

INS 비가용 상태에서의 레이더 지속 운용을 위한 각도센서 기반 Heading 정보 모델 도출 방법

Method for Deriving Heading Information Model from Angular Position Sensor (Encoder) Data for Continuous Radar Operation under INS Unavailability

이 옥 · 유 한 성 · 김 형 일*

Uk Lee · Hansung Yoo · Hyeongil Kim*

요 약

본 논문에서는 레이더 시스템에서 사용되는 INS가 비가용 상태가 되어도 heading 정보를 산출하는 방법을 제시하고, 시험을 통하여 성능을 검증한다. 레이더 안테나 선회부의 엔코더 센서 정보를 활용하여 heading 정보를 모사함으로써 빔 조향에 필요한 자세 정보를 생성하는 방법을 설계하였으며, 시험 결과를 통해 제안한 방법은 INS 비가용 상태에서도 레이더의 기본적인 탐지 및 추적이 가능하게 하여 시스템의 연속 운용성 향상에 기여함을 확인한다.

Abstract

This study proposes a method to generate heading information for radar systems, even when an inertial navigation system (INS) becomes unavailable, and verifies its performance through experimental tests. The proposed approach utilizes encoder sensor data from the radar antenna rotation unit to emulate the heading information, thereby generating the attitude information required for beam steering. The test results demonstrate that the proposed method enables basic target detection and tracking operations under INS-unavailable conditions, contributing to the improved operational continuity of radar systems.

Key words: Radar Systems, Inertial Navigation System, Target Detection and Tracking, Heading Information

I. 서 론

현대의 레이더 시스템에서 INS(inertial navigation system)는 표적 탐지 및 추적 성능을 좌우하는 핵심 구성품 중 하나이다. INS는 자이로스코프와 가속도계를 기반으로 레이더 안테나의 자세 정보(heading, roll, pitch)를 실

시간으로 제공하며, 레이더는 해당 정보를 토대로 좌표 변환을 통해 안테나에서 송신하는 빔의 조향을 제어한다. 따라서, INS가 제공하는 자세 정보의 정확도와 신뢰성이 레이더 전체 시스템 성능에 직접적인 연관을 가진다^[1].

그러나 INS가 고장, 전파 간섭, 환경적인 제약, 통신 오류 등 다양한 사유로 사용 불가능한 경우가 생길 경우, 레

「이 연구는 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UC190064CD).」
한화시스템(Hanwha Systems)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 7, 2026 ; Revised February 17, 2026 ; Accepted March 17, 2026. (ID No. 20260107-15S)

· Corresponding Author: Uk Lee (e-mail: lwk0201@hanwha.com)

이다 안테나는 정상적인 빔 조향이 불가능해져 표적 탐지 및 추적 성능이 급격히 저하되게 되며 이는 작전 지속성 및 레이더 시스템 가용성 측면에서 중대한 문제로 작용한다^[2].

본 논문에서는 INS 비가용 상태에서도 레이더의 기본적인 탐지 및 추적 기능을 유지하기 위한 대체 운용 개념을 제안하며 그 방법은 레이더의 안테나 선회부에 장착된 선회 구동을 위한 각도센서인 엔코더의 정보를 활용하여 안테나의 방위각 변화를 기반으로 INS가 출력하는 자세 정보를 예측하는 방식이다. 이를 통해 INS가 정상적으로 동작하지 않는 상황에서도 안테나의 빔 조향에 필요한 자세 정보를 생성하고, 표적 탐지 및 추적 운용을 가능하게 한다. 이를 통해 레이더 시스템의 지속적인 운용성을 향상하고, 핵심 구성품 단일 고장에 대한 시스템의 존도를 완화하는 방법을 제안하고자 한다.

II. 본 론

2-1 레이더 시스템 구조

본 논문에서 다루는 레이더 시스템의 구성은 그림 1과 같이 주요 센서(INS, 엔코더)의 위치 관계를 개략적으로 나타낸다. INS가 출력하는 heading 정보는 진북(true north)을 기준으로 정의되며 pitch, roll 축의 회전에 의한 관성 평면상에서의 변화를 포함한다. 반면에, 안테나 선회부에 장착된 엔코더는 안테나의 기계적 회전 상태를 계측하기

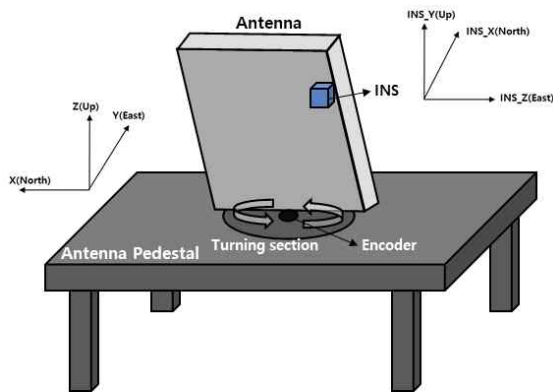


그림 1. 레이더 시스템 구성도
Fig. 1. Configuration of radar system.

위한 센서로서 선회부 하부에 있는 안테나 받침대 구조물을 기준으로 선회부를 포함한 안테나 받침대의 운송을 위한 차량 탑재 방향을 ‘X’축으로 설정되는 로컬좌표계의 ‘Z’축 회전 각도 정보를 제공한다^[3].

레이더 시스템의 안테나는 하중이 매우 무거운 구조물이며 그로 인하여 회전 구동 시 안테나 받침대의 구조적 뒤틀림으로 인하여 안테나 배열면 LOS(line of sight)는 roll(x)축과 pitch(y)축 방향 회전 성분이 발생한다^[4].

따라서 INS 비가용 상황에서도 레이더의 탐지 및 추적 기능을 유지하기 위해서는 엔코더로부터 획득한 상대적인 자세 정보를 관성 평면 기반의 자세 기준으로 연계할 수 있는 별도의 운용개념이 필요하다^[5].

2-2 각도센서 기반 INS Heading 정보 도출 방안

INS의 비가용 상태에서 heading 정보를 얻기 위해서는 우선 가용 상태의 INS와 엔코더 데이터 확보가 먼저 필요하다. 안테나 운용 구간에 대해서 특정한 속도로 회전시키면서 INS와 엔코더 데이터를 획득한다. 그리고 offset 값을 계산하고 기계적 구조와 외부 환경 (장착) 등으로 인한 비선형 오차가 발생하는데 이때 제안된 오차 보정 모델을 이용해서 두 값의 차이를 최소화한다. 엔코더 값에 따른 heading 추정값과 정상상태의 INS 데이터를 비교해서 성능 검증을 수행한 후 INS 비가용 상태일 때 각도센서 기반 INS heading, 데이터를 사용한다(그림 2).

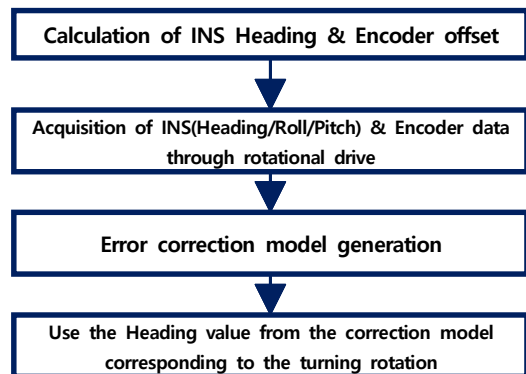


그림 2. 각도센서 기반 INS heading 추정 모델
Fig. 2. INS Heading estimation model using angular sensor(encoder).

2.3 오차 보정 모델 생성 방안

비선형 오차가 발생한 INS heading과 엔코더 데이터 간의 각도 차이가 발생하고 이 비선형 오차를 수식화하여 보정할 수 있다면 엔코더 각도를 사용하여 INS heading 값을 추정할 수 있다.

오차 보정을 위해서는 보정 모델 방정식을 식 (1)과 같이 정의한다.

$$INS_{heading_est} = \theta_{Bearing} + E_{total} + \theta_{offset} \quad (1)$$

여기서 $INS_{heading_est}$ 은 오차 보정된 INS heading 데이터를 나타내며 $\theta_{Bearing}$ 은 엔코더 측정값, θ_{offset} 은 선회부가 특정 기준 각도로 위치한 상태에서의 INS heading 정보와 엔코더 출력값과의 차이를 offset으로 정의하였다.

INS가 지시하는 heading은 항상 관성 평면상의 북쪽을 나타내지만, 선회부에 있는 엔코더는 레이더가 설치되는 방향에 따라 정해지기 때문에 현재 장착된 위치의 레이더의 방향과 실제 heading과의 차이로 인하여 offset이 발생하게 된다.

오차 보정 모델을 생성하기 위해서는 특정된 속도로 안테나 회전 운용 구간에서 $INS_{heading}$, INS_{roll} , INS_{pitch} 와 엔코더 데이터인 $\theta_{Bearing}$ 을 저장한다.

$INS_{heading}$ 과 $\theta_{Bearing}$ 의 offset을 보정한 후에 오차는 그림 3이 허용치를 초과하는 것을 확인할 수 있다.

E_{roll_pitch} 는 안테나의 회전으로 인하여 생기는 기계 구조적 비선형 오차를 나타내며, 해당 수식은 여러 차례의 레이더 운용 결과를 통해 누적된 데이터를 기반으로 도출

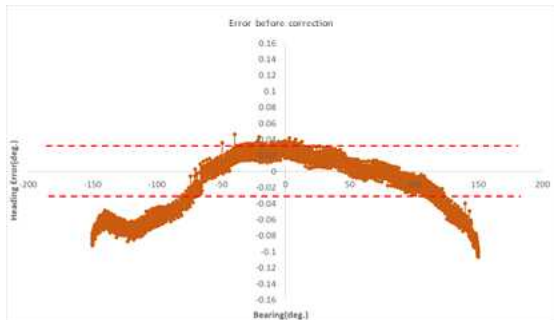


그림 3. INS heading과 엔코더 데이터의 오차
Fig. 3. INS heading vs. encoder data error.

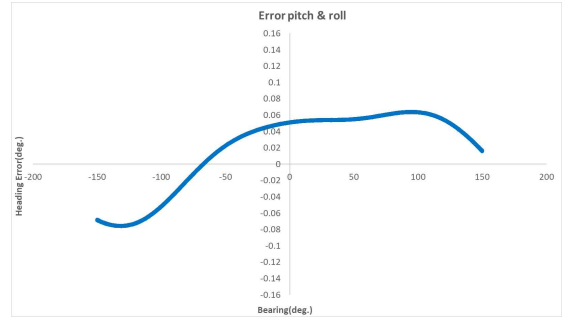


그림 4. 회전 시 기계구조에 의한 오차 보상
Fig. 4. Structural deformation correction in rotating mechanisms.

된 경험적 결과에 근거한다(그림 4).

$$E_{roll_pitch} = \sin(INS_{roll}) \times \sin(INS_{pitch}) \quad (2)$$

E_m 은 기계 구조적 성분을 제거하고 비선형 오차를 제거하기 위해 curve-fitting을 통하여 식 (3)과 같이 수식화한다^[6].

$$E_m = a_5 \times \theta^5 + a_4 \times \theta^4 + a_3 \times \theta^3 + a_2 \times \theta^2 + a_1 \times \theta^1 + a_0 \quad (3)$$

두 센서 간의 비선형 오차, E_{total} 는 식 (4)와 같이 나타내어진다.

$$E_{total} = E_{roll_pitch} + E_m \quad (4)$$

추정된 $INS_{heading_est}$ 와 $INS_{heading}$ 데이터의 오차를 보면 다음과 같다(그림 5).

그림 6은 오차 보정 모델을 통해서 나온 최종 오차를 나타낸다. 그림 3과 비교했을 때 안테나의 전 구간 선회 운용 범위에서 허용오차를 초과하지 않음을 확인할 수

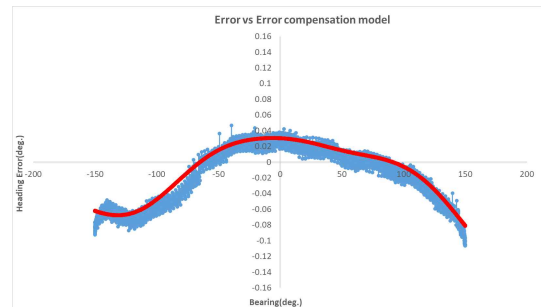


그림 5. 비선형 오차 모델
Fig. 5. Nonlinear error model.

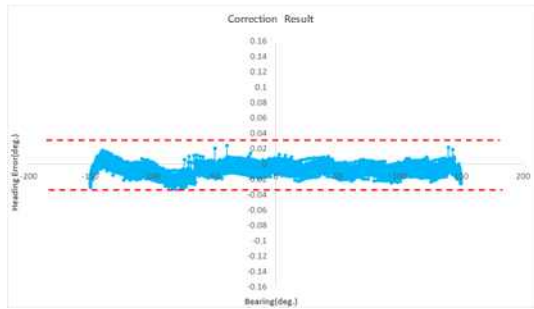


그림 6. 오차 보정 모델 적용 결과
Fig. 6. Application of error correction model.

있다. 허용오차 범위는 해당 레이더 시스템 운용 시 오탐지에 영향을 주지 않는 최소 요구조건을 기준으로 설정된 것으로, 보다 엄격한 기준 적용 시 제안된 보정의 성능에는 한계가 있을 수 있다.

2.4 제안된 오차 보정 모델 검증

각도센서 기반 INS heading 정보 모델의 검증은 다음과 같이 수행한다. 임의의 각도를 이동 후에 오차 보정 모델을 적용하여 추정된 $INS_{heading_est}$ 값과 실제 $INS_{heading}$ 값을 비교하여 제안된 각도센서 기반 INS heading 추정 모델의 성능을 평가하고자 한다. 그 결과는 표 1과 같이 확인할 수 있다.

표 1. 임의 각 성능 비교표($\theta_{offset}=221.252^\circ$)
Table 1. Performance verification at different angles ($\theta_{offset}=221.252^\circ$).

INS (degree)			Encoder (degree)	compensation	Error
Heading	Roll	Pitch			
-117.238	-0.134	29.986	-117.19	-0.06	0.012
-68.193	0.0458	30.065	-68.2	0.02	-0.013
0.045	0.111	29.996	0.0	0.034	0.011
30.841	0.115	29.96	30.8	0.026	0.015

III. 결 론

본 논문에서는 레이더 시스템에서 사용되는 INS가 비가용 상태가 되어도 heading 정보를 산출할 수 있는 각도센서 기반의 INS heading 추정을 위한 오차 보정 모델을 생성하는 방법을 제안하고 INS heading 데이터와 오차 보정 모델로부터 추정된 데이터 비교를 통하여 허용 오차 범위 내에 있는 것을 검증하였다. 제안한 방법은 INS 비가용 상태에서도 레이더의 기본적인 탐지 및 추적을 할 수 있게 하여 INS의 고장 등에 따른 문제가 발생하여도 레이더 시스템의 지속 운용성 향상에 본 연구가 기여가 있었음을 확인하였다.

References

- [1] M. S. Grewal, L. R. Weill, and A. P. Andrews, *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2007.
- [2] W. Gao, X. Zhan, and R. Yang, "INS-aiding information error modeling in GNSS/INS ultra-tight integration," *GPS Solutions*, vol. 28, pp. 35, Nov. 2023.
- [3] P. Xu, J. Han, C. Wang, Y. Wang, Y. Yan, and Wang L, et al., "Data-driven deformation reconstruction method for large aperture flexible vehicle-mounted antenna," *IEEE Sensor Journal*, vol. 23, no. 20, pp. 25323-25339, Sep. 2023.
- [4] Z. Zhu, "Structural design and mechanical analysis of large phased array radar antenna," in *Proceedings of the Eighth Asia International Symposium on Mechatronics*, Singapore, Springer Nature, 2022, pp. 222-228.
- [5] Z. H. Lewantowicz, "Architectures and GPS/INS integration: Impact on mission accomplishment," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 7, no. 6, pp. 16-20, Jun. 1992.
- [6] A. B. Sergienko, "Curve fitting for error rate data," in *2019 XVI International Symposium Problems of Redundancy in information and Control Systems(REDUNDANCY)*, Oct. 2019, pp. 181-185.

이 욱 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0009-1166-5597>



2017년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)

2020년 7월~현재: 한화시스템 선임연구원
[주 관심분야] RF, 레이더 시스템

김 형 일 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-5914-3753>



2009년 2월: 전북대학교 컴퓨터공학과 (공학사)

2011년 2월: 전북대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)

2016년 2월: 전북대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)

2016년 10월~현재: 국방과학연구소 선임
연구원

[주 관심분야] 레이더 시스템, 레이더 알고리즘

유 한 성 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0009-0002-9241-3592>



2023년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공
전자공학과 (공학사)

2023년 4월~현재: 한화시스템 연구원
[주 관심분야] 레이더, 시스템 엔지니어링
등