Journal of the KNST

2026; Vol.9, No.2; pp.450-453

ISSN: 2635-4926

https://doi.org/10.31818/JKNST.2026.6.9.2.450

Check for updates

Received: 2026/05/28
Revised: 2026/06/11
Accepted: 2026/06/20
Published: 2026/06/30

*Corresponding Author:
Yeong-Cheol Um
207, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea
Tel: +82-31-326-9436
E-mail: yeongcheol.um@ligdna.com

소형 AESA 레이다의 비행 중 추적성능 향상을 위한 빔 조향 안정화 설계

Design of Beam Steering Stabilization for Enhanced In-Flight Tracking Performance of Small AESA Radars

엄영철[1*], 이석인[2], 이수성[3], 장채운[1], 유성현[2], 안세환[2], 주지한[4]

[1]LIG DnA 미사일시스템탐색기연구소 선임연구원
[2]LIG DnA 미사일시스템탐색기연구소 수석연구원
[3]LIG DnA 미사일시스템탐색기연구소 연구원
[4]LIG DnA 미사일시스템탐색기연구소 연구위원

Yeong-Cheol Um[1*], Sukin Lee[2], Su-Seong Lee[3], Chae-Un Jang[1], Seong-Hyun Ryu[2], Se-Hwan An[2], Ji-Han Joo[4]

[1]Senior research engineer, RF Seeker R&D Lab, LIG DnA
[2]Chief research engineer, RF Seeker R&D Lab, LIG DnA
[3]Research engineer, RF Seeker R&D Lab, LIG DnA
[4]Research fellow, RF Seeker R&D Lab, LIG DnA

Abstract

본 논문에서는 비행 중인 플랫폼에 탑재된 소형 AESA 레이다의 추적 성능 향상을 위한 빔 조향 안정화 알고리즘을 제안하였다. 동체 기동으로 인한 외란을 보상하기 위해, 자이로스코프로 계측된 3축 자이로 각속도를 안테나 좌표계에서 사용하는 방위각, 고각으로 변환하여 조향각에 반영하였다. 제안된 알고리즘은 MATALAB Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

In this paper, we propose a beam steering stabilization algorithm designed to improve the tracking performance of a small AESA radar on a flight platform. To compensate for disturbances of body motion, the 3-axis angular rates measured by a gyroscope are transformed into azimuth and elevation steering angles used in the antenna coordinate system and then integrated into the steering commands. The proposed algorithm was verified through simulation by using MATALAB Simulink.

Keywords

AESA 레이다(AESA Radar),
빔 조향 안정화(Beam Steering Stabilization),
추적 루프(Track Loop), 자이로스코프(Gyroscope),
빔 조향 제어(Beam Steering Control)

1. 서론

최근 능동 위상 배열(active electronically scanned array, AESA) 레이다 기술의 고도화에 따라, 이를 고기동 항공기 및 유도무기 체계에 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1]. 비행중인 플랫폼에 탑재된 AESA 레이다가 표적을 안정적으로 추적하기 위해서는 동체 기동에 의해 발생하는 외란을 실시간으로 보상하는 빔 조향 안정화 제어 기술 등이 필요하다.

관련된 [2] 논문에서는 탐색기용 AESA 레이다의 빔 안정화를 위한 DSP 인터페이스 구성 등을 제안하였으나, pitch와 yaw 축의 각속도만을 보상하여 x축 방향의 기동에는 취약하다는 단점이 있다. 관련된 [3] 논문에서는 탐색기용 AESA의 전체적인 구조 및 추적루프에 대해 기술하였으나, 자이로스코프로 측정된 동체 외란 정보의 처리 방법은 기술되지 않았다는 단점이 있다.

본 논문에서는 소형 AESA 레이다의 비행 중 추적 성능 향상을 위한 빔 조향 안정화 알고리즘을 제안한다. 전체적인 소형 AESA 레이다의 구성 및 추적루프에 대해 기술하였으며, 동체 3축 외란

© 2026 Korea Society for Naval Science & Technology

보상을 위해 자이로스코프에서 측정된 동체 외란 정보를 안테나 좌표계 기준의 방위각(Az) 및 고각(El) 변화율로 변환하여 조향각에 반영하였다. 제안된 알고리즘의 성능은 MATLAB Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 소형 AESA 레이다 구성

비행 중인 플랫폼에 탑재되어 있는 소형 AESA 레이다의 경우, 추적 성능 향상을 위해 기동 시 발생하는 동체 외란을 상쇄하기 위한 빔 조향 안정화가 필요하다. 따라서 소형 AESA 레이다는 Fig. 1과 같이 동체 각속도가 측정 가능한 자이로스코프를 포함하여 AESA, 주파수합성기, 수신기 및 빔조향기로 구성되어 있다.

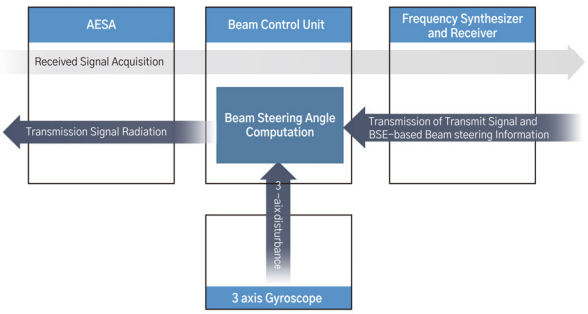

Fig. 1. Configuration of small AESA radar

표적 포착 후 시선각 오차(boresight error, BSE) 기반의 빔 조향 정보는 BSE가 처리되는 CPI(coherent processing interval) 주기로 빔조향기에 업데이트된다. 이때, 송신 후 에너지의 안정적인 수신을 위해서는 비행 중 발생하는 동체 외란을 CPI보다 빠른 주기로 보상하여야 한다. 따라서, 빔 조향기는 자이로스코프의 샘플링 주기에 따라 빔 조향 정보를 업데이트해야 하며, 타이밍에 대한 예시는 Fig. 2와 같다.

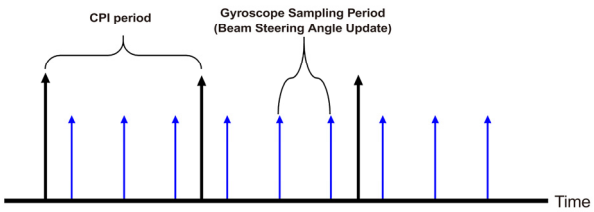

Fig. 2. Beam steering timing (example)

3. 추적루프 설계

3.1 추적루프 설계

빔 공간 안정화 기능이 포함된 소형 AESA 레이다의 추적 루프는 Fig. 3와 같다.

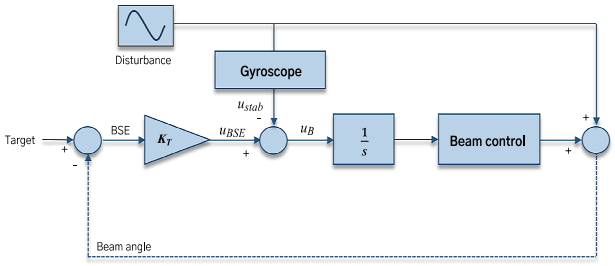

Fig. 3. Configuration of tracking loop

목표물과 현재 조향 각 사이의 차이인 BSE에 추적 이득 K_T를 곱하여 추적 입력 u_{BSE}를 계산한다. 빔 조향 안정화에 대한 입력 u_{Stab}는 동체 기동에 의한 영향을 상쇄하기 위한 입력으로써, 자이로스코프로 계측된 동체 외란을 feed forward 형태로 더하여 최종 조향각 u_{B}를 계산한다. 따라서 빔조향기에 입력되는 최종 식은 식 (1)과 같다.

$$u_{\mathrm{B}} = u_{\mathrm{BSE}} + u_{\mathrm{Stab}} \tag{1}$$

3.2 3축 각속도 기반 빔 조향 각 연산

빔 조향 안정화는 동체에서 발생하는 3축 각속도 외란을 안테나 좌표계에서 사용하는 Az-EL 좌표계의 각도로 변환하여 조향하여야 한다. 이를 위해 자이로스코프로 계측 된 3축 동체 각속도를, 안테나 좌표계 기준 Az, El 각속도로 변환한 후 최종 조향 각을 계산하여야 한다.

현재 안테나 좌표계 기준 Az, El 조향 각을 동체 좌표계 기준으로 정의하면 식 (2)와 같다.

$$l = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta)\cos(\phi) \\ \cos(\theta)\sin(\phi) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 x, y, z는 각 축의 x, y, z축의 각도, ϕ, θ는 Az 각도, El 각도이다.

식 (2)를 미분하여 동체 좌표계 기준의 3축 각도 변화량을 계산하면 식 (3)과 같다.

$$\dot{l}=\begin{bmatrix}-\sin(\theta)\cos(\phi)\dot{\theta}-\cos(\theta)\sin(\phi)\dot{\phi}\\-\sin(\theta)\sin(\phi)\dot{\theta}+\cos(\theta)\sin(\phi)\dot{\phi}\\\cos(\theta)\dot{\theta}\end{bmatrix} \quad (3)$$

동체 좌표계의 벡터와 자이로스코프로 계측된 3축 각속도를 외적하여 벡터의 변화량으로 계산하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}\dot{l}&=w_{gyro}\times l\\&=\begin{bmatrix}p\\q\\r\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\cos(\theta)\cos(\phi)\\\cos(\theta)\sin(\phi)\\\sin(\theta)\end{bmatrix}\\&=\begin{bmatrix}q\sin(\theta)-\mathrm{r}\cos(\theta)\cos(\phi)\\r\cos(\theta)\cos(\phi)-\mathrm{p}\sin(\theta)\\p\cos(\theta)\sin(\phi)-\mathrm{q}\cos(\theta)\cos(\phi)\end{bmatrix}\end{aligned} \quad (4)$$

식 (3), 식 (4)의 2행, 3행을 이용하여 다음과 같은 Az, El 조향각에 대한 변화율로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\phi}=r+\tan(\theta)\{q\sin(\phi)-p\cos(\phi)\}$$

$$\dot{\theta}=p\sin(\phi)-q\cos(\phi) \quad (5)$$

따라서, 식 (5)의 각 축에 대한 조향각 변화량을 빔 조향 안정화에 대한 입력(u_{Stab})으로 사용하여야 한다.

4. 시뮬레이션

빔 조향 안정화 조향 기능이 포함된 추적루프의 성능 검증을 위해 MATLAB Simulink를 이용한 시뮬레이션을 진행하였으며, 상세 블록도는 Fig. 4와 같다.

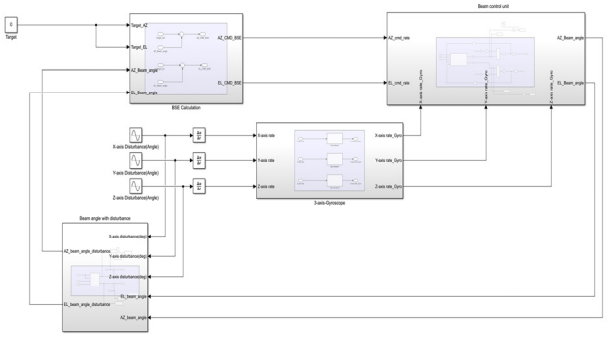

Fig. 4. Configuration of MATLAB Simulink

시뮬레이션을 위한 추적 루프의 이득은 10으로 선정하였다. 또한 각도 기준 외란을 회전행렬을 통해 방위각 및 고각으로 변환 후 조향각에 반영하였으며, 이를 미분하여 자이로스코프를 통해 출력되는 값으로 사용하였다. 각 축에 적용된 외란에 대한 상세 파라미터는 Table 1과 같다.

Table 1. Disturbances of simulation

Axis	Amplitude(deg)	Frequency(Hz)
x	5	0.5
y	15	1
z	15	1

빔 조향 안정화 기능의 유무에 대한 방위각, 고각에 대한 시뮬레이션 결과는 각각 Fig. 5, Fig. 6와 같다.

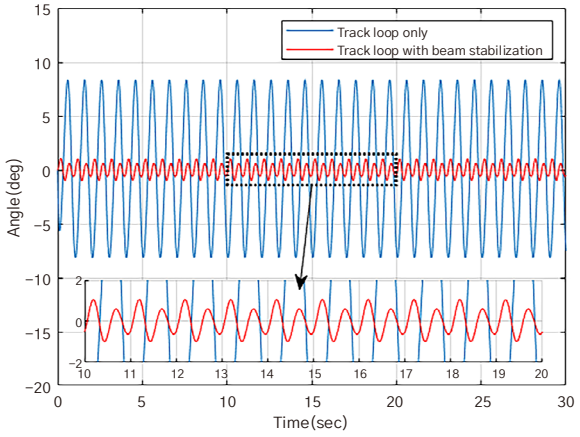

Fig. 5. BSE simulation with and without beam steering stabilization(Az)

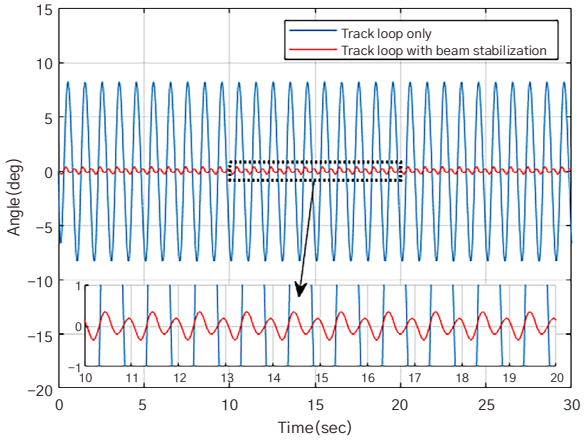

Fig. 6. BSE simulation with and without beam steering stabilization(El)

또한, 입력되는 외란과 이를 상쇄하기 위한 빔 조향 안정화 입력은 Fig. 7, Fig. 8과 같다.

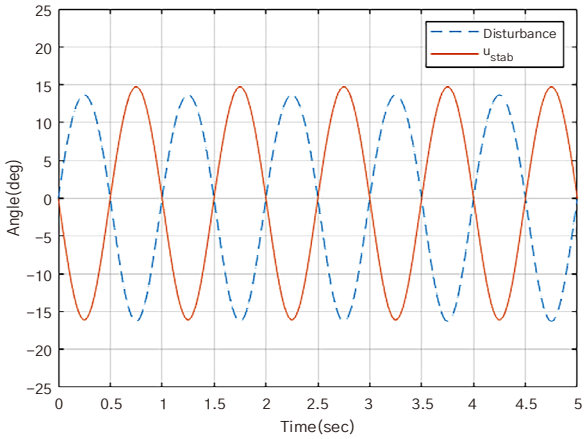

Fig. 7. Comparison of disturbance and stabilized beam steering angles (Az)

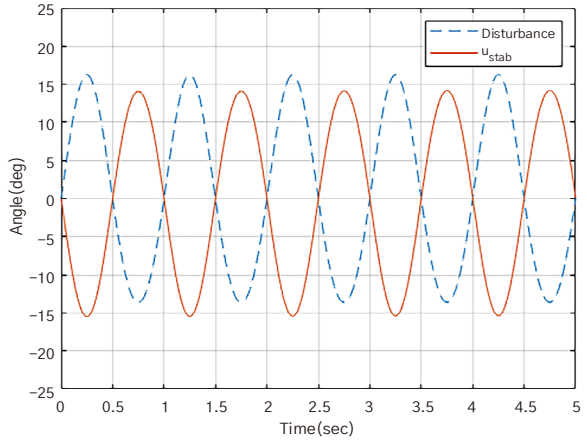

Fig. 8. Comparison of disturbance and stabilized beam steering angles (El)

보다 수치적인 비교를 위해 빔 조향 안정화 유무에 따른 mean square error (MSE)를 비교하며, MSE의 계산식은 다음과 같다.

$$MSE = \frac{1}{n}\left\{\sum_{t=0}^{30}(Ref - x)^2\right\} \quad (6)$$

여기서 Ref는 추종하려는 목표의 위치인 0을 대입하였으며, x는 각 축의 오차, n은 데이터의 개수를 대입하였다.

Table 2를 통해 빔 조향 안정화에 따라 MSE를 방위각 98.9%, 고각 99.9%을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

Table 2. Numerical analysis

Axis	Beam Steering Stabilization	MSE
Az	X	33.4290
	O	0.3561
El	X	33.4469
	O	0.0388

5. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 소형 AESA 레이다의 비행 중 추적 성능 향상을 위한 빔 조향 안정화 알고리즘을 제안하였다. 동체기동으로 인한 영향성을 줄이기 위해, 자이로스코프로 계측 된 3축 각속도 정보를 안테나 Az, El 좌표계로 변환하여 보상하였다. 제안된 알고리즘은 MATLAB Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통해 비행 중 동체 기동으로 인한 외란에 대해 개선된 빔 조향이 가능함을 검증하였다.

추후 본 연구를 바탕으로 빔 조향 주기에 따른 시응답 특성 분석 및 추가적인 빔 조향 알고리즘 개선 등을 수행할 예정이며, 실험을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 검증할 예정이다.

참고문헌

[1] Young-Wan Kim, Jong-Gyun Back, Heeduck Chae, & Jihan Joo, 'A Study on AESA Antenna Performance Advancement for Seeker,' The Journal of Intelligent Information, VOL. 23, NO. 5, 2023, pp. 103-108.
[2] Ankita Muhury, Smita Sadhu and Tapan Kumar Ghoshal, 'Digitization Noise Elimination from the Guidance Signal of an AESA Missile Seeker,' in proceedings of 2023 3rd International Conference on Range Technology, Balasore, India, February 2023.
[3] Vikas Patel & H. Madhukar, 'Beam Steering and Beam Stabilization of Active Electronically Scanned Array (AESA) Seeker for Missile Guidance,' in proceedings of 2021 International Conference on Control, Automation, Power and Signal Processing, Jabalpur, India, December 2021.