

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.2.51  
JIIBC 2024-2-8

# 추적 레이더의 대전자전 설계

## ECCM Design of Tracking Radar

김홍락\*, 이만희\*\*, 박성호\*\*, 김윤진\*\*

Hong-Rak Kim\*, Man-Hee Lee\*\*, Sung-Ho Park\*\*, Youn-Jin Kim\*\*

**요약** 추적 레이더 시스템은 대양에서 운용 중인 함정 표적에 대하여 실시간으로 표적을 탐색, 탐지하여 추적하는 펄스 방식의 추적 시스템이다. 함정에서는 추적 레이더를 혼란 또는 기만하기 위한 소프트 킬 동작을 통하여 스스로를 방어한다. 소프트 킬 동작에는 수동적으로 동작하는 채프 등이 있고 능동적으로 동작하는 잡음 재밍 등 여러 동작들이 있다. 본 논문에서는 전자전에 대한 기본적인 개념을 이해하고 함정에서 운용 중인 다양한 기만체계에 대하여 설명한다. 또한 각각의 기만체계를 대응하기 위한 레이더 시스템 설계에 대하여 설명한다.

**Abstract** The tracking radar system is a pulsed tracking system that searches, detects, and tracks targets in real time for ships operating in the ocean. Ships defend themselves through soft kill operations to confuse or deceive the tracking radar. Soft Kill operations include passive chaff and active noise jamming. This paper understands the basic concepts of electronic warfare and explains various deception systems in operation on ships. In addition, each deception The radar system design to respond to the system is explained.

**Key Words** : tracking radar, eccm, deception

### 1. 서 론

레이더의 ECM(Electronic Counter Measure)과 ECCM(Electronic Counter-Counter Measure)는 현재 전자전에서 주요 상충되는 쌍을 형성한다. 레이더 ECM과 ECCM은 레이더가 군사 목적으로 사용되는 배경에서 개발되었다. 특히 세계 2차 대전 때 레이더 방해 장비 연구가 활발하였다.<sup>[1][2]</sup> 일반적으로 좁은 대역폭의 진폭 변조 노이즈 재밍이 주를 이루었다. 전쟁이후에는 많은 양의 알루미늄 채프가 수동적 간섭에 사용되었다. 1960년대 후반과 70년대 초반에 레이더 재밍 이론이 완성되고 전자전 관련 논문들이 연속적으로 등장하였다.

이를 통하여 빠르게 ECM 기술들이 발전되었다. 특히 고 출력의 레이더 송신기가 개발됨에 따라 기만 재밍 기술이 발전하였다.<sup>[3][4]</sup> 컴퓨터의 발전과 마이크로프로세서의 응용 프로그램의 발전으로 대형 전력 방해 전파가 가능한 AN/ALQ-99, 듀얼 모드 방해 AN/ALQ-119 및 AN/ALQ-131 등이 개발되었다.<sup>[5][6]</sup> 재밍 신호를 대응하기 위하여 마이크로 전자 기술의 발전에 힘입어 다양한 안티재밍 신호처리 기술이 발전하였다. 대공 추적레이더에서는 펄스 도플러 시스템 적용, 초저 사이드로브 안테나 적용, 높은 안정성을 가진 발진기, 다중 도플러 신호 처리 기술이 적용되었다.

\*정회원, LIG넥스원(주) PG탐색기연구소 (교신저자)

\*\*정회원, LIG넥스원(주) PG탐색기연구소

접수일자 2024년 2월 5일, 수정완료 2024년 3월 5일

게재확정일자 2024년 4월 5일

Received: 5 February, 2024 / Revised: 5 March, 2024 /

Accepted: 5 April, 2024

\*Corresponding Author: hongrak.kim@lignex1.com

Dept. of RF & IIR Seeker R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea

## II. 본 론

### 1. Electronic Warfare 분류

EW의 분류는 그림 1과 같다. 크게 EA(Electronic Attack), ES(Electronic Warfare Support), EP(Electronic Protection)으로 분류된다. EA의 Soft Kill 하위에 ECM 이 있고 이를 대응하기 위한 ECCM은 EP 하위에 있다. 본 논문에서는 ECM과 ECCM에 대하여 다루도록 한다.

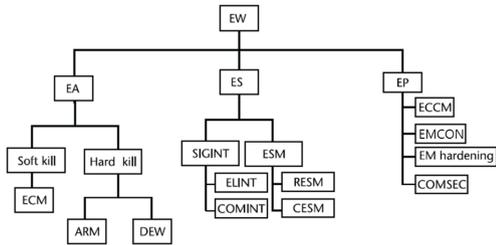


그림 1. EW 기능 분류  
Fig. 1. Classification of EW functions.

ECM 시스템의 크게 통신에 대한 ECM(CECM), 레이더에 대한 ECM(RECM), 적외선에 대한 ECM(IRCM)으로 나눌 수 있다. 그림 2는 ECM 시스템의 분류를 보여주고 있다.

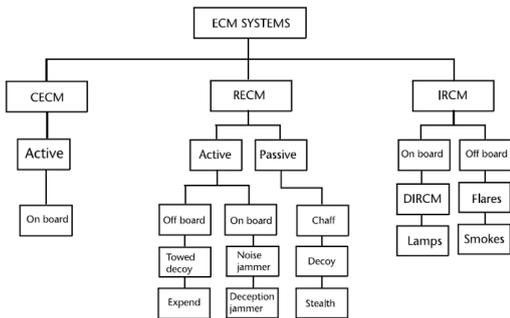


그림 2. ECM 시스템 분류  
Fig. 2. Classification of ECM systems.

레이더에 해당되는 RECM 하위에는 능동과 수동으로 나누어진다. 능동기만의 경우 해당 함정에서 직접하는 on board가 있고 다른 함정이나 다른 위치에서 운영되는 Off board가 있다. On board 형태에는 잡음 재밍과 기만 재밍이 있다.<sup>[7]</sup> 잡음 재밍의 경우 광대역을 고르게 신호를 방사하는 Barrage Jamming, 대역 내에서 선

형적으로 이동하는 Swept Spot Jamming, 대역 내에서 특정 주파수에만 동시에 신호를 방사하는 Multiple Spot Jamming 이 있다. Barrage Jamming의 경우 먼 거리에서는 효과적이지만 Burn-through range 가 길어서 재밍에 한계가 있다.

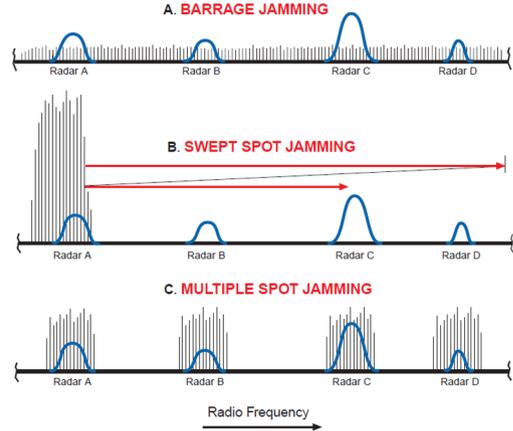


그림 3. 잡음 재밍  
Fig. 3. Noise Jammer

기만 재밍은 레이더 시스템과 운영자를 속이기 위해 재밍 펄스를 사용하여 가짜 표적 신호를 생성하는 것이다. 각도, 거리, 속도에 대하여 재밍이 가능하다. 기본적인 개념은 추적 레이더에서 받은 신호를 DRFM 구조의 전자전 장비를 활용하여 재밍신호를 생성하여 빠르게 송신하는 방식이다. 여기에는 몇가지 형태가 있다. False Target Generation, Range Gate Pull Off/In(RGPO/I), Velocity Gate Pull Off/In(VGPO/I), Swept Rate Modulation Jamming(SRM), Inverse Gain Modulation(IGM) 등이 있다.<sup>[8]</sup> 함정에서 운용되는 주요 기만 재밍에는 RGPO가 있다. 더 큰 신호를 생성하여 거리 방향으로 gate를 Pull off 혹은 pull in 후에 신호를 차단하여 추적을 더 이상 하지 못하게 한다.

Off board 타입은 Towed decoy, Expend 등이 있다. 그림 4는 항공기에서 운용하는 견인 디코이를 보여준다. 항공기에서 추적레이더로부터 받은 신호를 이용하여 기만 신호를 생성하여 RF 신호를 광으로 변환하여 디코이와 연결된 광케이블로 전송한다. 디코이에서는 다시 RF 신호로 변환한 후 증폭시켜서 안테나를 통하여 방출하는 구조로 되어 있다.

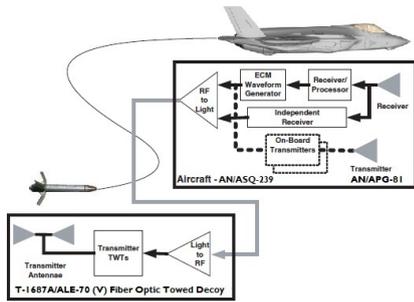


그림 4. 능동형 견인 디코이 시스템  
 Fig. 4. Active Towed Decoy System.

함정에서 운용하는 능동 Off board 타입에는 Nulka 디코이가 있다. 그림 5는 Nulka 디코이 운용을 보여주고 있다.



그림 5. 함정용 능동 디코이 시스템  
 Fig. 5. Active Decoy System for warship.

수동타입에는 그림 6과 같은 채프가 있다. 채프는 레이더 반사 구름을 형성하고 채프 점유의 길이에 따라 다양한 대역의 레이더 신호에 효과적으로 반응 한다. 짧은 시간동안 동작하고 바람의 영향을 많이 받기 때문에 함정의 이동 방향과 바람의 방향을 고려하여 채프 구름을 형성하여야 한다. 그림 7은 함정에서 운용하는 부유 디코이이다. 코너리플렉터를 여러개 붙여 놓은 형상으로 단위 면적당 RCS(Radar Cross Section:레이더 단면적)가 함정보다 상대적으로 커서 오프적으로 인식하도록 한다. 거리방향으로 해상도가 높은 레이더의 경우 HRR(High Range Resolution) 기법을 적용하면 길이가 긴 함정과 디코이를 분리 식별 가능하다.

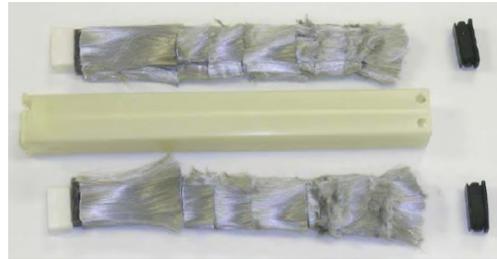


그림 6. 채프  
 Fig. 6. Chaff

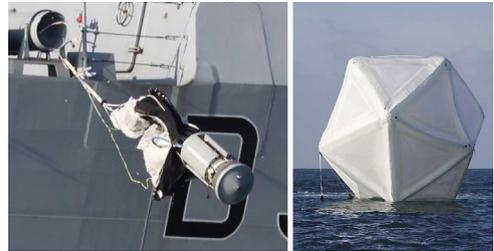


그림 7. 디코이  
 Fig. 7. Decoy

## 2. ECM 대응 추적 레이더 설계

앞에서 설명한 여러 ECM 기능에 대하여 함정 추적을 위한 레이더에서 ECM 대응을 위한 설계에 대하여 설명한다. 잡음 재밍의 경우 stand off로 주로 운용한다. 큰 잡음 재밍신호를 송신하여 표적의 반사신호가 잡음에 묻혀 식별이 되지 않도록 하는 기법으로 표적만을 추적하는 레이더의 경우 표적을 잃어 버리게 된다. 하지만 최근의 추적레이더에는 Home on Jam 모드가 있어서 재밍 방향으로 추적을 유지하기 때문에 잡음 재밍을 발생시키는 함정에 위협이 될 수 있다. 또한 Burn-through range 범위안으로 들어오면 표적 신호를 분리 추출하기 때문에 무의미해 진다. 채프는 채프 점유의 길이에 따라 다양한 대역의 레이더 신호에 효과적으로 대응가능해서 대역폭이 넓은 추적레이더에 대응에 효과적이다. 바람과 중력에 의하여 내려 앉기 때문에 특정 시간이 지나면 효과는 사라진다. 최근 추적레이더는 채프의 신호특성을 이용하여 별도의 운용모드를 두고 관리한다. 채프는 바람과 중력에 의해서 신호의 fluctuation이 발생한다. 실제 표적신호와 다른 특성으로 해당 fluctuation을 식별하여 운용모드를 관리하게 된다. 이전 추적 정보를 이용하여 추정관리 후 채프 신호가 사라지면 재 획득을 통하여 추적을 유지하게 된다.

능동형 기만신호 기법중 많이 적용되는 것은 거리방향의 기만인 RGPO 이다. 추적레이다로부터 수신한 신호를 하향 변환후 DRFM 구조의 변조기를 통하여 더 큰 신호를 생성후 안테나를 통하여 추적레이다 방향으로 송신을 한다. 처음에는 최대한 함정 반사 신호와 동일한 타이밍으로 송신하기 위하여 지연시간을 최소화 한다. 큰 신호를 표적신호라 식별하여 추적레이다에서 기만신호를 추적하고 있다고 판단되면 기만신호 생성 게이트를 pull off 하여 거리 정보를 기만하게 된다. 그림 8은 RGPO의 게이트 운용에 대해 보여준다.

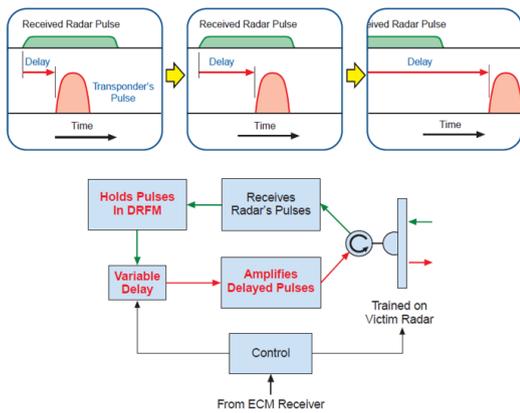


그림 8. RGPO 운용 개념[7]  
Fig. 8. RGPO Operation concept

추적 레이다의 신호처리 방식이 더 큰 신호를 표적으로 식별하도록 되어 있으므로 쉽게 기만당할 수 있다. 해당 기만에 대응하기 위하여 추적 레이다는 수신신호를 고속의 디지털처리를 통하여 작은 시간 지연을 식별하여 앞선 신호를 표적으로 인식하여 추적을 유지하도록 한다. 이러한 기만신호 생성시 발생할 수 밖에 없는 시간 지연을 제거하기 위하여 함정에서 운용하는 기만체제에서는 추적 레이다에서 운용하는 주파수 정보를 저장하고 미리 송신할 신호를 생성한 후 획득된 PRI(Pulse Repetition Interval:송신펄스 반복주기) 정보를 이용하여 빠르게 게이트만 생성하여 신호를 해당 게이트에 실어 송신 한다. 이러한 RGPO에 대응하기 위해서는 주파수 정보를 저장할 수 없도록 랜덤코드를 이용하여 대역폭 내에서 운용한다. 이러한 방식을 Frequency Agility 라고 한다. 본 추적 레이다에서는 랜덤 코드를 메모리에 저장하여 DDS를 통하여 주파수를 생성시에 사용한다. 추적 레이다의 송신 주파수가 랜덤하여 정확인 Spot

Jamming을 걸 수 없어서 대역폭을 모두 커버하는 광대역의 출력이 낮은 Barrage Jamming을 시도할 수 밖에 없다. Barrage Jamming은 Burn-through range 가 길어서 재밍에 한계가 있다. 그림 9는 표적신호와 재밍신호 관계에서의 Burn through range를 보여준다. 표적신호가 8~12dB 이상이면 표적을 추출할 수 있는 거리가 된다. Burn through range를 길게 확보하기 위해서는 추적레이다의 대역폭은 넓을수록 좋다.

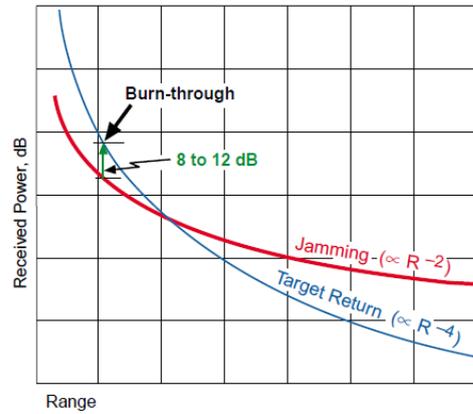


그림 9. Burn-through range 그래프[7]  
Fig. 9. Burn-through range graph

PRI 정보를 획득하지 못하게 하기 위하여 PRI 주기를 특정 범위에서 랜덤하게 적용한다. 이러한 기법을 staggering 기법이라고 한다. 스테저링을 위한 랜덤 값을 FPGA에서 수도 랜덤 코드를 생성하고 레이다 시스템에 존재하는 백색 잡음 데이터를 혼합하여 사용한다.

수신된 신호는 여러 번의 비동기 적분인 NCI (NonCoherent Integration) 통하여 SNR을 높이면 표적 반사신호는 잡음 대비 증가하지만 기만 신호는 대역폭 내에서 수신신호와 주파수가 맞을 때만 수신되므로 잡음 대비 신호가 상대적으로 높아지지는 않는다. 또한 거리 방향으로 staggering에 대한 PRF 에 대한 정확한 정보를 얻지 못하기 때문에 고정 PRF로 기만을 하게 된다. 그림 10은 Staggering을 통한 NCI 운용 개념을 보여준다. 기만 신호는 staggering 범위내에서 NCI를 통하면 거리방향으로 넓게 신호가 퍼져가면서 적분이 되어 NCI의 개수에 따라서 SNR이 많이 개선되어 기만을 극복할 수 있다.

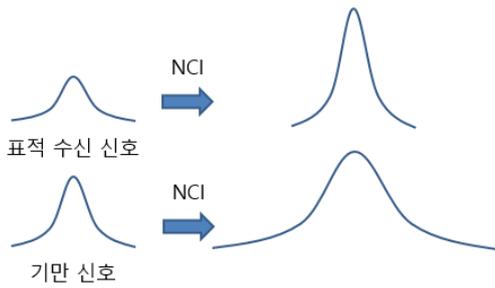


그림 10. Staggering을 통한 NCI 운용 개념  
 Fig. 10. NCI operation concept through staggering

NCI의 횟수는 그림 11과 같이 일정 횟수를 넘어서면 dB 스케일의 SNR의 값의 증가 속도가 느려진다. 또한 NCI의 횟수가 많아지면 추적 정보의 업데이트 주기가 길어져 거리오차와 각도 오차가 커질 수 있다.

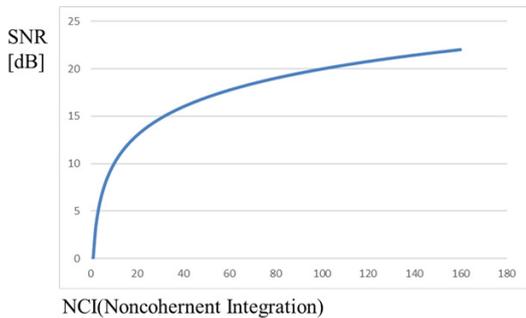


그림 11. NCI 대비 SNR 증가  
 Fig. 11. Increased SNR compared to NCI

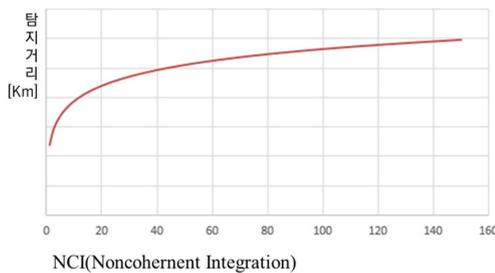


그림 12. NCI에 따른 탐지거리 증가  
 Fig. 12. Increased detection Range according to NCI

그림 12는 NCI에 따른 레이더의 탐지거리 증가를 보여준다. 탐지거리 증가는 거리  $R^4$ 에 비례하므로 NCI의 어느 횟수 이상으로 가면 효과가 떨어진다.

채프 기만의 경우 레이더에서 송신된 신호가 넓은 영역에 퍼져 있는 채프에 의해 큰 신호로 반사되어 들어 온

다. 이 반사신호에 표적의 신호가 포함되어 들어온다. 채프신호 뒤에 숨어 있는 표적의 정확한 각도 정보를 추출하기 힘들다. 하지만 채프는 종력과 바람의 영향으로 신호가 fluctuation 경향을 보인다. 이러한 특성의 신호가 입력되면 채프 기만 상황을 인식하고 기존의 추적정보를 활용하여 채프 상황이 사라질 때까지 추정하여 추적을 유지한다.

능동 혹은 수동 디코이 기만의 경우 표적 근처에서 기만을 유지한다. 디코이 특성상 더 큰 신호를 반사 혹은 생성하여 보내주기 때문에 일반적인 추적에서는 쉽게 기만이 된다. 이러한 경우 표적에 비하여 디코이의 물리적인 크기가 작기 때문에 신호의 세기는 크지만 반사되어 오는 신호의 범위는 매우 좁다. 거리 추적에서 거리 해상도를 높여서 입력되는 신호를 통하여 분리가 가능하다. 이때 LPRF 파형에서 송신신호를 대역폭 내에서 선형적으로 STEP Frequency를 사용하여 분리한다. 그림 13에서 기만신호는 수신전력은 크지만 표적신호대비 상대적으로 사이즈가 작아서 거리방향의 Range Bin의 영역은 작다. 이를 통하여 식별을 한다.

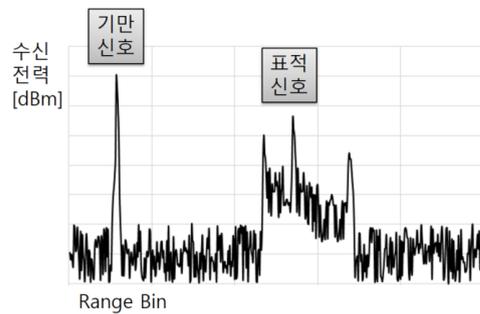


그림 13. STEP Frequency를 활용한 표적신호 분리  
 Fig. 13. Target signal separation using STEP Frequency

### III. 시 험

시뮬레이션 도구를 이용하여 표적신호와 기만신호를 생성하여 RGPO 기만을 수행하였다. 그림 14는 기만대응 알고리즘을 활성화하지 않은 상태이다. 그림과 같이 표적과 기만신호가 분리되어 거리 방향으로 멀어져갈 때 기만신호를 추적하고 있음을 확인하였다. 그림 15는 동일한 상황에서 기만 대응 알고리즘을 활성화한 상태이다. 표적신호와 기만신호가 분리될 때 Early Gate에 최초로 입력되는 신호를 바탕으로 표적신호를 계속 추적

유지하고 있음을 확인하였다. DRFM 기반의 기만신호 발생장치는 수신된 신호를 기반으로 기만신호를 생성하여 출력때까지 시간 지연일 필수적으로 발생한다. 이러한 기술적 한계를 활용하여 분리하는 것이다.

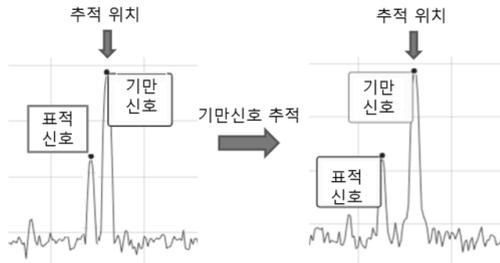


그림 14. RGPO 기만에 대한 기만 상황  
Fig. 14. Deception situation for RGPO deception

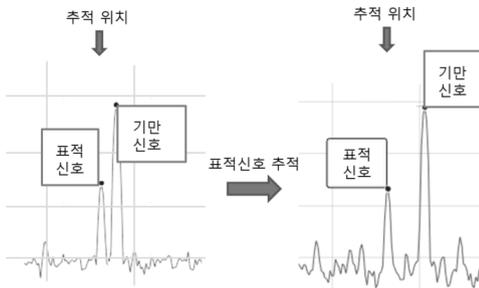


그림 15. RGPO 기만에 대한 표적 추적 상황  
Fig. 15. Target tracking situation for RGPO deception

#### IV. 결 론

본 논문에서는 전자전에 대한 기본적인 개념을 이해하고 함정에서 운용중인 다양한 기만체계에 대하여 설명하였다. 또한 각각의 기만체계를 대응하기 위한 레이더 시스템의 신호처리 설계에 대하여 설명하였고 시뮬레이션을 통하여 기만에 대한 대응 결과를 확인하였다.

#### References

- [1] Chrzanowshi, E. J., "Active Radar Electronic Countermeasures", Artec House, Inc., Norwood, MA, 1990.
- [2] Bahman Zohuri, "Radar Energy Warfare and the Challenges of Stealth Technology", Springer.
- [3] Avionics Department, "Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook", NAVAL AIR WARFARE CENTER WEAPONS DIVISION, OCTOBER 2013
- [4] Edward K. Reedy, "Radar ECCM Considerations and Techniques" Principles of Modern Radar pp 681-699, Editors Jerry L. Eaves Edward K. Reedy, Chapman & Hall, New Your, NY, and International Thomson Publishing, 1987 Singapore.
- [5] USAF "Air Warfare Center, Radar, ECM and ECCM Fundamentals", January 1992.
- [6] Skolnik, M. I., "Introduction to Radar Systems", 3rd ed., Boston, MA: McGraw-Hill, 2001.
- [7] Stimson, G. W., Introduction to Airborne Radar, 2nd Edition, SciTech Publishing, Inc., Mendham, NJ, 1998.
- [8] Mark A. Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing", The McGraw-Hill Companies, Inc. 2005.
- [9] David K.Barton, Radar System Analysis and Modeling. Norwood, MA: Artech House, 2005.
- [10] F. Neri, Introduction to electronic defense systems (2nd Edition), SciTech Publishing: Raleigh, 2006.
- [11] P. R. Kalata, T. A. Chmielewski, "Range gate pull off (RGPO): detection, observability and -target tracking", Proc. Of the 29th Southeastern Symp. On System Theory, 1997, pp. 505-508. <http://dx.doi.org/10.1109/SSST.1997.581718>
- [12] X. R. Li, B. Slocumb, P. West, "Tracking in the Presence of Range Deception ECM and Clutter by Decomposition and Fusion", Signal and data processing of small targets Conference, 1999, pp. 198-210. <http://dx.doi.org/10.1117/12.364050>
- [13] Gang Lu, Shuangcai Luo, "Adaptive Biased Weight-Based RGPO/RGPI ECCM Algorithm", Proceedings of 2011 IEEE CIE, 24-27 October 2011 <http://dx.doi.org/10.1109/CIE-Radar.2011.6159736>
- [14] Lin Zou, "development of an automatic test and control system for radar seeker", Institution of Engineering and Technology International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012) <http://dx.doi.org/10.1049/cp.2012.1119>
- [15] Jongbok Lee, "A Study On Statistical Simulation for Asymmetric Multi-Core Processor Architectures", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC) Vol. 16, No. 2, pp.157-163, Apr. 30, 2016 <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.2.157>
- [16] Park, Jae-Eun, "A Development of Weapon System Test Set's Display Using an Ecological Interface Design Methodology", The Journal of Korea Academy Industrial Cooperation Society Vol. 16, 2015.06, 4147-4157 <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.6.4147>
- [17] Ga, Gwan-U, "A Comparison with SNR Performance of Coherent Integration and Non-coherent Integration to Estimate Target Detection Range in Radar System",

Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology 7(2), 2014.6, 86-91  
<http://dx.doi.org/10.17661/jkiict.2014.7.2.086>

- [18] Jong-Pil Lee, Ill-Keun Rhee, "Development of High Resolution Target Simulator with Dual Sampling Clock Rates", Journal of Korean Institute of Information Technology 12(12), 2014.12, 31-39  
<http://dx.doi.org/10.17661/jkiit.2014.12.12.031>
- [19] Tae-Hyung Kim, Hyun-Wook Moon, "A Development of Real-Time Generation Methods of Simulated Surface Clutter Signals for Airborne Radar", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science 27(2), 2016.2, 176-187

## 저 자 소 개

### 김 흥 락(정회원)



- 1995년 2월 : 대구대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
- 1997년 8월 : 대구대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1997년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주 관심분야 : 마이크로파 센서 시스템, 레이더 신호처리 등

### 이 만 희(정회원)



- 2007년 2월 : 충남대학교 전기정보통신공학부 (공학사)
- 2009년 2월 : 충남대학교 전파공학과(공학석사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석 연구원
- 주 관심분야 : 마이크로파 센서, 초고주파 회로 및 시스템 등

### 박 성 호(정회원)



- 2006년 2월 : 경상대학교 제어계측공학과(공학사)
- 2008년 8월 : 광주과학기술원 정보기전공학과(공학석사)
- 2008년 9월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주 관심분야 : 마이크로파 센서 시스템, 레이더 신호처리 등

### 김 윤 진(정회원)



- 1997년 2월 : 서울대학교 전기공학부(공학사)
- 1999년 2월 : 서울대학교 전기공학부(공학석사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주 관심분야 : 초고주파 레이더 시스템 등