

국내 공공용 레이다 기술 동향

Trends in Domestic Public Radar Technology

김형중 (H.J. Kim, acekim@etri.re.kr)

강민수 (M.S. Kang, mskang@etri.re.kr)

김청섭 (C.S. Kim, kcs@etri.re.kr)

김상원 (S.-W. Kim, melanio@etri.re.kr)

박승근 (S.K. Park, seungkp@etri.re.kr)

전파원천기술연구실 책임연구원

전파원천기술연구실 책임연구원

전파원천기술연구실 책임연구원

전파원천기술연구실 책임연구원/실장

전파연구본부 책임연구원/본부장

ABSTRACT

This paper analyzes the key technological trends and challenges facing domestic public-use radar, which are increasing because of the rapidly growing demands of public safety and national defense. Technologically, the transition to active electronically scanned arrays (AESA) is becoming widespread, gallium nitride (GaN) semiconductors are driving detection performance and miniaturization, and software-defined radar (SDR) is a key driver maximizing system flexibility and scalability. However, these technological advancements and quantitative expansions are leading to the saturation of limited frequency resources and interference issues. Therefore, this paper proposes a shift from the existing exclusive frequency allocation method to an efficient spectrumsharing paradigm as a key direction of development and discusses the technical and policy considerations of such a shift.

KEYWORDS AESA, 레이다, 주파수 공유

I. 서론

최근 국내 공공 안전 및 사회 인프라 분야에서 레이다(RADAR: RAdio Detection And Ranging) 수요가 급격히 증가하고 있다. 항공관제, 해양감시, 기상관측, 국토안보, 재난재해 대응 등 공공영역에서 레이다 기술은 국민의 생명과 재산을 보호하는 핵심

감시 · 탐지 수단으로 자리매김하고 있다. 레이다는 전자기파를 이용하여 표적의 거리, 속도, 각도 등을 탐지하는 능동형 센서로서, 빛이나 기상 조건의 제약 없이 주야간 안정적인 성능을 제공하는 고유의 강점을 바탕으로 국방 분야를 넘어 공공안전 및 산업 인프라의 핵심 기술로 빠르게 자리매김하고 있다.

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2025.J.410103>

* 본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임[No.2022-0-00024, 민군 공유주파수 환경 기반 적응형 간섭저감 기술개발].

공공용 레이다 수요 증가와 함께 레이다 기술 자체도 비약적으로 발전하고 있다. 전통적인 기계식 회전 안테나 방식에서 전자주사식 능동위상배열 (AESA: Active Electronically Scanned Array) 기술로의 전환이 가속화되고 있다. 또한, 질화갈륨(GaN) 기반 고출력 송신기 기술의 성숙으로 레이다의 탐지거리와 해상도가 동시에 개선되고 있다. 레이다 기술 발전의 또 다른 핵심축은 사용 주파수 대역의 다양화 및 광대역화이다. 과거에는 공공용 레이다는 L-밴드, S-밴드, C-밴드 중심으로 운용되었으나, 최근 X-밴드, Ku-밴드, Ka-밴드까지 확대되고 있다.

본고에서는 급변하는 국내 공공용 레이다 환경을 종합적으로 살펴보고, 주요 기술 동향과 향후 발전 방향을 소개하고자 한다.

II. 국내 공공용 레이다 운용 현황

국내 레이다 운용 현황은 국민의 안전 및 생활 편의와 직결된 공공 분야와 국가 안보를 책임지는 국방 분야로 구분되어 발전해 왔다. 특히, 한반도의 지정학적 특성과 국지성 기상 현상의 빈번한 발생은 양 분야에서 고도화된 레이다 인프라의 구축을 촉진하는 핵심 동인이 되었다. 본 장에서는 국내에서 운용 중인 레이다의 주파수 대역별 특성을 분석하고, 공공 및 국방 분야의 운용 현황을 조망함으로써 기술 개발의 당위성과 요구사항을 제시하고자 한다.

1. 주요 레이다 주파수 대역 및 특성

레이다는 운용 주파수 대역에 따라 전파의 회절, 직진성, 감쇠 특성이 달라지므로 탐지거리, 분해능, 투과율 등 핵심 성능이 결정된다. 따라서 각 활용 목적에 최적화된 주파수 대역을 선택하는 것이 매우 중요하다. 국내 공공 및 국방 분야에서 주로 사용되

표 1 공공용 레이다 주요 주파수 대역별 특성

대역	국내분배	특성	용도
UHF 0.3~1GHz	420~450MHz	• 거리해상도 낮음 • 기상영향 거의 없음	• 초장거리 탐지
L 1~2GHz	1,215~1,400MHz	• 거리해상도 보통 • 기상영향 낮음	• 장거리탐지 • 항로관제
S 2~4GHz	2,700~3,400MHz	• 거리해상도 중간 • 악천후 투과성 우수	• 중거리탐지 • 공항관제
C 4~8GHz	4,200~4,400MHz 5,250~5,925MHz	• 준수한 전천후 성능 및 거리분 해능	• 장거리추적 • 기상관측
X 8~12GHz	8.5~10.68GHz	• 거리해상도 우수 • 강우감쇠 영향 있음	• 단거리추적 • 해상관제
Ku 12~18GHz	13.4~14GHz 15.4~17.2GHz	• 더 높은 거리 해상도 • 악천후 취약	• 고해상도 이미징
K 18~27GHz	24.05~24.2GHz	• 수증기에 의한 감쇠 높음	• 특정용도 외 사용 제한적
Ka 27~40GHz	33.4~40GHz	• 매우 높은 거리 • 분해능	• 초고해상도 이미징

는 레이다 주파수 대역별 특성과 주요 용도는 표 1과 같다[1,2].

일반적으로 L · S-대역과 같이 낮은 주파수 대역은 전파전파(Radio Propagation) 감쇠가 적어 장거리 탐지에 유리하므로 광역감시 및 조기경보 체계에 주로 사용된다. 반면, X-대역 이상의 높은 주파수 대역은 파장이 짧아 높은 분해능을 얻을 수 있고 안테나 소형화가 용이하여, 표적의 정밀 추적, 식별 및 영상화가 요구되는 분야에 집중적으로 활용되는 경향을 보인다.

2. 분야별 공공용 레이다 운용 현황

대한민국은 세계적으로도 높은 인구 밀도와 복잡한 산업 구조를 가지고 있어, 공공 안전과 국방을 위

한 레이다 운용 밀도가 매우 높은 국가이다.

2.1 공공 분야

공공 분야 레이다는 국민의 생명과 재산을 보호하고 사회 인프라를 효율적으로 관리하는 것을 최우선 목표로 운용된다.

- 기상 관측:** 기상청과 홍수통제소는 태풍, 집중 호우와 같은 위험 기상 현상을 24시간 감시하고, 국지성 돌발 강우를 정밀하게 예측하기 위한 조기 경보 체계 구축을 목표로 전국적인 관측망이 운용되고 있다[3].

- 항공 교통 관제:** 국토교통부와 각 공항공사는 공항 및 접근 항로 내 항공기의 안전한 이착륙과 효율적인 운항을 지원하기 위해 공항 주변과 지상 이동 영역에 대한 정밀 감시 및 관제 인프라를 구축하여 운용한다.

- 해상 감시 및 안전:** 복잡한 해안선과 높은 선박 통행량을 가진 국내 항만 및 연안 환경에서 선박의 충돌을 예방하고 해상 교통 흐름을 안전하게 관리하기 위한 목적으로 춤춤한 감시 시스템이 운용되고 있다.

2.2 국방 분야

국방 분야 레이다는 적의 위협을 사전에 탐지하고 아군의 생존성을 보장하며, 정밀 타격을 지원하는 군사작전의 핵심 감시정찰 자산으로 운용된다.

- 방공 및 조기경보:** 공군은 탄도탄 탐지를 위한 그린파인 및 슈퍼 그린파인 레이다(L-대역)와 E-737 항공통제기(피스아이)의 다기능 위상배열 레이다 등을 통해 한반도 전역과 그 주변을 감시하는 다층적 조기경보 체계를 갖추고 있다.

- 감시 및 추적:** 각 군은 국지 방공을 위한 저고도 탐지 레이다, 해안 및 GOP 경계를 위한 지상감시레이다, 함정에 탑재되어 대함 · 대공

표적을 탐지 · 추적하는 다기능 레이다(S · X-대역), 그리고 KF-21, F-35 등 최신 전투기에 탑재된 AESA 레이다에 이르기까지 임무에 특화된 다양한 레이다를 운용한다.

- 표적 획득 및 사격 통제:** 육군은 적 포병의 발사 위치를 역추적하는 대포병탐지레이다, 해군은 함포 및 유도탄의 사격 통제를 위한 추적 레이다를 운용하여 정밀 타격 능력을 뒷받침 한다.

3. 요구 사항, 주요 성과 및 당면 과제

공공과 국방 분야를 막론하고 레이다 시스템에 대한 요구사항은 점차 고도화되고 있다. 단순 탐지를 넘어 표적의 종류를 식별(Classification)하고, 여러 표적을 동시에 정밀 추적하며, 전파 혼 · 간섭 환경에서도 신뢰성 있는 성능을 유지하는 것이 핵심 요구사항으로 부상하고 있다.

이러한 요구에 부응하여, 국내에서는 기상청의 이중편파레이다망 구축 완료와 같은 주요 성과와 더불어, LIG넥스원, 한화시스템 등 방산업체를 중심으로 전투기용 AESA 레이다, 장거리 지대공 유도무기용 다기능 레이다 등 최첨단 레이다의 국산화에 성공하는 괄목할 만한 기술적 진보를 이루었다.

그러나 이러한 레이다 운용의 양적, 질적 팽창은 당면 과제를 야기하고 있다. 특히, 제한된 주파수 자원 내에서 다양한 목적의 레이다가 밀집 운용됨에 따라 시스템 간 전파간섭 문제가 심각한 위협으로 대두되고 있다. 또한, 고해상도 레이다가 생성하는 방대한 양의 데이터를 실시간으로 처리하고 유의미한 정보를 추출하기 위한 신호처리 기술의 부담이 가중되고 있으며, 이는 후술할 신호처리 및 자원 관리 기술의 개발 필요성으로 직결된다.

III. 공공 분야별 레이다 시스템 종류

국내 공공 분야에서 운용되는 레이다 시스템은 해당 분야의 고유한 임무목표와 운용환경에 따라 특화된 형태로 발전해 왔다. 항공, 해상, 기상 등 각 분야의 핵심적인 임무를 지원하는 대표적인 레이다 시스템의 종류와 기술적 특징은 다음과 같다.

1. 기상 관측 레이다

한반도의 복잡한 지형과 기후 특성은 정밀한 기상 관측의 중요성을 부각시키며, 이를 위해 다양한 종류의 기상 레이다가 활용되고 있다.

1.1 이중편파레이더(Dual-Polarization Radar)

이중편파레이더는 기존 단일편파 레이다가 수평 방향의 전자기파만을 송수신했던 것과 달리, 수평파와 수직파를 동시에 송수신하여 빗방울의 물리적 특성을 입체적으로 분석하는 기술이다. 수평파와 수직파의 반사도 차이, 위상차 등을 분석하여 빗방울의 크기와 모양을 추정할 수 있으며, 이를 통해 강우의 종류(비, 눈, 우박 등)를 정밀하게 구분하고 강수량을 더욱 정확하게 예측할 수 있다. 기상청은 2013년부터 전국의 S-대역 기상 레이다를 이중편파레이더로 교체 완료하여 광역 기상 감시 능력을 고도화했으며, 최근에는 수도권 등 인구 밀집 지역의 국지성 돌발 호우를 정밀하게 탐지하기 위해 X-대역 이중편파레이더를 추가로 도입하여 레이다 관측망을 더욱 촘촘하게 구성하고 있다[3].

1.2 연직바람관측장비(Wind Profiler Radar)

연직바람관측장비는 지상에서 상공으로 전파를 발사하여 대기난류에 의해 산란되어 돌아오는 신호의 도플러 편이를 분석, 고도별 바람의 방향과 세기

를 실시간으로 관측하는 장비이다. VHF · UHF 대역을 주로 사용하며, 공항 주변에 설치되어 항공기 이착륙 시 위험 요소인 급변풍(Wind Shear) 탐지에 핵심적인 역할을 수행한다. 또한, 고층 대기의 상세한 바람 정보는 수치 예보 모델의 정확도를 향상시키는 중요한 입력 자료로 활용된다.

2. 항공 감시 레이다

항공 감시 레이다는 공항과 항공로상의 항공기 이동을 정밀하게 탐지하고 관제하여 항공 교통의 안전과 효율을 보장하는 필수 인프라이다.

2.1 1차·2차 감시 레이다(PSR·SSR)

공항감시레이더(ASR: Airport Surveillance Radar)는 통상 1차 감시 레이다(PSR: Primary Surveillance Radar)와 2차 감시 레이다(SSR: Secondary Surveillance Radar)로 구성된다. PSR은 전파를 발사해 항공기 동체에서 반사되는 신호를 수신하여 항공기의 위치를 탐지하는 전통적인 방식의 비협조적 레이다이다. 반면, SSR은 항공기에 탑재된 트랜스폰더(Transponder)와 질의-응답 신호를 교환하여 항공기의 식별부호, 고도 등의 정보를 획득하는 협조적 시스템이다. 관제사는 두 레이다 정보를 융합하여 항공기를 관제한다.

2.2 공항지표면감시레이더(ASDE: Airport Surface Detection Equipment)

활주로와 유도로 등 공항 지표면의 항공기 및 차량 이동을 감시하는 고해상도 레이다이다. 특히 야간이나 안개 등 시정이 불량한 상황에서 관제사의 ‘눈’ 역할을 수행하며, 지상 충돌을 방지한다. 최근에는 X-대역 또는 Ku-대역의 고주파 레이다를 사용하여 높은 분해능을 확보하고, 다중 레이다와 연동하는 차세대 지상감시시스템(A-SMGCS: Advanced

Surface Movement Guidance and Control System)도 개발되고 있다[4].

2.3 정밀접근관제레이디(PAR)

악천후 시 조종사의 시계가 확보되지 않을 때, 항공기가 활주로에 안전하게 착륙할 수 있도록 수평 및 수직 방향의 정밀한 위치 정보를 제공하는 레이다이다. X-대역을 사용하여 매우 좁은 범폭으로 항공기를 추적하며, 관제사는 PAR 정보를 바탕으로 조종사에게 실시간으로 강하 경로를 지시한다.

반사 면적(RCS: 0.01~0.1m²)이 작고, 저고도 · 저속으로 비행하여 기존 방공 레이다로는 탐지가 매우 어렵다. 따라서 드론 탐지 레이다는 다음과 같은 특화된 기술을 적용한다.

- **고주파 대역 활용:** X-대역, Ku-대역 등 높은 주파수 대역을 사용하여 높은 분해능을 확보하고 작은 드론 표적을 탐지한다.
- **AESA 기술 적용:** 능동위상배열(AESA) 기술을 통해 좁은 범위를 특정 영역에 빠르게 스캔하여 다수의 소형 드론을 동시에 탐지하고 추적한다.
- **マイ크로-도플러 분석:** 드론의 프로펠러 회전에 의해 발생하는 고유한 마이크로-도플러 (Micro-Doppler) 시그니처를 분석하여 새와 드론을 구분하는 등 표적 식별률을 향상시키는 AI 기반 신호처리 기술이 핵심적으로 필요하다.

3. 해상 감시·관제 레이다

3.1 해상교통관제(VTS: Vessel Traffic Service) 레이다

항만 및 연안의 선박 통항 안전을 위해 설치되며, 선박의 위치, 침로, 속력 등의 정보를 수집하여 관제 센터에 제공한다. X-대역의 고해상도 레이다가 주로 사용되며, 복잡한 해안선과 다수의 선박이 밀집된 국내 항만 환경에 필수적인 시스템이다.

3.2 연안감시레이디

해군과 공공기관에서 운용하며, 우리 영해 내 미식별 선박의 침투나 불법 조업 등을 감시하기 위해 해안선과 주요 도서 지역에 설치된다. 해군 운용 해안 감시 레이다는 VTS 레이다보다 넓은 탐지 범위를 가지며, 야간 및 악천후에도 중단 없는 감시 임무를 수행한다.

4. 드론 탐지 레이다

최근 드론을 이용한 테러나 불법 촬영, 주요 시설 침투 등의 위협이 현실화되면서 드론 탐지 레이다의 중요성이 급격히 부각되고 있다. 드론은 레이다

5. 지대공 유도무기 레이다

한반도의 군사적 위협에 대응하기 위한 감시정찰 및 정밀 타격 체계의 핵심 자산으로, 북한의 탄도미사일 위협에 대응하기 위한 한국형 미사일방어체계(KAMD)의 ‘눈’으로서 표 2, 표 3처럼 다층 방어 레이다 체계가 구축되고 있다.

표 2 증거리 유도무기 레이다 체계 비교[5,6]

구분	천궁-I (M-SAM- I)	천궁-II (M-SAM- II)	천궁-III* (M-SAM- III)	페트리어트 (PAC-2/3)
유형	3차원 다기능 (MFR)	개량 3차원 다기능 (MFR)	차세대 3차원 다기능 (MFR)	다기능 위상배열
대역	X-대역	X-대역	X-대역	C-대역
안테나	PESA	AESA	AESA	PESA
출력관	TWT	SSPA	SSPA	TWT
요격고도	15~20km	20~30km	30~50km	20~30km
요격거리	40km	50km	100km	80km

* 천궁-III: 개발 중으로 개발 목표치

표 3 장거리 유도무기 레이다 체계 비교[7,8]

구분	L-SAM	L-SAM-II*	THAAD
유형	3차원 다기능 (MFR)	차세대 3차원 다기능(MFR)	조기경보 및 사격 통제 레이다
대역	S-대역	S-대역	X-대역
안테나	AESA	AESA	AESA
출력관	SSPA	SSPA	SSPA
요격고도	40~70km	50~100km	40~150km
요격거리	150km	200km 이상	200km 이상

* L-SAM-II: 개발 중으로 개발 목표치

6. 함정 탑재 레이다

SPY-1D, SPY-6 그리고 신형 FFX 레이다는 현대 해군 전투함의 생존성과 전투력을 좌우하는 ‘눈’에 해당하며 특징은 표 4와 같다. 특히 GaN AESA 기술의 등장은 함정 레이다의 성능을 비약적으로 발전 시켰다.

IV. 국내 공공용 레이다 핵심 기술 동향

최근 국내 공공용 레이다 기술은 단순히 표적을 탐지하는 수준을 넘어, 표적을 정밀하게 식별하고 주변 환경을 입체적으로 인지하는 ‘지능형 센서’로

표 4 함정 탑재 레이다 체계 비교[9-11]

구분	SPY-1D(V) [세종대왕급]	신형 FFX 다기능레이다	SPY-6(V1)
유형	3차원 위상배열	3차원 다기능 (MFR)	3차원 다기능 (AMDR)
대역	S-대역	S-대역	S-대역
안테나	PESA	AESA	AESA
출력관	TWT	SSPA	SSPA
탐지거리	320~370km	250~300km	400~460km
특징	이지스 시스템의 대명사	국내 독자 개발 통합마스트 AESA	SPY-1D 대비 15dBi 향상

진화하고 있다. 이러한 발전은 레이다 시스템을 구성하는 신호·파형, 안테나·송수신 및 신호처리·소프트웨어라는 세 가지 핵심 분야의 기술적 혁신이 유기적으로 결합한 결과이다. 본 장에서는 이 세 가지 분야를 중심으로 국내외 기술 동향을 심도 있게 분석한다.

1. 레이다 신호 및 파형 기술

레이이다의 성능을 결정하는 가장 근본적인 요소는 송신하는 전파, 즉 신호 및 파형 기술이다. 표적의 탐지 능력은 신호의 에너지에, 분해능은 신호의 대역폭에, 속도 측정 정밀도는 신호의 안정성에 의해 좌우된다. 최근 기술 동향은 높은 분해능을 확보하고, 복잡한 전파 환경에 능동적으로 대응하는 방향으로 전개되고 있으며, 이는 기본적인 파형을 응용하고 복합화하는 기술에 기반한다. 대표적 레이다 파형은 그림 1과 같다.

1.1 기본 파형의 원리 및 특성

- CW(Continuous Wave) 신호: CW는 주파수

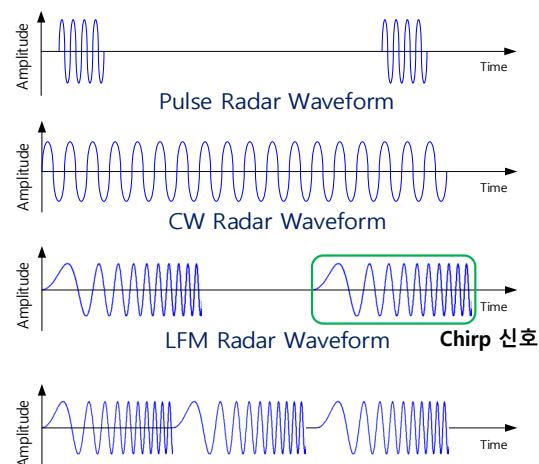


그림 1 레이다 파형

나 진폭의 변조 없이 일정한 주파수의 정현파를 지속해서 송신하는 가장 간단한 형태의 신호이다. 움직이는 표적에 의해 반사된 신호는 도플러 효과(Doppler Effect)에 의해 주파수가 천이되므로, 송신 신호와 수신 신호의 주파수 차이를 측정하여 표적의 시선 속도를 매우 정밀하게 알아낼 수 있다. 하지만, 신호에 시간적 표지(Timing Mark)가 없어 표적까지의 거리를 직접 측정할 수는 없다. 구조가 간단하여 과속 단속 등 단일 목적의 속도 측정에 주로 사용된다.

- **Pulse-CW 신호:** CW 신호를 짧은 시간 동안만 펄스 방식으로 발사하는 신호이다. 펄스가 송신된 후 표적에 반사되어 돌아오기까지의 왕복시간(Time of Flight)을 측정하여 거리를 '(빛의 속도 × 왕복시간) / 2' 식으로 산출한다. 하지만 이 방식은 '탐지거리'와 '거리분해능' 사이에 근본적인 상충관계(Trade-off)를 가진다. 높은 탐지거리를 위해 펄스의 길이(에너지)를 늘리면, 그만큼 거리분해능이 나빠져 가까이 있는 두 표적을 구분할 수 없게 된다. 반대로 분해능을 높이기 위해 펄스길이를 줄이면 에너지가 감소하여 탐지거리가 짧아지는 딜레마에 빠진다.

1.2 펄스압축을 이용한 고성능 파형 기술

단순 펄스의 한계를 극복하기 위한 핵심이 펄스 압축이다. 송신 시 에너지를 확보하기 위해 펄스의 길이를 충분히 길게 하되, 펄스 내부에 주파수나 위상 변조하는 방식이다. 수신단에서는 변조 특성을 이용한 신호처리를 통해 시간적으로 매우 짧은 펄스로 압축함으로써 높은 거리분해능을 얻는다. 즉, 펄스압축 기술은 탐지거리와 거리분해능이라는 상충관계를 동시에 만족시키는 핵심적 파형 기술로 다음과 같이 구분된다[12,13].

- **FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 신호:** CW 신호의 주파수를 시간에 따라 톱니파나 삼각파 형태로 선형적으로 변조(Sweep)하면서 연속적으로 송신하는 방식이다. 수신된 신호는 송신 파형을 유지하므로, 현재 송신되고 있는 신호와의 주파수 차이(Beat Frequency)가 발생한다. 이 주파수 차이는 신호의 왕복시간에 비례하므로, 이를 통해 표적까지의 거리를 정밀하게 측정할 수 있다. CW의 장점인 정밀한 속도 측정과 펄스 레이다의 장점인 거리 측정을 동시에 만족시키며, 낮은 송신 출력으로도 높은 성능을 낼 수 있어 드론 탐지 레이다, 차량용 레이다 등에서 널리 사용되는 방식 중 하나이다.
- **Pulse-FM 신호:** 청(Chirp) 신호라고도 불리며, 긴 펄스 시간 동안 주파수를 선형적·비선형적으로 증가 또는 감소시킨다. 수신단에서는 이 주파수 변화 패턴을 정합필터(Matched Filter)를 통과시켜 넓게 퍼져 있던 신호 에너지를 시간적으로 압축 처리한다. 이 압축된 펄스의 폭이 실질적인 거리분해능을 결정하므로, 긴 펄스를 사용하면서도 수 m 수준의 높은 분해능을 얻을 수 있다. LFM(Linear Frequency Modulation)은 구현이 비교적 용이하고 도플러 편이에 강인한 특성이 있어, 탐지 레이다, 합성 개구 레이다(SAR: Synthetic-Aperture Radar) 등 고성능을 요구하는 대부분의 현대 레이다 시스템에서 기본 파형으로 사용된다.
- **위상 코딩(Phase Coding) 신호:** 긴 펄스를 여러 개의 짧은 시간 단위(Chip)으로 나누고 각 단위의 위상(Phase)을 특정 코드에 따라 0° 또는 180° 로 변조한다. 자기상관(Autocorrelation) 특성이 우수한 바커 코드(Barker Codes)가 대표적이다. 수신단에서는 송신 시 사용된 코드와 동

일한 패턴을 가진 정합필터를 사용하여 상관 관계를 계산하며, 정확한 코드 패턴이 입력될 때만 매우 뾰족한 형태의 압축된 펄스 출력을 얻는다. 위상 코딩 방식은 LFM보다 낮은 거리 부엽(Sidelobe) 특성을 가질 수 있어 원치 않는 허상(Ghost) 표적을 억제하는데 유리하며, 코드 자체를 암호처럼 사용할 수 있어 보안성이 높다는 장점이 있다. 바커 코드 외에도 더 긴 코드를 생성할 수 있는 다위상(Polyphase) 코드나 의사잡음(PN: Pseudo Noise) 시퀀스 등이 군용 레이다나 높은 수준의 보안이 요구되는 시스템에 적용되고 있다.

1.3 적응형 파형 기술과 인지 레이다

공공용 레이다의 수요 증가와 광대역화에 따라 전파 환경은 점점 더 복잡해지고 있다. 인지 레이다 (Cognitive Radar)는 이러한 환경 변화를 레이다 스스로 ‘인지’하고, 실시간으로 최적의 파형을 선택하거나 생성하여 송신하는 지능형 레이다 기술이다. 예를 들어, 특정 주파수 대역에 강한 간섭 신호가 감지되면 해당 대역을 회피하는 노치(Notch)를 파형에 형성하거나, 탐지된 표적의 특성에 맞춰 분해능을 높이는 파형으로 순간적으로 변경하는 방식이다. 이는 AI 기술과 결합하여 레이다의 성능을 극대화하고 주파수 이용효율을 높이는 궁극적인 파형 기술의 발전 방향이라 할 수 있다[14].

2. 레이다 안테나 및 송수신 기술

안테나 및 송수신 기술은 레이다의 탐지거리, 정확도, 크기를 결정하는 하드웨어의 핵심이다. 기계식 안테나에서 능동위상배열(AESA)로의 전환과 질화갈륨(GaN) 반도체의 등장은 레이다 하드웨어의 패러다임을 바꾸고 있다[15].

2.1 AESA 기술의 보편화

과거의 레이다가 단일 송수신기와 대형 안테나를 기계적으로 회전시켜 빔을 조향했던 것과 달리, 능동위상배열 레이다는 수백~수천 개의 작은 송수신 통합 모듈(TRM: Transmit-Receive Module)이 배열된 평면 안테나를 사용한다. 각 모듈의 위상을 전자적으로 제어하여 빔을 초고속으로 조향(Beam Steering) 할 수 있다. AESA 기술은 ▲다수의 표적을 동시 추적하고(Multi-Target Tracking) ▲특정 영역을 집중 탐색하는 등(Track-while-Scan) 다기능을 소프트웨어적으로 구현 가능하며 ▲일부 모듈이 고장 나도 전체 성능이 점진적으로 저하되어 신뢰성이 높다. 국방 분야에서 시작된 이 기술은 최근 드론탐지 등 다수의 표적을 신속하게 탐지해야 하는 공공 분야로 빠르게 확산되고 있다.

2.2 GaN 반도체를 통한 고출력·고효율

AESA 레이다의 성능을 좌우하는 핵심 부품은 송수신 모듈 내의 전력증폭기(Amplifier)이다. 기존의 갈륨비소(GaAs) 반도체에 비해 질화갈륨(GaN) 반도체는 더 높은 전압에서 동작하고 열전도성이 뛰어나, 동일 크기에서 훨씬 높은 출력과 효율을 낼 수 있다. 이는 레이다의 탐지거리를 획기적으로 늘리고, 전력 소모와 발열을 줄여 레이다 시스템 전체의 소형·경량화를 가능하게 한다. 국내에서는 천궁-II, FFX Batch-III 레이다 등 국방용 AESA 레이다에 GaN 소자를 성공적으로 적용한 경험을 바탕으로, 공공 분야에서도 고성능·소형 레이다 개발에 GaN 기술이 적극적으로 활용되고 있다.

2.3 디지털 빙포밍(DBF)

최신 AESA 기술은 아날로그 단에서 빔을 합성하던 것을 넘어, 안테나의 각 소자 또는 서브어레이(Sub-Array) 단위에서 수신 신호를 바로 디지털로 변

활하는 디지털 범포밍(DBF: Digital Beamforming)으로 발전하고 있다. DBF는 동시에 여러 방향으로 다수의 범을 형성하거나, 특정 방향에서 들어오는 간섭 신호만을 선택적으로 제거하는 등 아날로그 범포밍으로는 불가능했던 유연하고 강력한 신호처리를 가능하게 한다.

3. 레이다 신호처리 및 소프트웨어 기술

레이이다 시스템이 수신하는 원시 데이터(Raw Data)는 수많은 잡음과 클러터, 간섭 신호가 혼재된 복잡한 전기적 신호에 불과하다. 신호처리 기술은 이러한 원시 데이터로부터 표적의 유무, 거리, 속도, 각도 등 유의미한 정보를 추출하여 레이다의 최종 성능을 결정하는 핵심적인 과정이다. 최근 고분해능, 다기능 레이다의 등장은 처리해야 할 데이터의 양과 복잡성을 기하급수적으로 증가시켰으며, 이를 효율적으로 처리하기 위한 소프트웨어 기술의 중요성이 그 어느 때보다 주목받고 있다. 그림 2는 공공용 레이다 대표적 기술 진화 단계를 보여준다.

3.1 핵심 신호처리 기술의 고도화

현대 레이다의 신호처리 과정은 크게 펄스압축,

도플러 처리, 그리고 표적탐지의 단계로 구성되며, 각 단계는 고도의 연산 기술을 요구한다.

- **펄스압축(Pulse Compression):** 앞 절에서 기술한 LFM이나 위상코딩 파형을 사용하는 레이다의 첫 번째 신호처리 단계는 정합 필터링(Matched Filtering)을 통한 펄스압축이다. 이는 수신된 긴 펄스 신호와 송신파형의 복제본 간의 상호상관(Cross-Correlation) 연산을 수행하는 과정으로, 신호대잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)를 극대화하면서 넓게 퍼진 신호 에너지를 시간적으로 매우 좁은 영역에 집중시킨다. 이 과정을 통해 레이다는 높은 거리분해능과 우수한 탐지성능을 동시에 확보하게 된다.
- **도플러 처리(Doppler Processing):** 연속적으로 수신되는 펄스 신호들에 대해 고속 푸리에 변환(FFT: Fast Fourier Transform) 적용하여 표적의 도플러 주파수 편이를 추출하는 과정이다. 이 결과를 통해 표적의 시선 속도를 정밀하게 계산할 수 있으며, 정지된 클러터(제로-도플러)와 움직이는 표적을 효과적으로 분리할 수 있다. 펄스 압축과 도플러 처리를 거치면 거리-도플러 맵(Range-Doppler Map)이라는 2차원 데이터



그림 2 공공용 레이다 기술 진화

행렬이 생성되며, 이는 레이다 신호처리의 가장 기본적인 결과물이다.

- **CFAR(Constant False Alarm Rate) 탐지:** 거리-도플러 맵에서 표적을 최종적으로 탐지하는 알고리즘이다. 배경 잡음이나 클러터의 레벨이 일정하지 않은 실제 환경에서 단순히 고정된 문턱값(Threshold)을 사용하면 오경보가 급증하게 된다. CFAR는 탐지를 원하는 특정 셀(Cell- Under-Test) 주변의 잡음 레벨을 통계적으로 추정하고, 이를 기반으로 적응적인 문턱값을 설정하여 항상 일정한 수준의 오경보율을 유지하는 기술이다. CA-CFAR (Cell-Averaging), GO-CFAR(Greatest-Of), SO-CFAR(Smallest-Of) 등 다양한 방식이 환경 특성에 맞게 적용된다[17].

3.2 클러터·간섭 저감 및 환경 적응 기술

복잡한 도심이나 산악 지형에서 운용되는 공공 레이다는 고정된 클러터 외에도 바람에 흔들리는 나뭇잎, 파도 등 시시각각 변하는 동적 클러터(Dynamic Clutter)와 타 시스템에 의한 간섭 신호에 직면한다.

- **MTI&MTD(Moving Target Indication·Detection):** MTI는 연속된 펄스 간의 위상 변화를 이용하여 정지 클러터 신호를 제거하는 고전적인 필터링 기법이다. MTD는 여기에도 플러필터 뱅크를 결합하여 특정 속도 대역의 표적만 선택적으로 탐지하고, 클러터의 통계적 특성을 분석하여 탐지 문턱값을 최적화하는 한 단계 발전된 기술이다.
- **STAP(Space-Time Adaptive Processing):** AESA와 같은 배열안테나를 사용하는 레이다를 위한 고도의 클러터 제거 기술이다. 이동하는 플랫폼에 탑재된 레이다는 정지된 지형 클

러터라도 상대적인 움직임 때문에 도플러 주파수를 갖게 되어 MTD만으로는 제거가 어렵다. STAP는 안테나의 공간채널(Space Domain)과 펄스열의 시간채널(Time Domain) 정보를 함께 사용하여 클러터의 시공간적 특성을 분석하고, 이를 제거하는 2차원 적응 필터를 설계하여 클러터 속에서도 저속 표적을 탐지하는 능력을 극대화한다[16].

3.3 소프트웨어 정의 레이다 플랫폼의 등장

과거 레이다의 신호처리 기능은 특정 연산을 위해 설계된 주문형 반도체(ASIC)나 고정된 회로로 구현되어 유연성이 떨어졌다. 소프트웨어 정의 레이다(SDR: Software-Defined Radar)는 파형 생성, 수신, 신호처리 등 레이다의 핵심 기능을 범용 프로세서 (FPGA, GPU, DSP 등) 상에 소프트웨어로 구현하는 플랫폼 기술을 의미한다.

SDR 플랫폼의 도입은 공공 레이다 기술에 다음과 같은 혁신을 가져올 것이다. 첫째, 유연성 및 확장성 극대화 가능하다. 하드웨어 변경 없이 소프트웨어 업데이트만으로 새로운 파형을 적용하거나, 개선된 신호처리 알고리즘을 탑재하여 레이다의 성능을 지속적으로 개량할 수 있다. 둘째, 개발 기간 및 비용이 단축 가능하다. 상용 기성품(COTS) 하드웨어를 활용하고 검증된 소프트웨어 모듈을 재사용함으로써 신규 레이다 시스템의 개발 및 프로토타이핑을 신속하게 진행할 수 있다. 셋째, 다기능성을 쉽게 구현할 수 있다. 동일한 하드웨어 플랫폼에서 소프트웨어 변경을 통해 표적탐지, 기상관측, 드론 탐지 등 다양한 임무 모드를 전환하며 운용하는 것이 가능해진다. 이러한 SDR 플랫폼은 향후 제한적인 AI 기반 인지 기술을 레이다에 통합하고 검증하기 위한 필수적인 기반을 제공할 것으로 예상된다[18].

V. 주파수자원 측면 고려사항 및 정책제언

앞 장에서 살펴보았듯이, 국내 공공용 레이다는 국민의 안전과 사회 인프라 고도화를 위해 양적, 질적으로 급격히 팽창하고 있다. 그러나 이러한 발전은 한정된 주파수라는 자원의 제약 속에서 이루어 지므로, 전파 간섭과 주파수 고갈이라는 새로운 도전 과제에 직면하게 되었다. 따라서 미래의 공공용 레이다 기술은 단순히 탐지 성능을 높이는 것을 넘어, 주어진 전파 환경 내에서 다른 시스템과 '공존'하고 주파수 자원을 효율적으로 활용하는 방향으로 진화해야 한다.

1. 공공용 레이다의 주파수자원 측면 고려 사항

공공용 레이다의 수요 증가는 필연적으로 주파수 사용 밀도를 높여 시스템 간 상호 간섭 가능성 증대시킨다. 난제를 해결하고 지속 가능한 레이다 기술 발전을 이루기 위한 기술적 고려 사항은 다음과 같다.

- **수동적 공존에서 능동적 간섭 저감으로:** 현재의 레이다 공존 기술은 주로 사용 대역을 분리하거나, 안테나의 부엽(Sidelobe)을 낮추고, 정교한 필터를 사용하여 원치 않는 신호를 차단하는 수동적인 방식에 머물러 있다. 그러나 미래에는 예측 불가능한 간섭 신호에 실시간으로 대응하는 능동적 간섭 저감 기술이 필수적이다. 수신 단에서 간섭 신호의 특성을 추정하여 디지털적으로 제거하는 간섭 제거 기술(Interference Cancellation)을 포함한다.
- **독점적 사용에서 효율적 공동사용으로:** 전통적인 주파수 관리는 특정 서비스에 특정 대역을 독점적으로 할당하는 방식이었으나, 이는

주파수 이용효율을 떨어뜨리는 원인이 된다. 이제는 시간과 공간, 주파수, 파형 등 다양한 영역에서 자원을 공유하는 레이다 주파수 공동사용(Spectrum Sharing) 패러다임으로의 전환이 필요하다.

- **고정된 기능에서 지능형 적응으로(인지 레이다):** 미래 레이다 기술 발전의 궁극적인 지향점은 인지 레이다이다. 인지 레이다는 전파 환경을 실시간으로 감지하고 분석(Sensing)하여, 현재 상황에 가장 적합한 주파수 채널, 파형, 주파수, 대역폭, 송신 출력 등을 스스로 결정하고 재구성(Adapting)하는 지능형 시스템이다. 이는 단순히 성능을 높이는 것을 넘어, 타 레이다 시스템과의 충돌을 회피하고 비어 있는 자원을 찾아 활용함으로써 주파수 이용효율을 극대화 한다. 즉, 인지 레이다는 주파수 공동사용 환경을 위한 핵심 기술로서, 레이다의 생존성과 운용 효율을 획기적으로 향상시키는 열쇠가 될 것이다.

2. 국내 공공용 레이다의 정책적 제언

상술한 기술적 발전 방향을 성공적으로 구현하고 국내 공공 레이다 산업 생태계를 강화하기 위해서는 기술 개발과 발맞춘 체계적인 정책적 지원이 필수적이다.

- **선제적 공공 주파수 분배 및 관리 정책 수립:** 현재의 고정 할당 방식에서 벗어나 주파수 공동사용 기술을 제도적으로 뒷받침하는 유연한 주파수 관리 정책으로의 전환이 시급하다.
- **'공공용 레이다 주파수 통합 관리 체계' 구축:** 각 부처(국토부, 기상청, 해경청 등)에서 운용 중인 공공용 레이다의 위치, 주파수, 출력, 운용 시간 등 상세 정보를 포함하는 통합 데이터베

이스를 구축해야 한다. 이는 신규 레이다 도입 시 간접 여부를 사전에 정밀하게 분석하고, 주파수 공동사용을 위한 기반 자료로 활용될 수 있다. 특정 조건에서 사용되지 않는 주파수 대역을 다른 레이다 시스템이 일시적으로 사용 할 수 있도록 허용하는 동적 주파수 접속 제도의 시범 도입을 검토할 필요가 있다.

- **주파수 공동사용을 위한 기술기준 및 표준화 선도:** 신기술이 시장에 원활히 도입되기 위해선 명확한 기술기준이 선행되어야 한다. 기준의 기술기준이 송신출력, 불요발사 등 '주는 영향'에 초점을 맞추었다면, 향후에는 일정 수준의 간접 환경에서도 성능을 유지해야 하는 '받는 영향', 즉 간접 회피 및 내성(Tolerance) 능력을 규정하는 방향으로 개정되어야 한다. 주파수 공동사용 환경에서 레이다들이 서로의 운용 정보를 교환하여 충돌을 피할 수 있도록 표준화된 프로토콜의 연구 및 개발을 지원해야 한다.
- **'공공 레이다 실증 테스트베드' 구축 및 운영:** 인지 레이다, 주파수 공동사용과 같은 첨단 기술은 실제 전파 환경에서의 검증이 무엇보다 중요하다. 다양한 공공 레이다 시스템들이 공존하는 복합적인 실제 전파 환경을 모사하는 테스트베드를 구축해야 한다.

VI. 결론

국내 공공용 레이다 기술은 핵심 기술의 내재화와 시스템 고도화를 통해 양적, 질적 성장을 동시에 이루며 기술적 성숙 단계에 진입했다. 기술 발전의 핵심 축은 기계식 회전 방식에서 전자주사식 능동 위상배열(AESA) 기술로의 전환이 보편화된 것이다. 이는 다수의 표적을 동시 추적하는 다기능성을 확

보하고 시스템 반응 시간을 단축시켰다. 특히 질화 갈륨(GaN) 반도체의 성공적 적용은 송수신 모듈의 출력과 효율을 극대화하여, 레이다 시스템의 소형화와 탐지거리 증대를 동시에 달성하는 핵심 동력이 되었다. 하드웨어의 발전과 함께 신호처리 및 운용 방식 또한 소프트웨어 정의 레이다(SDR) 플랫폼으로 연구개발이 진행되고 있으며, 이는 하드웨어 변경 없이도 지속적인 성능 개선과 기능 확장을 가능하게 하는 기반을 제공할 수 있다.

그러나 이러한 기술적 성취와 레이다 운용의 양적 팽창은 한정된 주파수 자원의 제약과 시스템 간 간접 심화라는 새로운 과제에 직면하게 했다. 따라서 기존의 고정된 주파수 할당 방식에서 벗어나 주파수 공동사용을 통해 주파수자원의 이용효율을 극대화하는 방향으로의 정책적, 기술적 전환이 시급하다. 이를 위해 핵심 부품 및 소재 기술의 자립도를 높이는 한편, 복잡한 전파환경에서도 안정적인 성능을 보장하는 간접저감기술 개발과 이를 뒷받침할 제도적 기반 마련이 병행되어야 한다.

결론적으로, 국내 공공용 레이다는 개별 시스템의 성능 고도화를 넘어, 제한된 자원 내에서 타 시스템과 효율적으로 공존하는 단계로 나아가야 한다. 핵심 하드웨어 기술의 경쟁력을 유지하고, 주파수 공동사용 환경에 최적화된 기술 개발과 정책적 지원을 유기적으로 결합할 때, 미래 위협에 효과적으로 대응하는 핵심 감시 자산으로서 그 역할을 더욱 공고히 할 수 있을 것이다.

용어해설

RADAR(Radio Detection And Ranging) 전파를 사용하여 물체를 탐지하고 거리, 방향, 속도 및 기타 특성을 측정하는 시스템. 전파를 발사하고 물체에서 반사되는 "반향"을 감지하여 이를 처리하여 대상에 대한 정보를 획득

AESA Radar 수백 또는 수천 개의 소형 송신·수신(T·R) 모듈 배열을 사용하여 전자파 빔을 전자적으로 조종하여 여러 대상 추적, 매팅 및 감시와 같은 여러 기능을 동시에 수행할 수 있는 레이다

참고문헌

- [1] ITU-R, "Radio Regulations, Article 5: Frequency Allocations," Edition of 2020.
- [2] 과학기술정보통신부고시 제2024-44호, "대한민국 주파수 분배표," 2025. 2. 17.
- [3] <https://www.kma.go.kr/kma/org/introduce.jsp>
- [4] ETSI EN 303 213-6, "Advanced Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS)"
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/M-SAM>
- [6] <https://missiledefenseadvocacy.org/defense-systems/anmpq-5365-radar/>
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/L-SAM>
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Terminal_High_Altitude_Area_Defense
- [9] <https://namu.wiki/w/%EB%85%84%EC%9D%98%EC%9D%98%20%ED%95%91%EC%8A%A4>
- [10] <https://ko.wikipedia.org/wiki/AN/SPY-1>
- [11] <https://ko.wikipedia.org/wiki/AN/SPY-6>
- [12] M. A. Richards, "Fundamentals of Radar Signal Processing," 2nd ed., McGraw-Hill Education, 2014.
- [13] M. I. Skolnik, "Radar Handbook," 3rd ed., McGraw-Hill Education, 2008.
- [14] S.Z. Gurbuz et al., "An Overview of Cognitive Radar: Past, Present, and Future," IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag., vol. 34, no. 12, 2019, pp. 6-18.
- [15] E. Brookner, "Phased-array and radar breakthroughs," in Proc. IEEE Radar Conf., (Waltham, MA, USA), Apr. 2007, pp. 37-42.
- [16] J. Ward, "Space-time adaptive processing for airborne radar," MIT Lincoln Lab. Tech. Rep., Dec 13th, 1994.
- [17] R. Sor et al., "OS-CFAR Based on Thresholding Approaches for Target Detection," in Proc. Int. Conf. Comput. Commun. Control Autom., (Pune, India), Aug. 2018, pp. 1-6.
- [18] T. Debatty, "Software defined RADAR a state of the art," in Proc. Int. Workshop Cogn. Inf. Process., (Elba, Italy), Jun. 2010, pp. 253-257.