

나로우주센터 추적레이더의 좌표 변환에 관한 연구

신한섭*, 최지환**, 김대오***, 김태형****

The Study on Coordinate Transformation of the Tracking Radar in NARO Space Center

Han-Seop Shin*, Jee-Hwan Choi**, Dae-Oh Kim***, Tae-Hyung Kim****

Abstract

The tracking radar systems in NARO space center are used in order to acquire the TSPI (Time, Space, and Position Information) data of the launch vehicle. The tracking radar produce the measurements of tracked targets in the radar-centered coordinate system. When the tracking radar is in the Cartesian/Polar tracking mode, the state vector data is sent in radar-centered Cartesian/Polar coordinate system to RCC. RCC also send the slaving data in Test Range coordinate system to the tracking radar. So, the tracking radars have to transform the slaving data in Test Range coordinate system into in radar-centered coordinate system. In this study, we described the coordinate transformation between radar-centered coordinate system and Test Range coordinated system.

초 록

나로우주센터 추적레이더가 획득한 실시간 위치 정보는 발사통제시스템에서 위치, 속도, 비행궤도 표시, 예상궤도 진입여부 및 안전을 위한 비행종료시점 판단 등의 중요한 데이터로 사용된다. 추적레이더에서 발사통제시스템으로 전송하는 표적의 위치 정보는 추적레이더 중심의 좌표값 데이터이며, 발사통제시스템에서 추적레이더로 전송하는 Slaving 데이터는 발사대 중심의 좌표값 데이터이다. 이렇듯 추적레이더와 발사통제시스템 간의 송수신 데이터는 각 시스템에 맞게 적절하게 좌표 변환이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 나로우주센터 추적레이더 간의 상호 데이터 송수신 및 발사통제시스템과의 데이터 통신에 사용되는 각각의 좌표계 및 좌표계 간의 좌표 변환에 대해 기술하였다.

키워드 : Tracking Radar (추적레이더), 좌표계 (Coordinates System), 좌표 변환 (Coordinate Transformation), 나로우주센터 (NARO Space Center)

접수일(2011년 5월 20일), 수정일(1차 : 2011년 6월 27일, 게재 확정일 : 2011년 7월 1일)

* 기술관리팀/hsshin@kari.re.kr

** 기술관리팀/choijh@kari.re.kr

***기술관리팀/daeokim@kari.re.kr

**** 기술관리팀/thkim@kari.re.kr

1. 서 론

추적레이더는 매우 짧은 시간에 폭이 좁은 펄스를 연속적으로 지향성 안테나를 통하여 표적에 위치시켜 표적의 현재 위치를 추적하는 시스템이다. 추적레이더가 표적을 추적하는 방식은 송신 신호가 표적으로부터 반사되어 돌아오는 신호를 수신하여 추적하는 스킨 추적(Skin Tracking) 모드와 송신 신호에 대한 표적의 응답신호를 수신하여 추적하는 비콘 추적(Beacon Tracking) 모드로 분류된다.

나로우주센터 추적레이더는 발사체의 비행 궤적을 정밀하게 측정하기 위한 용도이며, 발사체를 추적하여 획득한 TSPI (Time, Space, and Position Information) 정보를 발사통제시스템으로 전송하는 역할을 담당하고 있다. 추적레이더가 획득한 실시간 위치 정보는 발사통제시스템에서 위치, 속도, 비행 궤도 표시, 예상궤도 진입여부 및 안전을 위한 비행 종료시점 판단 등의 중요한 데이터로 사용된다.

추적레이더가 획득한 위치 정보는 추적레이더 중심의 좌표값 데이터이기 때문에 발사통제시스템은 추적레이더로부터 수신한 위치 정보를 발사대 중심의 좌표값 데이터로 변환을 해야 한다. 또한, 발사통제시스템에서 추적레이더로 전송하는 Slaving 데이터는 발사대 중심의 좌표값 데이터이므로 추적레이더는 이 Slaving 데이터를 추적레이더 중심의 좌표값 데이터로 변환하여 사용해야 한다. 이렇게 추적레이더와 발사통제시스템 간의 송수신 데이터는 각 시스템에 맞게 적절하게 좌표 변환이 수행되어야 한다.

본 논문에서는 나로우주센터 추적레이더 간의 상호 데이터 송수신 및 발사통제시스템과의 데이터 통신에 사용되는 각각의 좌표계 및 좌표계 간의 좌표 변환에 대해서 기술하였다.

2. 본 론

2.1 추적레이더 시스템 구성 및 특성

나로우주센터 추적레이더 시스템은 옥외에 설치된 안테나, 페테스탈 장비와 옥내의 장비실과 운용실에 설치된 송신기, 수신기, 페테스탈 구동장치 및

컴퓨터 시스템 등으로 구성된다.

추적레이더 시스템은 송신기에서 생성한 고출력 신호를 안테나를 통해 원하는 표적을 향해 송신하고, 표적으로부터 돌아오는 수신 신호는 안테나를 거쳐 수신기로 보내지고, 최종적으로 컴퓨터 시스템의 중앙처리장치에서 표적 추적을 위한 위치 정보를 획득한다. 추적레이더 시스템이 설치된 인근 장소에는 추적레이더의 거리 보정, 안테나 빔 보정 등을 위한 용도로 보정 타워 (calibration tower)가 설치되어 있다. 그림 1은 나로우주센터 추적레이더의 시스템 구성도를 나타낸다 [1].

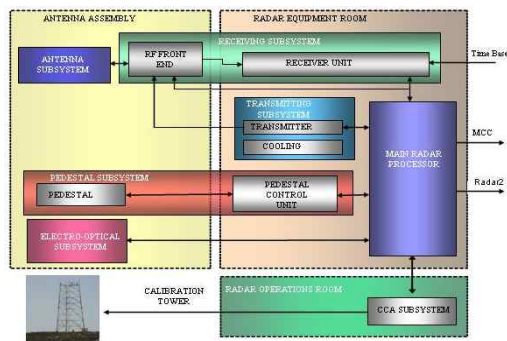


그림 1. 추적레이더의 시스템 구성도

추적레이더의 시스템 주요 특성은 표 1과 같다. 추적레이더의 주파수 대역은 위성발사체 추적레이더용으로 일반적이며 장거리 정밀 계측용으로 매우 유용한 특성을 갖는 C-Band 주파수를 사용하고, 송신기는 주파수 및 위상 안정도가 높은 TWT를 사용하여 위상정합 (Coherent) 송신이 가능하다.

표 1. 추적레이더 시스템의 주요 특성

항목	규격
주파수	• C-Band: 5.3 ~ 5.8GHz
송신기	• 최대출력: 250KW (peak) • 펄스폭: 0.5, 1, 4μsec • PRF: 300 ~ 3,000Hz
수신기	• 중간주파수: 1,750Mhz, 70MHz
안테나	• 형태 및 이득: 4m, 43dBi
페테스탈	• 동작범위: 방위각 (360° 연속) 고도각 (-5° ~ +85°)

나로우주센터 추적레이더는 발사체의 발사 초기부터 정상궤도 진입 시까지 안정된 추적을 위해 전라남도 고흥군에 위치한 나로우주센터와 제주도 서귀포시에 위치한 제주추적소에 각각 1대씩 이중화하여 설치하였다. 나로우주센터와 제주추적소 간에는 별도의 데이터 링크를 구성하여 추적레이더 간 동기 및 데이터 Slaving이 가능하도록 구성하였다. 각각의 추적레이더와 발사통제시스템 간의 통신망은 현지의 지리적 여건을 고려하여 나로우주센터에서는 내부 통신망을 이용하고, 제주추적소는 초고속 국가망을 이용하여 통신망을 구성하였다. 그림 2는 각각의 추적레이더 시스템과 발사통제시스템 간의 통신망 구성을 나타낸다 [2].

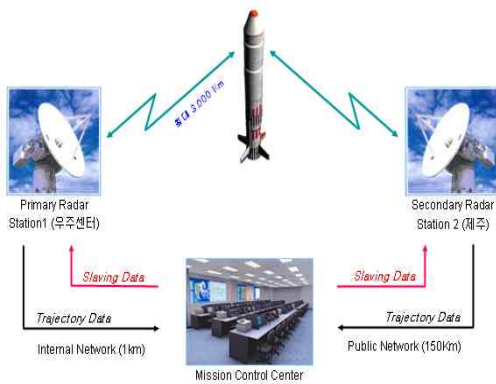


그림 2. 추적레이더 시스템의 통신망 구성

2.2 추적레이더에서 사용되는 좌표계

2.2.1 Test Range 중심의 직교 좌표계

Test Range 중심의 직교 좌표계는 오른손 직교 좌표계 (right-hand Cartesian coordinate system)를 사용한다. 이 좌표계의 원점은 지구 위의 어디든지 가능하지만, 일반적으로 발사대와 같은 Test Range 안의 특정 지점이 된다. X축은 좌표계 원점이 위치한 지역의 천문 북쪽 방향을, Z축은 좌표계 원점이 위치한 지역의 중력 가속도의 반대 방향을, Y축은 서쪽 방향을 나타낸다. 이 좌표계는 지구 곡률에 의한 고도 보정은

이루어지지 않기 때문에 Z축은 항상 좌표계의 원점에 대한 상대적인 위치를 나타낸다. 그러므로, 좌표계의 원점으로부터 멀리 떨어진 지구 표면상의 특정 지점의 Z축값은 음수가 될 수도 있다.

2.2.2 추적레이더 중심의 직교 좌표계

추적레이더 중심의 직교 좌표계는 왼손 직교 좌표계 (left-hand Cartesian coordinate system)이며, 이 좌표계의 원점은 추적레이더가 위치한 지점이다. X축과 Z축은 2.1의 Test Range 중심의 직교 좌표계와 동일하지만, Y축은 반대방향인 동쪽 방향을 나타낸다.

이 좌표계는 Test Range 중심의 직교 좌표계와 같이 지구 곡률에 의한 고도 보정을 하지 않는다. 나로우주센터 추적레이더가 직교 추적 필터 (Cartesian tracking filter)를 사용하여 표적을 추적하는 경우에 사용되는 좌표계이며, 추적레이더가 획득한 표적의 위치 정보는 추적레이더 중심의 직교 좌표계에 대한 값으로 발사통제시스템으로 전송된다.

2.2.3 추적레이더 중심의 극 좌표계

추적레이더 중심의 극 좌표계 (polar coordinate system)의 원점은 추적레이더 중심의 직교 좌표계와 마찬가지로 추적레이더가 위치한 지점이다. Range는 안테나 지향 방향으로 표적까지의 거리, 방위각 (azimuth)은 좌표계의 원점이 위치한 지역의 수평면을 따라 천문 북쪽 방향으로부터 시계 방향으로 측정되는 각도, 고각 (elevation)은 좌표계의 원점이 위치한 지역의 수평면에 대한 수직 위쪽 방향의 각도를 나타낸다.

나로우주센터 추적레이더는 이 좌표계를 이용하여 표적에 대한 기본적인 위치 정보를 측정한다. 또한 추적레이더가 극좌표 추적 필터 (polar tracking filter)를 사용하여 표적을 추적하는 경우에도 역시 이 좌표계를 사용하며, 추적레이더가 획득한 표적의 위치 정보는 추적레이더 중심의 극좌표계에 대한 값으로 발사통제시스템으로 전송된다.

2.2.4 천문 좌표계

천문 좌표계 (astronomical coordinate system) 는 지구 중심을 원점으로 하는 가상의 구 (sphere)에 대한 위도 (latitude)와 경도 (longitude)로 정의되는 구면 좌표계 (spherical coordinate system)이다. 이 천문 좌표계는 다음에 언급할 지리 좌표계 (geographical coordinate system)와 달리 지구의 특정 모양을 가정하지 않는다.

나로우주센터 추적레이더는 Test Range 중심의 직교 좌표계를 추적레이더 중심의 직교 좌표계로 변환하기 위해 필요한 3차원 회전 행렬 (rotation matrix)을 계산하기 위해서 이 좌표계를 사용한다. 이러한 좌표계 변환은 추적레이더에 대한 상대적인 표적의 위치를 계산하기 위해 필요하다.

2.2.5 지리 좌표계

지리 좌표계는 천문 좌표계와 마찬가지로 좌표는 위도와 경도로 정의되지만, WGS-84와 같은 특정한 지구 모형을 적용하여 위도와 경도를 측정한다. 일반적으로 좌표계의 원점이 위치한 지역의 중력 가속도의 방향은 지구 타원체 (Earth ellipsoid)의 수직 방향과 일치하지 않기 때문에 추적레이더는 이러한 차이를 정확히 알아야 한다. 이러한 두 방향 벡터의 차이를 중력 편향 (gravity deflection)이라 일컫는데, 이 값은 중력 가속도의 방향과 지구 타원체의 수직 방향의 각도 차이를 나타낸다.

2.2.6 좌표계의 입력값

나로우주센터 추적레이더는 위에서 언급한 좌표계와 연관된 입력값들이 필요하다. 이 값들은 추적레이더의 시스템 설정값에 데이터 파일로 저장되며, 추적레이더의 기동에 따라 자동적으로 읽혀진다. 추적레이더에서 사용되는 좌표계에 필요한 입력값들은 아래와 같다.

- Test Range 중심의 직교 좌표계에서 추적레이더의 위치값 (X, Y, Z)

- 천문 좌표계에서 추적레이더의 위치값 (위도, 경도, 고도)
- 천문 좌표계에서 Test Range의 원점 좌표값 (위도, 경도, 고도)
- 지역적 중력 편향 (local gravity deflection)

2.3 추적레이더의 좌표 변환

나로우주센터 추적레이더는 표적의 위치 정보를 Range, 방위각 및 고각으로 측정하지만, 추적레이더가 사용하는 추적 필터에 따라 표적의 위치 정보를 극좌표 또는 직교좌표를 사용할 수도 있다. 주로 표적이 추적레이더로부터 근거리에 위치한 경우 직교 좌표를 사용하는 추적 필터를 사용한다.

일반적으로 추적레이더가 획득하는 표적의 위치 정보는 추적레이더 중심의 좌표계를 사용하기 때문에 발사통제시스템은 추적레이더로부터 수신한 위치 정보를 Test Range 중심의 좌표계로 변환해야 한다. 또한, 추적레이더에서 발사통제시스템으로 전송한 위치 정보가 극좌표로 되어 있다면 직교좌표로 먼저 변환을 해야 한다. 추적레이더 중심의 위치 정보 $\vec{x}_{SIS} = [X_{SIS}, Y_{SIS}, Z_{SIS}]^T$ 를 Test Range 중심의 좌표계에 대한 위치 정보 $\vec{x}_{RCC} = [X_{RCC}, Y_{RCC}, Z_{RCC}]^T$ 로 변환하는 식은 다음과 같다.

$$\vec{x}_{RCC} = T \vec{x}_{SIS} + \vec{x}_{SR} \quad (1)$$

$$\vec{x}_{SIS} = T^T(\vec{x}_{RCC} - \vec{x}_{SR}) \quad (2)$$

여기서, T 는 3차원 회전 행렬 (rotation matrix), T^T 는 회전 행렬 T 의 전치 행렬 (transpose matrix)이며, \vec{x}_{SR} 은 Test Range 중심의 좌표계에서 추적레이더가 위치한 좌표값을 나타낸다. 그러므로, 추적레이더와 발사통제시스템은 이러한 좌표 변환을 위하여 3차원 회전 행렬 T 와 Test Range 중심 좌표계에서 추적레이더가 위치한 좌표값 \vec{x}_{SR} 을 알아야 한다.

먼저 Test Range와 추적레이더의 측지 좌표계 (geodetic coordinate system)에서 위치 측정값을 각각 (ϕ_0, λ_0, H_0) 와 (ϕ_s, λ_s, H_s) 로 나타내고, 기준 타원체의 장축과 단축을 각각 $2a$ 와 $2b$ 라고 정의하면 일반적으로 $b = a(1 - f)$ 의 관계가 성립한다. 이러한 정의를 이용하여 Test Range 중심의 좌표계에서 추적레이더의 위치 좌표는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\vec{x}_{SR} = R_{0G}(\vec{x}_{SG} - \vec{x}_{0G}) \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 벡터 \vec{x}_{SG} 와 \vec{x}_{0G} 는 다음과 같은 원소를 가지는 벡터로 표현할 수 있다.

$$\vec{x}_{SG} = \begin{pmatrix} X_{SG} \\ Y_{SG} \\ Z_{SG} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N_s + H_s) \cos \phi_s \cos \lambda_s \\ (N_s + H_s) \cos \phi_s \sin \lambda_s \\ \left(\frac{b^2}{a^2} N_s + H_s\right) \sin \phi_s \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\vec{x}_{0G} = \begin{pmatrix} X_{0G} \\ Y_{0G} \\ Z_{0G} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N_0 + H_0) \cos \phi_0 \cos \lambda_0 \\ (N_0 + H_0) \cos \phi_0 \sin \lambda_0 \\ \left(\frac{b^2}{a^2} N_0 + H_0\right) \sin \phi_0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

위의 식 (4)와 (5)에서 N_s 와 N_0 는 다음과 같이 얻어진다.

$$N_s = \frac{a}{w_s}, \quad N_0 = \frac{a}{w_0} \quad (6)$$

$$w_s = 1 - e^2 \sin^2 \phi_s, \quad w_0 = 1 - e^2 \sin^2 \phi_0 \quad (7)$$

$$e^2 = 2f - f^2 \quad (8)$$

또한, 천문 좌표계에서 Test Range와 추적레이더의 좌표값, 즉 위도와 경도를 각각 (Φ_0, A_0) 와 (Φ_s, A_s) 로 표현할 수 있다.

$$\Phi_0 = \phi_0 + \xi_0, \quad \Phi_s = \phi_s + \xi_s \quad (9)$$

$$A_0 = \lambda_0 + \frac{\eta_0}{\cos \phi_0}, \quad A_s = \lambda_s + \frac{\eta_s}{\cos \phi_s} \quad (10)$$

(ξ_0, η_0) 와 (ξ_s, η_s) 는 각각 Test Range와 추적레이더의 위치에 대한 중력 편향값을 나타낸다. 위의 식 (9)와 (10)을 이용하여 식 (3)에서 언급한 3차원 회전 행렬 R_{0G} 은 결국 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{0G} = R_2\left(\Phi_0 - \frac{\pi}{2}\right) R_3(A_0 - \pi) \quad (11)$$

R_2 와 R_3 은 각각 y 축과 z 축에 대한 3차원 회전 행렬을 나타낸다.

$$R_2(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix},$$

$$R_3(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

위의 결과를 이용하여 Test Range 중심의 좌표계와 추적레이더 중심의 좌표계에 대한 좌표 변환에 필요한 3차원 회전 행렬 T 는 다음과 같이 구해진다.

$$T = P_2 R_2\left(\Phi_0 - \frac{\pi}{2}\right) R_3(-A_0) R_3(A_s) R_2\left(\frac{\pi}{2} - \Phi_s\right),$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

이와 같이 얻어진 \vec{x}_{SR} 과 3차원 회전 행렬 T 를 이용하여 식 (1)과 식 (2)의 Test Range와 추적레이더 간의 좌표 변환을 수행할 수 있다.

3. 결 론

나로우주센터 추적레이더가 획득한 실시간 위치 정보는 발사통제시스템에서 위치, 속도, 비행궤도 표시, 예상궤도 진입여부 및 안전을 위한 비행종료 시점 판단 등의 중요한 데이터로 사용된다. 추적레이더에서 발사통제시스템으로 전송하는 표적의 위치 정보는 추적레이더 중심의 좌표값 데이터이며, 발사통제시스템에서 추적레이더로 전송하는 Slaving 데이터는 발사대 중심의 좌표값 데이터

다. 이렇듯 추적레이더와 발사통제시스템 간의 송수신 데이터는 각 시스템에 맞게 적절하게 좌표 변환이 수행되어야 한다.

본 논문에서는 나로우주센터 추적레이더 간의 상호 데이터 송수신 및 발사통제시스템과의 데이터 통신에 사용되는 각각의 좌표계 및 좌표계 간의 좌표 변환에 대해 기술하였다. 추적레이더와 발사통제시스템 간의 좌표 변환에서 앞서 언급한 중력 편향은 실제로 좌표 변환에서 반영하고 있진 않지만, 이 중력 편향에 대한 측정값을 이용한다면 좀 더 정확한 좌표 변환을 수행할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 신한섭, 최지환, 김대오, 김태형, 이효근,
“나로우주센터 추적레이더의 성능 검증 시험”, 한국항공우주학회 추계학술대회, 2008,
pp. 1136-1139
2. 한국항공우주연구원, “우주센터 개발사업”,
2010.