

시스템 통합 시험 환경을 이용한 항공기 탑재 레이더의 탐색 패턴 안정화 기능 검증

Verification of Airborne Radar's Search Pattern Stabilization Capability Using SIL Environment

노지은·곽용길·원진주·이원진
국방과학연구소

Ji-Eun Roh · Yong-Kil Kwak · Jin-Ju Won · Won-Jin Lee

Agency for Defense Development, Daejeon 34060, Korea

[요 약]

항공기 탑재 레이더는 전술 목적에 따라 다양한 운용 모드를 가지며, 각 모드별 운용 목적에 맞게 탐색 영역을 설정할 수 있도록 설계된다. 일반적인 AESA 레이더는 조종사가 탐색 영역을 지정하면 지정된 영역내 표적을 탐지하기 위해 사전 정의된 탐색빔 그리드에 따라 차례로 탐색빔을 방사하여 표적을 탐지하게 된다. 이때 자항공기의 자세가 변하더라도 사전에 조종사가 탐지하고자 하는 영역을 안정적으로 탐색할 수 있어야 한다. 본 논문은 항공기 탑재 레이더의 공대공 운용 모드에서 탐색 패턴 안정화를 통해 자항공기의 Roll과 Pitch 기동시에도 표적을 안정적으로 탐지할 수 있는 방안에 관한 것으로, 시스템 통합 시험 (SIL; system integration laboratory) 환경에서 자항공기의 기동과 표적을 모의하여 그 성능을 입증하였다.

[Abstract]

The radar installed on an aircraft has various operating modes depending on tactical purposes, allowing for the configuration of search areas according to each mode's operational objectives. active electronically scanned array (AESA) radar emits search beams sequentially according to a predefined search beam grid within the designated search area specified by the pilot to detect targets within it. It is crucial that the radar can stably search the area designated by the pilot for target detection, even as the aircraft's attitude changes. This paper focuses on stabilizing the search pattern in the air-to-air operational mode of aircraft-mounted radar to ensure stable target detection during roll and pitch maneuvers of the aircraft. The paper demonstrates its performance by simulating aircraft maneuvers and targets in a system integration laboratory (SIL) test environment.

Key word : AESA (active electronically scanned array), Aircraft's attitude, Search pattern stabilization, SIL.

<https://doi.org/10.12673/jant.2024.28.2.178>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 28 March 2024; Revised 24 April 2024

Accepted (Publication) 27 April 2024 (30 April 2024)

*Corresponding Author; Ji-Eun Roh

Tel: *** - **** - ****

E-mail: jeroth@add.re.kr

1. 서론

항공기 탑재 레이더는 다양한 운용 모드에 따라 사전 정의된 공간을 탐색할 수 있는 탐색빔을 운용하여 표적을 탐지하게 된다. 이때 항공기의 자세가 변하더라도 사전에 조종사가 탐지하고자 하는 영역을 안정적으로 탐색할 수 있어야 한다. 본 논문은 항공기 탑재 레이더의 공대공 운용 모드에서 탐색 패턴 안정화를 통해 자항공기의 roll과 pitch 기동시에도 표적을 안정적으로 탐지할 수 있는 방안에 관한 것으로, 시스템 통합 시험(SIL; system integration laboratory) 시험환경에서 자항공기의 기동과 표적을 모의하여 그 성능을 입증하였다.

II. 탐색 패턴 안정화 방안 및 검증

2-1 항공기 탑재 레이더 공대공 모드 탐색빔 운용

항공기 탑재 레이더의 공대공 모드에서는 전술적 목적에 따라 다양한 하위 모드를 가지며, 각 모드 별 운용 목적에 맞게 탐색 영역을 설정할 수 있도록 설계된다[1]-[4]. 탐색 영역은 통상 방위각 및 고각 탐색 중심을 기준으로 사전 정의된 방위각 탐색 범위 옵션(예를 들어 $\pm 10^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$)과 고각 탐색 범위 옵션(예를 들어 1 bar, 2 bar, 4 bar)을 조종사가 실시간 선택하여 결정된다. 여기서 bar란 동일한 고각 정보를 갖고 방위각만 조금씩 변경된 탐색빔의 그룹을 의미하는 것으로 그림 1은 $\pm 60^\circ$, 고각 4 bar(서로 다른 4개의 고각 값들에 대해, 방위각으로 배열된 빔의 그룹들)로 탐색 영역이 설정된 경우 탐색빔 그리드를 보여준다.

조종사가 탐색 영역을 지정하면 일반적인 AESA 레이더는 지정된 영역내 표적을 탐지하기 위해 사전 정의된 탐색빔 그

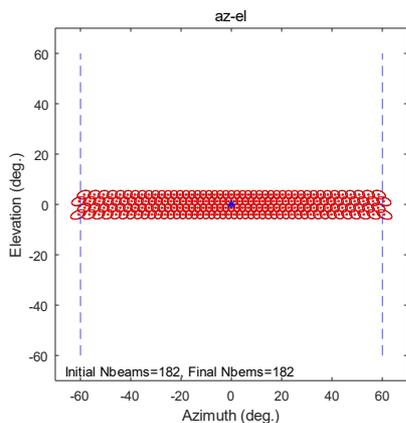


그림 1. 방위각 $\pm 60^\circ$, 고각 4 bar로 탐색 영역이 설정된 경우의 탐색빔 그리드 예시

Fig. 1. Search beam grid for azimuth $\pm 60^\circ$, elevation 4 bar search.

리드에 따라 차례로 탐색빔을 방사하고 탐지된 표적에 대해 별도의 추적을 수행하며 동시에 남은 시간에 탐색을 지속하게 된다.

탐색빔의 빔 그리드는 탐색 영역에 따라 레이더의 빔폭과 빔간 겹침 정도를 결정하여 형성하며 탐색영역 전체를 덮을 수 있도록 설계된다[1]-[4]. 그림 1은 탐색 중심 방위각 0° , 고각 0° 를 기준으로 방위각 $\pm 60^\circ$, 고각 4 bar로 탐색 영역이 설정된 경우의 탐색빔 그리드를 형성한 예시이다.

2-2 탐색 패턴 안정화 방안

항공기 탑재 레이더의 탐색 빔 운용 관련 기존 연구들은 항공기 비행중 발생하는 바람과 진동의 영향성을 평가하기 위한 시뮬레이터를 구축하거나[5], 항공기 자세 기동을 고려한 동역학 모델을 적용하여 레이더 운용 환경을 모사하거나 [6], 위협 예상 영역의 중요도에 따라 탐색 운용 기법을 제안하였다 [7]. 반면에, 본 논문에서 제안하는 자항공기의 roll, pitch 기동시 공대공 모드의 탐색 패턴 안정화를 수행하는 방안에 대해 구체적으로 언급한 사례는 없다. 그림 2는 roll 기동에 대한 탐색 영역 안정화를, 그림 3은 pitch 기동에 대한 탐색 영역 안정화의 개념을 보여 준다.

항공기 탑재 레이더의 탐색 패턴 안정화는 통상 수평선 안정화 (horizontal stabilized) 좌표계 기준으로 수행된다. 수평선 안정화 좌표계는 지구를 타원체로 가정하고, 좌표계의 원점은 항공기 EGI (embedded GPS/INS) 중심으로 정의한다.

그림 4는 탐색 빔 그리드를 생성하는 단계를 개략적으로 보여 준다. 레이더 빔 방사는 안테나 좌표계에서 수행되므로, 탐색 패턴 안정화를 위해 빔 방사 위치를 수평선 안정화 좌표계

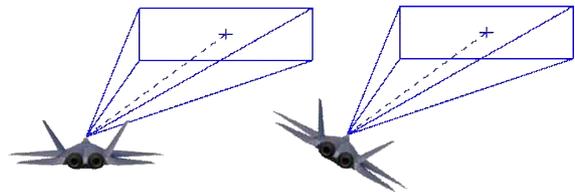


그림 2. Roll 기동에 대한 탐색 영역 안정화 개념도
Fig. 2. Search pattern stabilization for roll maneuver.

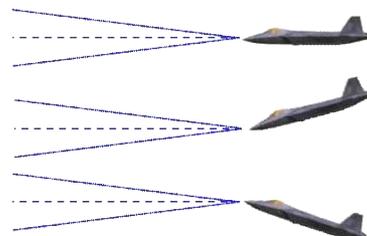


그림 3. Pitch 기동에 대한 탐색 영역 안정화 개념도
Fig. 3. Search pattern stabilization for pitch maneuver.

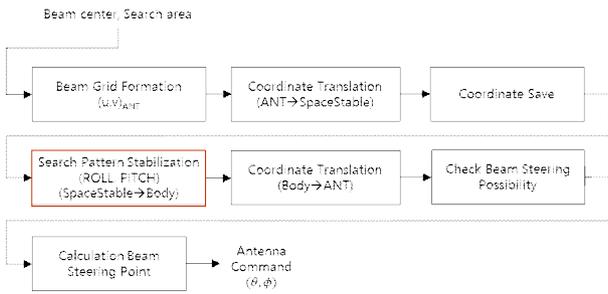


그림 4. 탐색 빔 그리드 형성시 탐색 패턴 안정화 포함 좌표 변환 과정
Fig. 4. Transformation of coordinate system for search beam grid with search pattern stabilization.

에서 안테나 좌표계 기준으로 변환하여 빔 방사 각도를 계산해야 한다. 이를 위해 수평선 안정화 기준 위치를 항공기의 roll, pitch 자세 정보를 보정한 동체 좌표계 기준으로 변환하고, 변환된 동체 좌표계 기준 위치를 안테나와 EGI의 위치 차를 보정한 안테나 좌표계 기준으로 변환한다.

마지막으로, 변환된 안테나 좌표계 기준 위치를 안테나 기울임각과 장축각 오차를 보정한 방위각 및 고각으로 변환함으로써, 최종적으로 탐색빔 안정화를 위한 안테나 기준 빔 조향 각도를 계산한다.

2-3 기능 검증을 위한 시스템 통합 시험환경

본 논문에서는 탐색 패턴 안정화를 통해 자항공기의 기동 중에도 표적을 정상적으로 탐지할 수 있음을 시스템 통합 시험 환경[8]에서 검증한 결과에 관한 것으로, 구축된 시스템 통합 시험 환경은 다음과 같다.

시스템 통합 시험은 비행시험 전 개발된 시제품의 기능/성능에 대하여 개발목표가 충족되었는지를 확인하기 위한 지상 시험 과정 중의 하나이다. 시스템 통합 시험환경은 크게 레이더 및 레이더 제어 및 시현을 담당하는 다기능 시현기 (MFD; multi-function display), 레이더에 모의표적 신호를 입력하기 위



그림 5. 시스템 통합 시험 환경 구성
Fig. 5. SIL configuration.

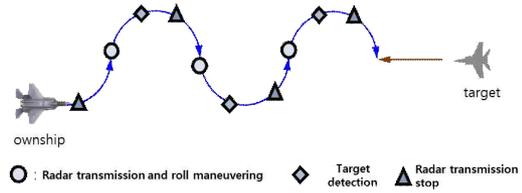


그림 6. Roll 기동시 표적 탐지 성능을 확인하기 위한 시험 시나리오 (top view)

Fig. 6. Test Scenario for target detection during roll maneuvering (top view).

한 모의표적발생장치 등으로 구성된다. 레이더는 제어와 시현을 위해 임무 컴퓨터를 통하여 다기능 시현기와 연동하며, 다기능 시현기를 통해 레이더 운용모드 및 세부 기능을 선택할 수 있다. 그림 5는 임무 컴퓨터와 레이더의 체계통합 시험을 수행하기 위한 시스템 통합 시험의 구성 환경을 개략적으로 보여준다.

2-4 시스템 통합 시험환경에서 탐색 패턴 안정화 시험 결과

시스템 통합 시험 환경에서 공대공 모드의 패턴 안정화를 통한 표적 탐지 여부를 확인하기 위해 roll ±60° 기동 조건과 pitch ±10°의 기동 조건 각각에 대해 모의 표적을 입력하여 기동 중에도 표적을 정상적으로 탐지하는지에 대한 시험을 수행하였다.

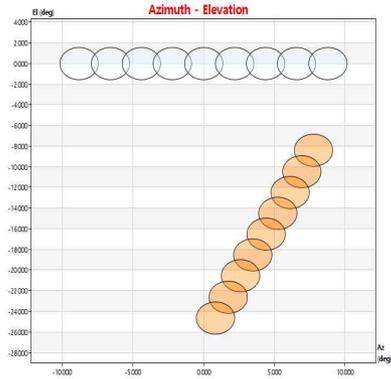
그림 6은 자항공기가 roll 기동 중 표적 탐지 성능을 확인하기 위한 시나리오로 매 기동마다 표적 탐지 여부를 확인하기 위해 중간에 레이더를 방사 중지하여 탐지된 표적을 강제로 소실하고 재탐지하는 과정을 반복하게 된다.

그림 7(a)는 고각 0°, 방위각 0° 중심에, 방위각 범위 ±10°, 고각 탐색 범위 1 bar 조건에서 roll +60° 기동시 패턴 안정화가 이루어진 빔 방사 위치를 보여준다. 그림 7(a)에서 상단의 수평으로 형성된 빔 그리드는 수평선 안정화 좌표계 기준 방사된 빔의 위치를, 하단의 사선으로 형성된 빔 그리드는 안테나 좌표계 기준 방사된 빔의 위치를 나타낸다. 기동이 이루어진 상황에서 해당 기동을 보상하기 위해 그림 4의 탐색패턴 안정화 단계에서 좌표계 변환시 변환 행렬에 roll값 +60도의 기동 성분을 역보정해서 최종 안테나 좌표계 기준 빔 방사 위치를 조정한다. 그 결과 수평선 안정화 좌표계 기준 고각 0°, 방위각 0° 중심에 방위각 범위 ±10°, 고각 탐색 범위 1 bar로 실질적인 탐색이 이루어져 roll 기동 중에도 해당 영역내에 있는 표적이 그림 7(b)에서 확인되듯 잘 탐지되어 다기능 시현기를 통해 시현되고 있음을 알 수 있다.

그림 8(a)는 고각 0°, 방위각 0° 중심에, 방위각 범위 ±10°, 고각 탐색 범위 1 bar 조건에서 roll -60° 기동시 패턴 안정화가 이루어진 빔 방사 위치를, 그림 8(b)는 이때의 다기능 시현기 결과로, 입력된 모의 표적이 정상적으로 탐지되었음을 확인할

수 있다.

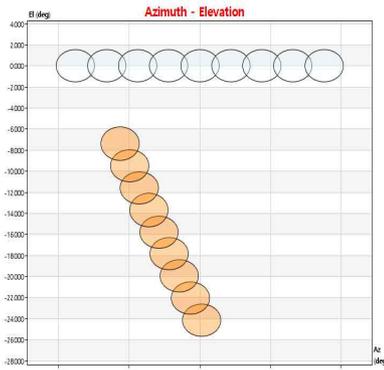
그림 8(a)에서는 그림 7(a)와 마찬가지로 상단의 수평으로 형성된 빔 그리드는 수평선 안정화 좌표계 기준 방사된 빔의 위치를, 하단의 사선으로 형성된 빔 그리드는 안테나 좌표계 기준 방사된 빔의 위치를 나타낸다. 기동이 이루어진 상황에서 해당 기동을 보상할 수 있도록 탐색패턴 안정화 단계에서 수평선 안정화 좌표계를 안테나 좌표계로 변환할 때 변환 행렬에 roll값 -60도의 기동 성분을 보상하기 위해 각 빔의 roll값을 반대로 보정하여 body 좌표계로 변환하고, 최종 안테나 좌표계 기준 빔 방사 위치를 조정한다. 그 결과 수평선 안정화 좌표계 기준 고각 0°, 방위각 0° 중심에 방위각 범위 ±10°, 고각 탐색 범위 1 bar로 실질적인 탐색이 잘 수행되어 해당 영역내 있는 표적이 잘 탐지되었음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(a)



(b) Roll 기동(+60°)시 다기능 시험기 탐지 결과

그림 7. (a) Roll 기동(+60°)시 탐색패턴 안정화된 빔 그리드, (b) Roll 기동(+60°)시 다기능 시험기 탐지 결과

Fig. 7. (a) Space stabilized search beam grid and (b) MFD display during roll maneuvering(+60°).

그림 8. (a) Roll 기동(-60°)시 탐색패턴 안정화된 빔 그리드, (b) Roll 기동(-60°)시 다기능 시험기 탐지 결과

Fig. 8. (a) Space stabilized search beam grid and (b) MFD display during roll maneuvering(-60°).

그림 9는 자항공기가 pitch 기동 중 표적 탐지 성능을 확인하기 위한 시나리오로 매 기동마다 표적 탐지 여부를 확인하기 위해 중간에 레이더를 방사 중지하여 탐지된 표적을 강제로 소실하고 재탐지하는 과정을 반복하게 된다.

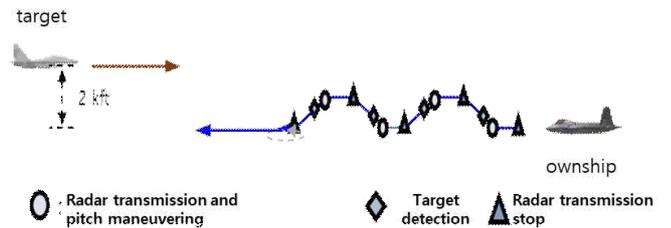
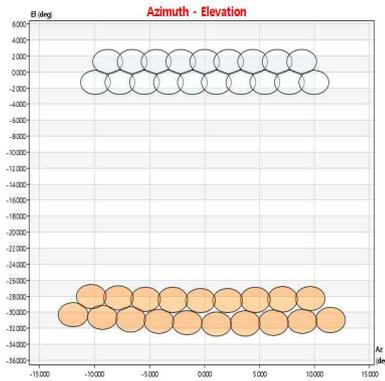


그림 9. Pitch 기동시 표적 탐지 성능을 확인하기 위한 시험 시나리오 (side view)

Fig. 9. Test scenario for target detection during pitch maneuvering (side view).



(a)



(b)

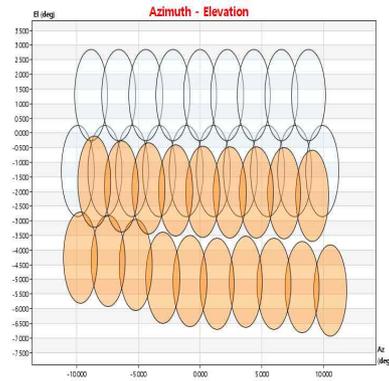
그림 10. (a) Pitch 기동(+10°)시 탐색패턴 안정화된 빔 그리드, (b) Pitch 기동(+10°)시 다기능 시험기 탐지 결과

Fig. 10. (a) Space stabilized search beam grid and (b) MFD display during pitch maneuvering(+10°).

그림 10(a)는 고각 0°, 방위각 0° 중심에, 방위각 범위 ±10°, 고각 탐색 범위 2 bar 조건에서 pitch +10° 기동시 패턴 안정화가 이루어진 빔 방사 위치를 보여주는 것이다. 그림 10(a)에서 상단의 수평으로 형성된 2 bar의 빔 그리드는 수평선 안정화 좌표계 기준 방사된 빔의 위치를, 하단의 2 bar로 형성된 빔 그리드는 안테나 좌표계 기준 방사된 빔의 위치를 나타낸다.

개발된 레이더의 안테나가 기축선 기준으로 15° 기울어져 있으므로 pitch +10° 기동 시 pitch 각에 따른 패턴 안정화가 잘 적용되어 안테나 좌표계의 고각 중심이 -25° 부근에서 빔이 형성된 것을 확인할 수 있다. 그 결과 고각 0°, 방위각 0° 중심 방위각 범위 ±10°, 고각 탐색 범위 2 bar 해당 영역내에 존재하는 표적을 잘 탐지하여 그림 10(b)에서 확인하듯, 다기능 시험기에 해당 모의 표적이 정상적으로 시현됨을 알 수 있다.

그림 11(a)는 고각 0°, 방위각 0° 중심에, 방위각 범위 ±10°, 고각 탐색 범위 2 bar 조건에서 pitch -10° 기동시 패턴 안정화가 이루어진 빔 방사 위치를 보여주는 것이다. 그림 11(a)에서 상단의 수평으로 형성된 2 bar의 빔 그리드는 수평선 안정화



(a)



(b)

그림 11. (a) Pitch 기동(-10°)시 탐색패턴 안정화된 빔 그리드, (b) Pitch 기동(-10°)시 다기능 시험기 탐지 결과

Fig. 11. (a) Space stabilized search beam grid and (b) MFD display during pitch maneuvering(-10°).

좌표계 기준 방사된 빔의 위치를, 일부 겹쳐진 하단의 2 bar로 형성된 빔 그리드는 안테나 좌표계 기준 방사된 빔의 위치를 나타낸다.

안테나 15° 기울임각이 반영되어 있으므로 pitch -10° 기동 시 안테나 좌표계의 고각 중심이 -5° 부근에서 빔이 형성된 것을 확인할 수 있다. 그림 11(b)는 이때의 다기능 시험기 결과로 pitch 기동중에도 고각 0°, 방위각 0° 중심방위각 범위 ±10°, 고각 탐색 범위 2bar 해당 영역내에 존재하는 표적을 잘 탐지하여 정상적으로 시현됨을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 자항공기의 자세 변화 중에도 조종사가 설정한 탐색 영역내 표적을 정상적으로 탐지할 수 있는 탐색 패턴 안정화 방안을 제안하였다. 이를 지상에서 검증하기 위하여 자항공기의 roll과 pitch를 기동하는 시험 시나리오를 제시하고 시스템 통합 시험 환경에서 레이더에 모의 표적 신호를 주입하여 시험하였다. 자항공기가 roll ±60° 이상, pitch ±10°도

이상 기동하는 각각의 상황에 대해, 해당 기동을 보상할 수 있도록 안테나 좌표계 기준 빔 방사 위치가 조정되어 빔이 방사 되는 것을 확인하였으며, 그 결과 수평선 안정화 좌표계 기준 기설정된 탐색 영역에 정확히 탐색빔이 조향되는 동시에, 다 기능 시험기상에 해당 탐색 영역내 표적이 정상적으로 탐지됨을 최종 확인하였다.

Acknowledgments

이 논문은 정부의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.274190001)".

References

- [1] S. H. Ryu et al. "Beam operation and waveform design of active electronically scanned array radar for efficient detection of long range threat targets," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 31, No. 1, pp. 51-61, 2020.
- [2] C. S. Ahn, J. E. Roh, and S. J. Kim, "A study on beam operation of an airborne AESA radar with uniform search performance in whole scan area," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 23, No. 6, pp.740-747, 2012.
- [3] J. H. Yoon, Y. H. Park et al. "Multiple step interlaced beam scan to minimized the deviation of radar detection performance," *The Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 20, No. 2, pp. 125-130, 2020.
- [4] S. S. Park, and D. S. Jang et al, "Optimization of search and target acquisition in multi-function radars for high velocity targets," *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, pp. 671-675, 2015
- [5] D. K. Lee, J. H. Im et al, "Modeling and simulation of aircraft motion for performance assessment of airborne AESA radar considering wind and vibration," *The Journal of Korean Society Aeronaut Space Science*, Vol. 48, No. 1, pp. 903-910, 2020.
- [6] J, Y. Ko, S. S. Park et al, "Implementation of airborne multi-function radar including attitude maneuvering," *The Journal of Korean Institute Electromagnetic Engineering Science*, Vol. 28, No. 3, pp. 225-236, 2017.
- [7] S. J. Lee, N. M. Kim, "Search operation method for multi-search areas of multi-function radar," *The Journal of Korean Institute Electromagnetic Engineering Science*, Vol. 33, No. 1, pp. 52-57, 2022.
- [8] K. B. Lee, J. B. Jeon, S. Y. Choi, "Consideration on a procedure and method to verify performance of combat AESA radar," in *The Institute of Electronics and Information Engineers, Summer Annual Conference*, Busan: Korea, Vol. 4, No. 1, pp. 1733-1735, 2017.



노 지 은 (Ji-eun Roh)

2006년 2월: 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
 2006년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원
 ※관심분야: 항공기 레이더 시스템



곽 용 길 (Yong-Kil Kwak)

2005년 2월: 부산대학교 기계공학과 (공학박사)
 2011년 10월 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원
 ※관심분야: 제어/계측, 레이더/전자전 시스템



원진주 (Jin-ju Won)

2017년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)

2017년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원

※ 관심분야: 항공기 레이더 시스템



이원진 (Won-Jin Lee)

2017년 2월 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)

2017년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원

※ 관심분야: 항공기 레이더 시스템