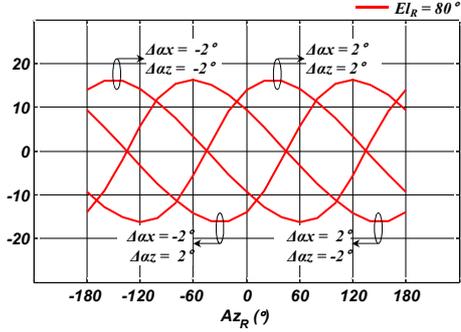


그림 7. Tracking error (Azimuth) by radar attitude measurement error

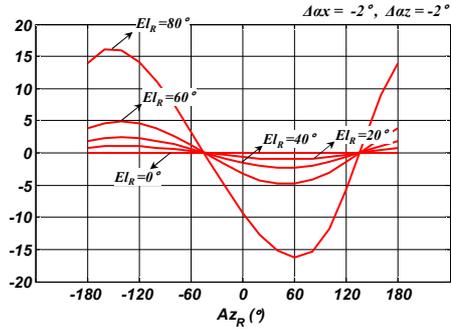


그림 8. Tracking error (Azimuth) by target elevation

로부터 아래 식 (20)이 얻어지며 그 결과는 그림 7, 그림 8과 같다.

$$Az_{RE} = \tan^{-1} \left( \frac{\sin Az_R + \tan El_R \cdot \Delta\alpha_x}{\cos Az_R - \tan El_R \cdot \Delta\alpha_z} \right) \quad (20)$$

식 (19), (20)과 그림 6~8의 결과로 보면 표적의 추적 오차는 레이더의 자세 오차뿐만 아니라 자세 오차가 발생한 상황에서 표적의 위치에 의해서도 영향을 받는 것을 알 수 있다. 특히  $\Delta\alpha_x$ ,  $\Delta\alpha_z$ 에 의해 결정되는 기울어진 방향과 표적의 방위각과의 관계가 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

### 2.3 시뮬레이션 수행 및 결과

본문 2.1, 2.2을 통해 레이더의 자세 측정 시 동적인 오차를 제거하는 방법과 자세 오차 발생에 의한 추적중인 표적의 추적 오차에 대해 분석하였다. 본 절에서는 위의 결과들을 토대로 동적인 환경에서 모의표적을 발생시켜 자세각 측정 오차와 자세에 따른 표적 추적 오차를 시뮬레이

표 1. Simulation Parameters

$\alpha_{Sr}$ (°)	3	z축(롤) 방향 정적 자세각
$\alpha_{Sz}$ (°)	2	x축(피치) 방향 정적 자세각
$\alpha_{Dr}$ (°)	0.2	z축(롤) 방향 동적 자세각
$\alpha_{Dz}$ (°)	0.3	x축(피치) 방향 동적 자세각
R (m)	5	가속도계의 진동 반경
w (Hz)	0.8	레이더 동적 진동수
측정잡음(°)	0.1	가속도계의 측정 잡음
추적주기(s)	0.1	표적 추적 주기

선 하였다. 추적 오차는 그림 6~8에서 보듯이 레이더의 자세각 측정오차 뿐만 아니라 표적 위치에도 관계가 있기 때문에 이 영향을 효과적으로 살펴보기 위해 표적의 궤적을 다양한 방위각, 고각의 위치를 갖도록 그림 9와 같이 고도 2km로 거리 100km부터 진입하는 표적을 생성하였다.

시뮬레이션은 아래의 표 1, 그림 10에 제시된 바와 같이 실제 상황에서 발생 가능한 롤, 피치 방향으로 정적인 기울기와 외란 등에 의한 동적인 움직임을 적절히 인가하였으며, i) 자세각 측정이 없는 경우, ii) 가속도계 1개만을 사용하여 자세각을 측정하는 경우, iii) 본 논문에서 제안된 가속도계 같은 축에 쌍으로 적용하여 자세각을 측정하는 경우, 총 3가지 조건으로 추적 오차를 살펴보았다.

그림 11은 측정 방법에 따른 자세각 측정값과 측정 오차를 나타낸다.

i) 첫 번째로 측정 장치가 없이, 즉 자세각 측정이 없는 경우 위 그림에서 나타나듯이 측정값은 0이다. 따라서 정적인 자세, 동적인 자세 모두를 측정하지 못하지만, 정확히 자세각만큼의 오차를 가지며 동적 자세에 의해 발생하는 각가속도로 인한 측정 오차는 없었다.

ii) 두 번째로 가속도계 1개를 사용한 일반적인 방법으로 자세각을 측정하는 경우 위 그림에서 보듯이 정적인 자세는 잘 측정되는 것(측정된 자세각이 정적인 자세 각도인  $\alpha_{Sr}=3^\circ$ ,  $\alpha_{Sz}=2^\circ$ 를 기준으로 oscillation함)을 볼 수 있다. 하지만 아래의 그림에서 보듯이 동적인 자세( $\alpha_{Dr}=0.2^\circ$ ,  $\alpha_{Dz}=0.3^\circ$ )에 의해 각가속도가 발생하여 측정 오차가 x축의 경우 최대 약  $\pm 2.8^\circ$ (peak), z축의 경우 최대 약  $\pm 4^\circ$ (peak)까지 발생한 것을 확인할 수 있다.

iii) 세 번째로 본 논문에서 제안한 가속도계 2개를 사용하여 측정각도를 측정하는 경우, 위 그

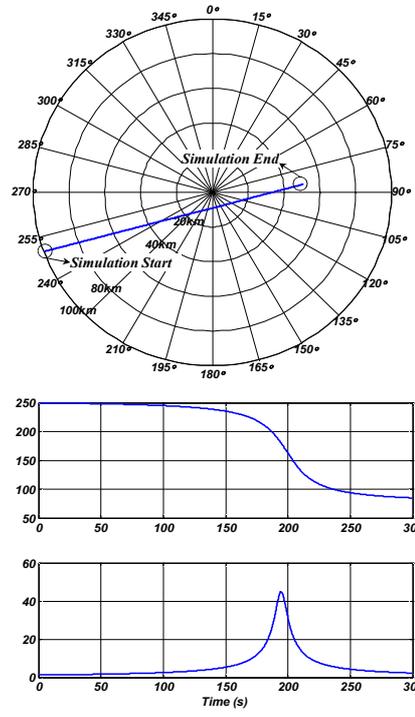


그림 9. Target Trajectory for the simulation

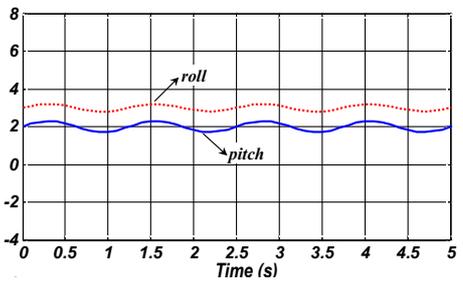


그림 10. Applied radar attitude for simulation

림에서 보듯이 정적인 자세각, 동적인 자세각 모두 시뮬레이션을 위해 인가한 자세각과 같은 측정값을 보였으며, 아래 그림에서 보듯이 각가속도에 의한 오차가 제거되어 측정잡음 정도의 측정 오차만 갖는 것을 알 수 있다.

그림 11에서 확인할 수 있듯이 정적인 자세각과 동적인 자세각이 존재하는 환경에서 각각의 자세각 측정 방법에 따른 특징은 표 2와 같다.

각 방법에 따라 측정된 자세각에 의한 레이더 추적 시뮬레이션 결과는 아래 그림 12와 같고 이는 전 추적 구간 중 일부를 나타내며 각 자세각 측정 방법에 따른 추적 각도를 나타낸다.

i) 자세각 측정이 없는 경우는 표적의 위치에 대해 주로 정적인 자세각 측정 오차에 대한, bias

표 2. Measurement characteristic

	i) No Attitude Meas.	ii) Conventional Meas.	iii) Proposed Meas.
정적인 (static) 자세각	측정 못함	측정됨	측정됨
동적인 (Dynamic) 자세각	측정 못함	측정됨	측정됨
가속도 측정	없음	측정됨	없음 (제거됨)

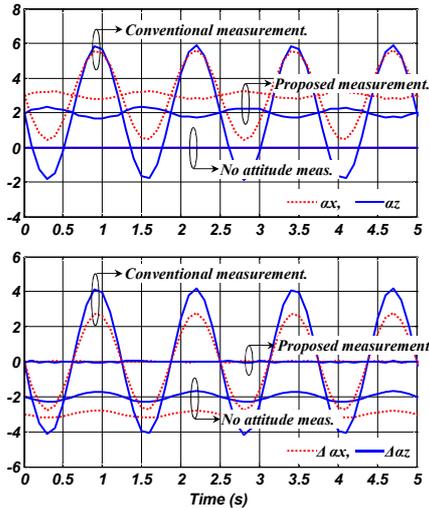


그림 11. Simulation Result - Attitude measurement and errors of that by using i)No attitude measurement, ii)Conventional method, iii)Proposed method

오차 형태의 추적 오차가 발생하였다. 물론 동적인 자세각 측정도 없기 때문에 추적 오차 상 약간의 oscillation도 있지만, 정적인 자세각  $\alpha_{Sr}=3^\circ$ ,  $\alpha_{Sz}=2^\circ$ 에 비해 동적인 자세각  $\alpha_{Dx}=0.2^\circ$ ,  $\alpha_{Dz}=0.3^\circ$ 이 작기 때문에 주로 정적인 자세각에 대한 영향이 더 크게 나타났다.

ii) 가속도계 1개를 사용한 일반적인 자세각 측정의 경우 예상한 바와 같이 표적의 위치에 대해 oscillation 형태의 추적 오차가 발생하였다. 이는 앞서 분석한 바와 같이 각가속도에 의한 영향으로 자세각 측정 오차가 oscillation 형태를 갖기 때문이며, 또한 정적인 자세각은 측정되어 추적시 보상되었으므로 표적의 위치를 중심으로 oscillation하는 것을 확인할 수 있다.

iii) 본 논문에서 제안한 측정방법의 경우 표적의 위치에 대해 추적 오차가 거의 발생하지 않고

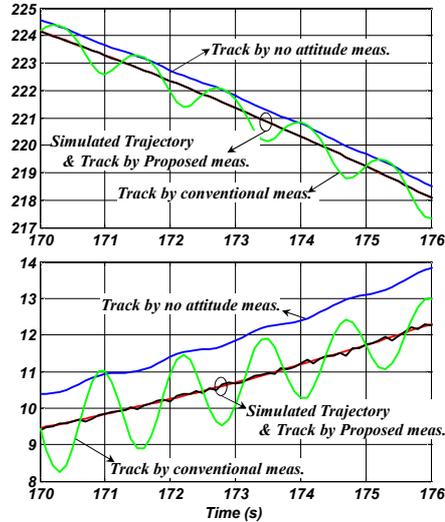


그림 12. Simulation Result - Tracking angle(Az, El) by using i)No attitude meas., ii)Conventional meas., iii)Proposed meas.

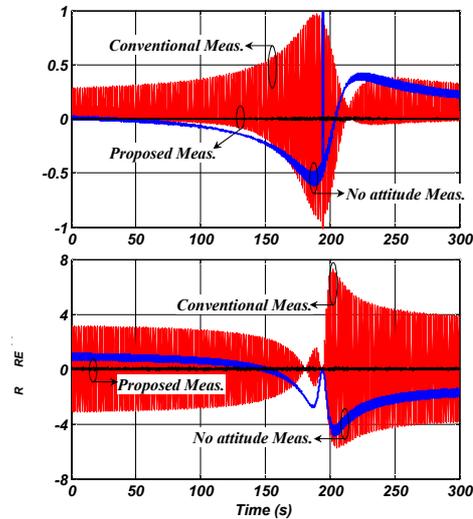


그림 13. Simulation Result - Tracking errors generated by using i)No attitude meas. and ii)Conventional meas. and iii)Proposed meas.

정확한 추적이 이루어짐을 확인할 수 있다.

추적 시뮬레이션 결과에 따라 각각의 자세각 측정 방법에 따른 추적 오차를 그림 13에 제시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 i)의 자세각 측정이 없는 경우와 ii)의 가속도계 1개를 사용하여 자세각을 측정한 경우의 추적 오차는 어느 경우가 더 정확하고 오차가 작다고 말할 수 없고 레

이더가 배치된 정적인 경사각과 발생된 동적인 자세각의 특성에 따라 좌우된다. 또한 그림 11과 같이 자세각 측정오차가 일정한 형태로 반복 (oscillation)되는 것에 비해 추적 오차의 형태가 일정하지 않은 것은, 본문 2.2의 식 (20), (21)에서 분석한 바와 같이 추적오차는 자세각 측정오차 ( $\Delta\alpha_x, \Delta\alpha_z$ ) 뿐만 아니라 표적의 위치 ( $Az_R, E_R$ ) 에도 관계가 있기 때문이고 이렇게 각 경우에서 발생한 추적 오차는 본문 2.2의 식 (20), (21)의 추적 오차 분석과 일치하는 것을 알 수 있다.

마지막으로 이와 같이 자세각 측정이 없는 경우와 1개의 가속도계를 사용한 자세각 측정의 경우에 비해 iii)의 본 논문의 자세각 측정방법에 의한 추적 오차는 거의 발생하지 않은 것을 알 수 있고, 자세각 오차를 제거한 동적인 자세각 측정을 통해 추적 정확도가 향상된 것을 확인할 수 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 지상레이더가 동적인 환경에서 표적의 정확한 위치를 추적하는데 영향을 줄 수 있는 레이더의 동적 자세각 측정에 대해 알아보았다. 일반적으로 정적인 환경에서 자세각을 측정하는 가속도계에 대해 알아보았고, 이러한 측정 방법이 동적인 환경에서 오차를 발생시키는 원인을 분석하였다. 이에 본 논문에서는 지상레이더와 같은 고정된 위치의 운용환경에서 고가의 관성항법장치의 사용 없이 동적인 자세각을 측정하면서 동시에 동적인 자세에 의한 각가속도 성분을 제거하여 정확한 동적 자세각을 측정하는 방법을 제시하였다.

또한 측정된 자세각 오차에 의해 레이더의 표적 추적 시 발생하는 추적 오차에 대해 분석하였고, 자세각 측정과 표적 추적 시뮬레이션을 통해 정확한 자세각 측정이 추적 정확도를 향상시키는 것을 확인하였다.

### 참고문헌

- 1) Naval Education and Training Professional Development and technology center, "Fire Controlman, Volume2 - Fire - Control - Radar Fundamental", Nonresident Training Course, Oct. 2000.
- 2) Jeffery R. Layne, Lt Erik P. Blasch, "Integrated Synthetic Aperture Radar and Navigation Systems For Targeting Application", Fusion Technology Branch Combat Information Division Avionics Directorate, Sept. 1997.
- 3) David Titterton, John Weston, "Strapdown Inertial Navigation Technology, 2nd Edition", The institution of Electrical Engineers, 2004.
- 4) Paul G. Savage, "Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 1: Attitude Algorithm", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 21, No. 1, Jan-Feb, 1998.
- 5) 이민준, 김승각, "함정용 탐색레이더 전자빔 보상 알고리즘", 전자공학회논문지 제41권 TC편 제2호, 2004년 2월.
- 6) George M. Siouris, "Aerospace Acionics Systems, A Modern Synthesis", Academic Press, Inc, 1993.