

항공기탑재 AESA 레이더의 동시운용모드 성능 최적화를 위한 자원 할당

Resource Allocation for Performance Optimization of Interleaved Mode in Airborne AESA Radar

김용민 · 노지은 · 원진주
국방과학연구소

Yong-min Kim · Ji-eun Roh · Jin-Ju Won

Agency for Defense Development, Daejeon 34060, Korea

[요 약]

최신의 항공기 탑재 능동위상배열레이더(AESA radar; active electronically scanned array radar)에서는 AESA 레이더의 빠른 전자적 빔 조향 능력과 효율적인 레이더 자원관리를 통해, 상황인식 능력을 극대화할 수 있는 동시운용(Interleaved) 모드가 운용된다. 본 논문에서는 AESA 레이더의 동시운용모드에 있어서 점진적인 성능 저하를 이루기 위한 모드별 자원 할당량을 결정하기 위해, 모드별 성능분석 항목을 식별하고 탐지거리 성능 측면에서 자원할당량에 따른 성능저하를 분석하였다. 이를 통해 실제 동시운용모드 설계 시 모드별 또는 탐색 영역 조합별로 성능 저하를 최소화 할 수 있는 부하량을 도출하였고, 단일모드 운용 대비 동시모드 운용 시 부하 관리 기반 빔 스케줄링 규칙에 대해 제안하였다.

[Abstract]

AESA radar is able to instantaneously and adaptively position and control the beam, and this enables to have interleaved mode in modern airborne AESA radar which can maximize situational awareness capability. Interleaved mode provides two or more modes simultaneously, such as Air to Air mode and Sea Surface mode by time sharing technique. In this interleaved mode, performance degradation is inevitable, compared with single mode operation, and effective resource allocation is the key component for the success of interleaved mode. In this paper, we identified performance evaluation items for each mode to analyze interleaved mode performance and proposed effective resource allocation methodology to achieve graceful performance degradation of each mode, focusing on detection range. We also proposed beam scheduling techniques for interleaved mode.

Key word : AESA (active electronically scanned array), Interleaved Mode, RADAR, Resource Allocation.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.5.540>



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 24 August 2023; **Revised** 12 October 2023
Accepted (Publication) 27 October 2023 (30 October 2023)

***Corresponding Author : Yong-min Kim**

Tel: *** — **** — ****

E-mail: kimyongmin@add.re.kr

I. 서 론

능동위상배열레이더는 전자적으로 빔을 조향함으로써 빔 조향 시간이 비약적으로 빨라, 기존의 기계식 빔 조향 레이더에 비해 레이더에서 수행할 수 있는 다중 임무 처리 능력이 향상되었다. 특히, 최신의 항공기 탐재 AESA 레이더에서는 AESA 레이더의 빔 조향 능력과 효율적인 레이더 자원관리를 통해, 상황인식 능력을 극대화할 수 있는 동시운용(Interleaved) 모드가 운용된다. 동시운용 모드란 공대공과 공대지 또는 공대공과 공대해 모드를 시분할하여 운용함으로써 사용자에게 두 모드를 동시에 제공하는 모드이다 [1]. 동시운용 모드에서는 단일 모드 운용대비 성능저하가 필연적으로 발생하게 되며, 모드별로 점진적인 성능저하를 이룰 수 있는 모드별 자원할당 기법이 동시운용모드의 설계 핵심이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 AESA 레이더의 동시운용모드의 설계를 위한 성능분석, 모드별 부하할당방안 및 동시운용모드에서 빔 스케줄링 기법을 제시하고자 한다.

II. 본 론

2-1 AESA 레이더의 동시운용모드

동시운용모드는 운용자에게 공대공/공대지 또는 공대공/공대해 모드의 표적 탐지/추적 상황을 동시에 MFD (multi function display)에 제공해 주는 모드로, 두 가지 모드가 동시에 처리되는 것처럼 보이나 내부적으로는 짧은 시간을 시분할하여 나누어 개별모드를 처리하게 된다. 이런 동시운용모드 설계를 위해서는 먼저 어떤 모드를 동시에 운용할 것인가에 대한 결정이 필요하다. 동시 운용 모드 설계 시, 한정된 레이더 자원을 두 모드에 나누어 할당함으로써 단일 모드 운용대비 성능 저하가 필연적이므로, 이런 성능 저하를 최소화함과 동시에 사용자의 요구도 및 기술적 효용성을 고려해서 설계해야 한다.

레이더 운용 측면에서 교전상황에 두 모드를 동시에 운용하는 것은 적절치 않으므로 공대공의 ACM (air combat maneuvering) 모드는 동시운용모드에서 제외된다. 또한 SAR (synthetic aperture radar)와 같이 한 모드를 수행하는데 수초 이상의 시간 지속이 필요한 모드도 그 대상에서 제외된다. 이는, 공대공 모드에서 표적을 수 초 이상 추적하지 못할 경우 표적이 소실되거나, 프레임 타임이 증가되어 탐지성능이 크게 저하될 수 있기 때문이다.

일반적으로 동시운용모드는 교전과 무관하게 공대지 작전 수행 중, 공대공 상황을 파악하기 위한 목적이 크며, 이러한 상황 인식을 통해 교전 필요시 단일모드로 전환해서 운용하게 된다. 본 논문에서는 가장 일반적인 공대공 모드인 AAST (all

aspect search and track)와 해상 표적을 탐지하는 SSS (sea surface search) 모드의 동시운용을 가정하였다.

2-2 레이더 동시운용모드 설계를 위한 성능분석 및 자원할당

1) 동시운용모드 자원할당을 위한 단일모드 성능지표

동시운용모드시 단일 모드 대비 성능저하를 판단할 수 있는 주요 항목은 다음과 같다.

- AAST 최대탐지거리
- SSS 최대탐지거리
- AAST 동시추적수

AAST, SSS의 최대탐지거리는, 탐색 영역 전체를 한번 탐색하는데 걸리는 시간인 프레임타임(frame time)의 영향을 받는 성능항목이다. AAST의 최대탐지거리는 누적탐지확률로 계산되는 것이 일반적이며 [2], 프레임타임이 길어질수록 표적을 탐지할 수 있는 시간 간격이 증가하여 그만큼 표적의 탐지거리가 감소하게 된다.

SSS 최대 탐지거리는 해상 클러터로 인한 오폭적을 줄이기 위해 초기 탐색 단계에서 전체 탐색 영역을 수차례 탐색하여 탐지 플롯을 누적하여 최초 탐지를 선언하게 된다. 즉 SSS에서는 표적 탐지를 최초로 선언하기까지 수차례 전체 탐색 영역 탐색으로 인한 프레임타임이 소요되며, 프레임 타임이 길어지면 이 시간이 더 증가되어 최대탐지거리가 감소하게 된다.

상황인식 능력을 향상하기 위해서 동시에 추적할 수 있는 표적의 수도 중요한 성능 지표중 하나이다. 기계식 레이더에서는 공대공 모드에서 표적 탐지와 추적을 위해 TWS (track while scan) 방식을 사용하는 것이 일반적이다. 반면, AESA 레이더의 공대공 모드에서는 추적 표적을 위해 별도의 추적빔을 할당하여 추적 정확도를 향상시키는 것과 동시에 탐색 범위를 벗어나도 추적 유지를 가능하게 하는 SWT (search while track) 방식을 적용하게 된다. 이때 공대공 모드에서 동시에 추적할 수 있는 표적의 수는 추이에 할당할 수 있는 자원의 양에 비례하게 되며, 단일 모드 대비 동시운용모드에서는 공대공 모드에 할당되는 자원량의 감소에 따라 동시추적표적수가 감소하게 된다.

본 논문에서는 최대탐지거리 성능 관점에서 자원할당에 따른 단일모드 성능을 분석하고 이를 이용해 동시운용모드에서 최탐거리 성능 최소화를 위한 모드별 자원 할당량을 분석하고자 한다.

2) 자원할당에 따른 단일모드 성능 분석

본 논문에서 [1]에서와 같이 레이더 운용자는 AAST 모드에서 탐색 시 탐색 영역 중심을 기준으로 방위각 $\pm 10^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$, 고각은 1 bar, 2 bar, 4 bar를 선택할 수 있음을 가정하였다. 또한, SSS 모드에서 탐색 시 탐색 영역 중심을 기준으로 방

위각 $\pm 10^\circ, \pm 30^\circ, \pm 60^\circ$ 을 선택할 수 있고, 고각은 1 bar로 운용됨을 가정하였다.

그림 1과 그림 2는 [1]에서 소개된 그림으로 설명의 편의를 위해 참고한다. 그림 1은 AAST에서 자원할당에 따른 최대탐지거리의 성능저하를 보여주는 것으로 x축은 AAST에 할당되는 자원량, y축은 AAST 단일 모드 운용 대비 최대 탐지거리의 성능저하를 나타낸다. 분석에 사용된 파형은, AAST 단일 모드에서 최대탐지거리 규격을 만족할 수 있는 파형 설계 결과를 이용하였다. 자원할당 100%일 때의 탐지거리 성능 저하 값 0은 단일모드의 최대탐지거리와 동일하다는 의미이다.

그림 1에서 알 수 있듯이, AAST에 할당하는 자원량이 감소할수록, 탐색 영역이 넓어질수록 성능저하가 크게 발생한다.

그림 2는 SSS에서 자원할당에 따른 최대탐지거리의 성능저하를 보여준다. AAST에서와 마찬가지로 SSS에 할당하는 자원량이 감소할수록, 탐색 영역이 넓어질수록 성능저하가 크게 발생한다.

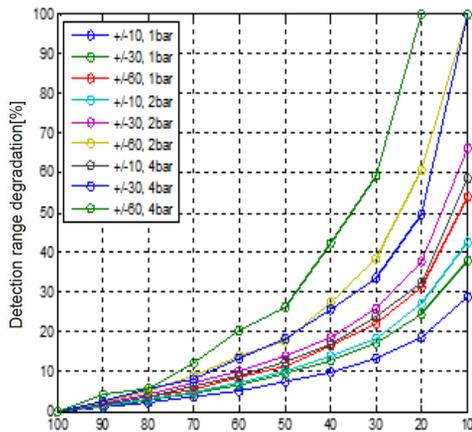


그림 1. AAST 모드의 자원 할당에 따른 탐지거리 성능 저하
 Fig. 1. Maximum detection range degradation of AAST mode according to the resource allocation

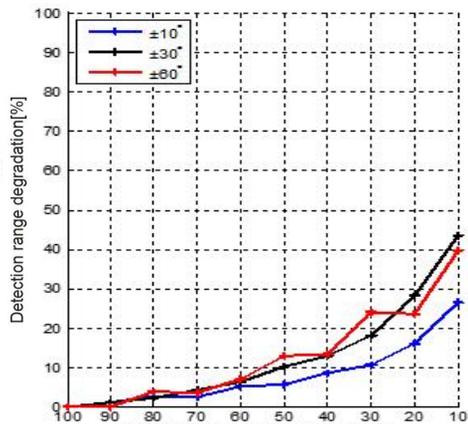


그림 2. SSS 모드의 자원 할당에 따른 탐지거리 성능 저하
 Fig. 2. Maximum detection range degradation of SSS mode according to the resource allocation

3) 성능저하 최적화를 위한 동시운용모드 자원 할당

모드별 자원할당에 따른 성능분석결과를 이용해 동시운용 모드 설계 시 모드별 자원 할당 방법으로 본 논문에서는 자원 할당량에 따른 두 모드의 탐지거리 성능 저하량의 합을 최소화하는 방안을 제안한다.

이를 위해 그림 1과 그림 2의 성능분석 그래프를 curve fitting하여 AAST와 SSS의 탐색 영역 조합별 자원할당에 따른 두 모드의 탐지거리 성능저하의 합을 분석하면 그림 3과 같다.

여기서 x축은 AAST에 할당된 자원량, y축은 그때의 AAST와 SSS의 탐지거리 성능저하의 합을 보여준다. 그림 3의 하단의 그림은 상단 그림의 일부 영역을 확대한 것으로 동그라미로 마킹되어 있는 값이 탐색영역 조합별 성능저하 최소값을 의미하며, 탐색 영역 조합에 따라 성능저하 최소값을 갖는 자원할당량이 차이가 남을 알 수 있다.

그림 4는 AAST와 SSS의 탐색 영역 조합별 성능저하 최소값을 갖는 모드별 자원할당량을 표시하였다. AAST와 SSS의 탐색영역이 유사한 $\pm 10^\circ$ 1bar 기준으로 보면 AAST에 요구되는 자원량(52%)이 SSS에 요구되는 자원량(48%)보다 큰데, 이는 AAST의 프레임타입이 SSS의 프레임타입 대비 상대적으로

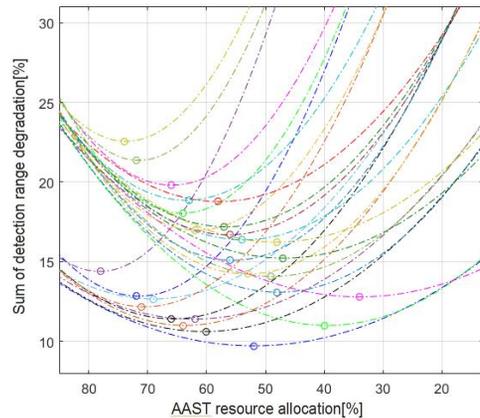
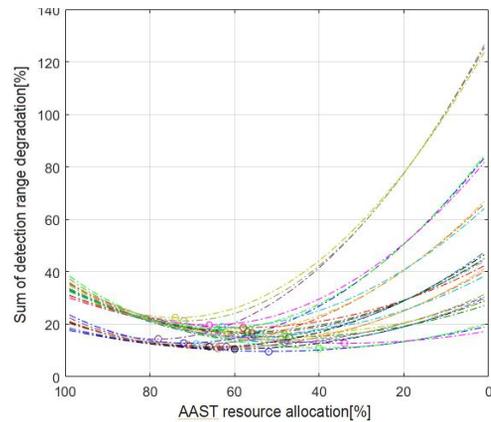


그림 3. AAST 자원할당에 따른 탐색영역별 성능저하량 합
 Fig. 3. Sum of performance degradation for each surveillance area combination according to the AAST resource allocation

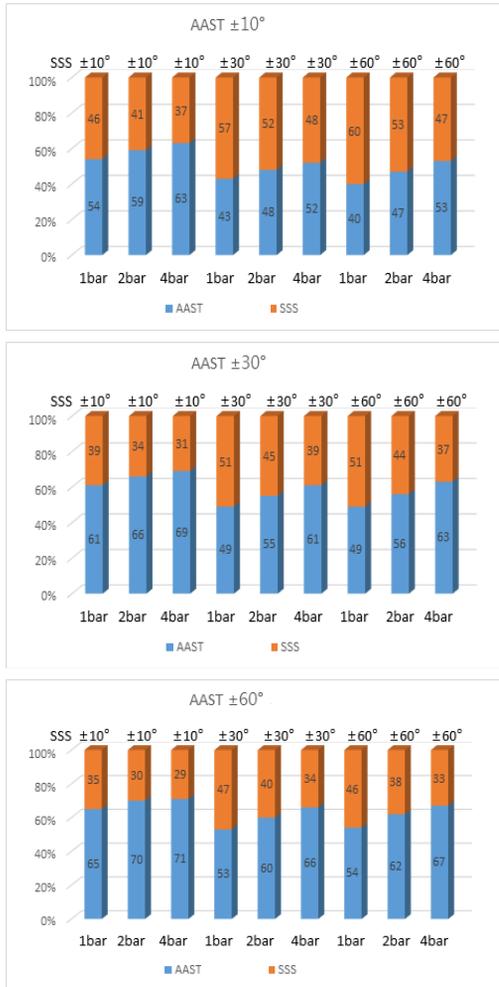


그림 4. 탐색영역별 성능저하를 최소화하는 자원할당량
 Fig. 4. Resource allocation for each search volume to minimize performance degradation

길고 공중 표적이 해상 표적보다 훨씬 빠르기 때문에 AAST가 자원할당에 따른 성능변화가 더 민감하기 때문이다.

이는 그림 1, 2에서의 그래프의 기울기를 통해서도 동일하게 확인할 수 있다. 그림 4에서, AAST와 SSS 공통적으로 각각의 탐색영역이 넓어질수록 요구되는 자원할당량이 증가한다.

특히 AAST의 탐색영역이 넓어질수록 AAST에 요구되는 자원이 더 크게 증가함을 알 수 있는데, 이는 AAST의 탐색영역이 증가할수록 프레임타임이 크게 증가하여 자원할당에 따른 성능저하가 더 민감하게 반영되기 때문이다.

표 1은 AAST 탐색범위 기준 SSS의 모든 영역 조합에 대해 최저성능저하(평균값 기준)를 갖는 각 모드별 자원할당량을 보여준다. 이런 분석을 통해 실제 AAST와 SSS를 동시 운용할 때 자원할당을 다음과 같이 두 가지로 운용할 수 있다.

- 탐색 영역 조합별 차등 부하 할당
- AAST와 SSS에 62:38로 일괄 부하 할당

표 1. 최대탐지거리 성능저하 최소를 위한 자원할당
 Table 1. Resource allocation to minimize performance degradation w.r.t maximum detection range

AAST Scan Azimuth	AAST	SSS
±10°	51%	49%
±30°	62%	38%
±60°	68%	32%
All	62%	38%

동시운용모드 임무상 AAST와 SSS의 동시 운용 시 조종사의 주 관심은 SSS 모드이지만, 고속 고기동 표적을 다루고 상대적으로 긴 프레임타임을 갖는 AAST 모드가 SSS 모드 대비 자원 할당에 따른 성능 변화가 크므로, 성능 최적화 관점에서 AAST에 더 많은 자원 할당이 필요함을 알 수 있다.

4) 동시운용모드에서 동시표적추적수

AAST 모드에서는 표적 추적시 추적범을 할당하는 방식의 SWT 방식을 적용하게 되는데, 이때 동시에 추적할 수 있는 표적의 수는 추적에 할당할 수 있는 자원의 양에 비례하게 된다. 예를 들어, AAST 모드에 할당할 수 있는 부하가 단일모드 운용대비 50% 감소하게 되면 동시에 추적할 수 있는 표적의 수도 단일모드 대비 50% 감소하게 된다. 반면 SSS 모드에서는 표적의 속도와 기동이 크지 않으므로 TWS 방식을 적용할 수 있으며 TWS에서 동시표적 추적수는 자원 할당에 크게 영향을 받지 않는다.

2-3 동시운용모드에서 빔 스케줄링 규칙

단일모드에서 빔 스케줄링은 빔의 우선순위와 빔의 요청시간등을 고려하여, 우선순위가 높은 빔의 지연을 최소화하도록 설계하며 탐색범은 특별한 요청시간이 없으므로 우선순위가 높은 빔을 가능한 정해진 시간에 처리할 수 있도록 남은 시간에 탐색범을 처리하게 된다 [3]-[5]. 반면, 동시운용모드에서 빔 스케줄링은 빔간 우선순위를 고려하되, 모드별로 할당된 자원량을 지속적으로 관리할 수 있도록 수행되어야 한다.

본 논문에서 제안하는 동시운용모드의 빔 스케줄링은 다음과 같은 규칙에 의해 설계된다.

1. 빔간 우선순위는 다음과 같다.
 (높음) AAST 확인빔 > AAST 추적 빔 > AAST/SSS 탐지빔
 (낮음)
2. AAST의 확인빔, 추적범은 요구되는 시점 및 추적 주기에 따라 임의의 시점에 스케줄링 될 수 있으며, 탐지범에 의해 지연되지 않는다.
3. 부하를 실시간 모니터링하여 모드별로 할당된 부하를 유지할 수 있도록 탐색범을 스케줄링 한다.

공대공 모드에서 탐지된 표적은 일반적으로 확인 과정을 거쳐 추적 표적으로 관리하게 되며, 표적이 탐지된 후 가장 빠른 시간 이내에 확인빔이 스케줄링 되어야 한다. 또 공대공 추적 표적은 속도가 빠르고 기동이 크므로 빠른 추적 업데이트가 필요하며, 제때에 추적빔이 할당되지 않으면 표적을 소실할 가능성이 커진다. 따라서 공대공 추적 표적을 유지하기 위해서는 추적 주기에 맞추어 추적빔이 스케줄링 될 수 있어야 한다.

AAST와 SSS의 동시운용모드에서 각 모드별로 50%씩 자원을 할당하는 경우의 빔 스케줄링의 예를 살펴보자. AAST 탐색빔을 100 msec, 프레임타임을 10 sec, 추적빔을 50 msec, 추적주기를 1 Hz라고 가정하고, 공대해 탐색 빔을 10 msec, 프레임타임을 1 sec라고 가정하였을 때 AAST의 추적표적이 없을 경우 탐색상황에서는 시간을 50% 각각 쪼개어, 1초 기준 SSS는 전체탐색영역의 50%(탐색 빔 50개, 빔간 겹침 없음 가정)를, AAST는 전체 탐색 영역의 5%(탐색빔 5개, 빔간 겹침 없음 가정)를 탐색하게 된다.

만약 공대공 모드에서 탐색중 표적 4개가 탐지되어 추적에 들어가게 되면 AAST의 총 50% 부하중, 표적당 추적부하가 5%이므로 표적 추적에 총 20%의 부하를 할당하고 나머지 탐색부하 30%를 할당하게 된다. 이때 공대공 표적의 추적은 추적 주기에 맞춰 요청된 시간에 지연 없이 처리될 수 있도록 임의의 시점에 끼어들 수 있어야 한다. AAST의 탐색 부하는 공대공 표적의 추적수가 증가하게 됨에 따라 줄어들게 되며, SSS의 탐색부하는 항상 50%가 유지되게 된다. 부하를 모니터링하며 모드별로 할당된 부하를 유지할 수 있는 빔 스케줄링의 구체적인 방안은 기존 연구 [6]에서 연구되었으며 본 논문의 범주에서는 제외한다.

III. 결 론

본 논문에서는 AESA레이다의 동시운용모드에 있어서 점진적인 성능 저하를 이루기 위한 모드별 자원 할당량을 결정하기 위해, 모드별 성능분석 항목을 식별하고 자원할당량에 따른 성능저하를 분석하였다. 이를 통해 실제 동시운용모드 설계 시 모드별 또는 탐색 영역 조합별로 성능 저하를 최소화할 수 있는 부하량을 도출하였다. 또한 단일모드 운용 대비 동

시모드 운용 시 부하 관리 기반 빔 스케줄링에 대해 제안하였다.

SSS모드에서 자원 할당에 따른 TWS 추적 성능에 대해서는 다루지 않았으며 이는 향후 연구로 남겨둔다. 또한 빔 스케줄링에서 부하를 관리하는 적정한 시간 구간 등에 대해서도 향후 연구가 필요하다.

Acknowledgments

본 연구는 2023년도 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임.

References

- [1] J. E. Roh, Y. H. Park, J. H. Yoon and J. J. Won, "Performance analysis for interleaved mode design of airborne AESA radar", *The Korean Institute of Military Science and Technology, Proceedings*, pp. 263~264, 2018.
- [2] J. D. Mallet, "Cumulative probability of detection for targets approaching a uniformly scanning search radar" *Proceedings of the IEEE*, Vol. 51, No. 4, pp. 596~601, Apr. 1963.
- [3] J. E. Roh, C. S. Ahn and S. J. Kim, "Beam scheduling algorithm of multi-function AESA radar based on dispatching rules", *The Korean Institute of Electromagnetic engineering and Science*, Vol.23, No.1 pp. 1~13, 2012.
- [4] J. E. Roh, D. H. Kim and S. J. Kim, "Differential choice of radar beam scheduling algorithm according to radar load status", *The Korean Institute of Military Science and Technology*, Vol15, No.3 pp. 322~333, 2012.
- [5] J. M. Butler, "Multi-function radar tracking and control", *University College London, PhD Thesis*, 1998.
- [6] J. E. Roh, J. J. Won and J. H. Yoon, "Beam scheduling algorithm for interleaved mode of AESA radar." *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 32, No. 4, pp. 377-385, 2021.



김 용 민 (Yong-min Kim)

2010년 3월 : 한서대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
2004년 11월 ~ 2015년 3월 : 공군 항공SW지원소 전투기 MC SW 개발
2017년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원
※관심분야 : 항공기 레이더 시스템, 미사일 데이터 링크, Terrain Following



노 지 은 (Ji-eun Roh)

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



원 진 주 (Jin-ju Won)

2017년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)
2017년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원
※관심분야 : 항공기 레이더 시스템