

전자전용 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 시스템 개발

Development of Wide-Band Planar Active Array Antenna System for Electronic Warfare

김재덕 · 조상왕 · 최삼열 · 김두환 · 박희준 · 김동희 · 이왕용 · 김인선* · 이창훈*

Jae-Duk Kim · Sang-Wang Cho · Sam Yeul Choi · Doo Hwan Kim · Heui Jun Park ·

Dong Hee Kim · Wang Yong Lee · In Seon Kim* · Chang Hoon Lee*

요 약

본 논문에서는 전자전용 재밍 송신기에 사용하기 위해서 개발된 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 시스템의 설계 및 제작 그리고 측정 결과를 소개한다. 설계된 시스템은 45° slant 광대역 복사소자를 8×8 삼각 배열 구조로 배치하고, 광대역 GaN 반도체 고출력 증폭기와 GaAs 다기능집적회로(MFC)를 적용한 64개의 송신 채널을 구성하여 개발하였다. GaAs다기능집적회로는 광대역에서 빔 편이 현상을 피하기 위한 실시간 지연소자, 디지털 감쇠기 그리고 GaAs 구동증폭기를 포함하고 있어서 송신 빔 조향을 할 수 있으며, 시스템의 전자적 빔 조향 범위는 방위각/고각 방향으로 각각 $\pm 45^\circ / \pm 25^\circ$ 범위에서 가능하다. 개발된 시스템의 송신 빔 패턴 성능을 확인하기 위해 근접 전계 시험 시설을 이용하였다. 전자전용 송신 시스템 빔 패턴 측정 결과, 시스템의 유효방사출력은 목표성능(P) 대비 최대 9.8 dB 이상을 만족하였고, 방위각/고각 방향으로 각각 $\pm 45^\circ / \pm 25^\circ$ 빔 조향 결과 요구성능에 만족함을 확인하였다.

Abstract

This paper describes the development and measurement results of a wide-band planar active phase array antenna system for an electronic warfare jamming transmitter. The system is designed as an 8×8 triangular lattice array using a 45° slant wide-band antenna. The 64-element transmission channel is composed of a wide-band gallium nitride(GaN) solid state power amplifier and a gallium arsenide(GaAs) multi-function core chip(MFC). Each GaAs MFC includes a true-time delay circuit to avoid a wide-band beam squint, a digital attenuator, and a GaAs drive amplifier to electronically steer the transmitted beam over a $\pm 45^\circ$ azimuth angle and $\pm 25^\circ$ elevation angle scan. Measurement of the transmitted beam pattern is conducted using a near-field measurement facility. The EIRP of the designed system, which is 9.8 dB more than the target EIRP performance(P), and the $\pm 45^\circ$ azimuth and $\pm 25^\circ$ elevation beam steering fulfill the desired specifications.

Key words: Electronic Warfare, Wide-Band Planar Active Phased Array Antenna, Near-Field Measurement, MFC, Beam Squint

I. 서 론

최근 전자전 재밍 송신 시스템은 전장운용 환경에서

「이 연구는 국방과학연구소의 지원으로 연구되었음.」

LIG넥스원 전자전연구소(Electronic Warfare R&D Lab., LIG Nex1 Co., Ltd.)

*국방과학연구소(ADD) 제2기술본부(The 2nd R&D Institute, ADD)

· Manuscript received March 21, 2019 ; Revised May 15, 2019 ; Accepted May 28, 2019. (ID No. 20190321-026)

· Corresponding Author: Jae-Duk Kim (e-mail: jaeduk.kim@lignex1.com)

빠른 동작 속도와 정밀 빔 조향으로 적의 초고주파 탐색기 및 레이더와 같은 RF 위협에 대응 가능한 전자교란용 광대역 송신기로 개발되고 있으며, 일정한 예열시간과 고전압 전원공급기가 적용된 기존의 진행파관(TWT) 광대역 고출력 증폭기는 예열시간이 필요 없고 저전압 전원공급기가 적용된 GaN 반도체 소자 광대역 고출력 증폭기로 대체 개발되는 추세이다.

재밍 신호를 송신하는 안테나는 수동형 안테나에서 능동위상배열 안테나로 개발되고 있다. 능동위상배열 안테나의 구조 또한 방위각 또는 고각 방향 중 한 방향의 빔 조향만 가능한 1차원 선 배열에서 방위각 고각 양 방향 모두 정밀 빔 조향이 가능한 2차원 평면형 배열로, 아날로그 빔 조향 회로를 통한 빔을 조향하는 수동 위상 배열 안테나(passive electronically steering antenna: PESA) 방식에서 일부 모듈의 고장이 발생하더라도 전체 시스템에는 큰 영향이 없고(graceful degradation), 개별 배열의 크기/위상을 변화시켜 다양한 빔 형성 및 조향이 가능한 능동위상배열 안테나(active electronically steering antenna: AESA)로 발전하고 있다^{[1]~[3]}.

본 논문에서는 미래 전장 운용환경에서 광대역(C~Ku band) 다중표적의 동시 교전 전자교란 및 원거리 지원 재밍을 위해 높은 유효방사출력(effective isotropic radiated power: EIRP) 성능으로 개발된 전자전용 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 시스템의 설계 과정 및 시뮬레이션을 통한 성능 예측결과를 소개한다. 또한 개발된 시스템의 성능검증을 위해 근접 전계시설을 사용한 시험 구성을 살펴보고, 송신파턴 측정을 통해 광대역 3:1 대역폭(f_{\min} : $f_{\max}=1:3$)에서 개발 요구 성능 만족함을 확인한다.

II. 광대역 복사소자 및 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 설계 및 결과

설계된 광대역 평면형 능동위상배열 안테나는 45° slant 광대역 복사소자를 8×8 삼각배열 구조로 배치하였으며, 광대역 복사소자는 다음과 같은 사항을 고려하여 설계하였다. 그림 1과 같이 고출력 및 지속파에 대한 내성을 갖기 위하여 복사소자를 금속형 구조로 설계하였으며, GPO type의 커넥터를 적용하였다. 45° slant 복사소자 구조는 수직(V-pol)과 수평(H-pol) 편파 모두 송신이 가능

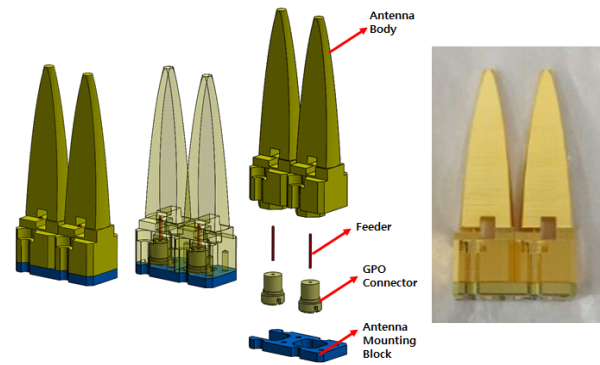


그림 1. 제작된 광대역 복사소자
Fig. 1. Manufactured wide-band antenna.

하도록 설계 적용하였다^[4].

또한, 배열 구조는 다음과 같은 사항을 고려하여 설계하였다. 광대역 능동 위상배열 안테나는 각 배열 복사소자의 위상을 조절하여 원하는 빔 조향 송신방향(θ_{\max})으로 크기가 최대가 되도록 설계하는데, 이는 배열구조 설계 시 각각의 배열 간의 거리(d), 주파수의 파장(λ)에 따라 달라진다. 또한 빔 조향 시 원하는 송신 방향 이외에 위상이 2π 의 배수가 되는 방향에서 각 배열의 송신 신호의 합이 최대가 되고, 이때 발생하는 빔을 그레이팅 로브(grating lobe)라고 한다. 이러한 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$d \leq \frac{\lambda_h}{1 + \sin \theta_{\max}} \quad (1)$$

θ_{\max} : 최대 빔조향각

λ_h : 대역내 최대주파수의 파장

시스템 설계 시 전자전용 재밍 송신 시스템에서는 광대역 주파수 영역에서 적의 위협 방향으로 빔 조향하여 재밍 송신이 가능해야 하므로 그레이팅 로브가 발생하지 않도록 2차원의 배열 간격을 고려해야 하기 때문에 최대 운용주파수(f_{\max})에 맞춰 배열 간격을 설정해야 하며, 요구된 전자적 빔 조향 범위는 방위각/고각 방향으로 각각 $\pm 45^\circ/\pm 25^\circ$ 이므로, 이론적으로 그레이팅 로브를 최소화하기 위한 사각배열의 간격을 도출하면 $dx_{\text{rect}}, dy_{\text{rect}} \leq 0.586 \lambda_h$ 이다. 그림 2와 같이 사각배열 구조와 삼각배열 구조에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 사각배열 적용

시 수평 수직 방향으로 grating lobe 영역이 발생하여 수평 수직 방향으로 조향 시 그레이팅 로브 발생이 최소화되는 장점이 있는 삼각배열구조를 시스템의 안테나 구조로 선정하였다. 설계된 광대역 평면형 능동위상배열 안테나는 삼각배열구조로 운용 주파수, 최대 빔 조향 방위각 $90^{\circ}(-45^{\circ} \sim 45^{\circ})$, 고각 $50^{\circ}(-25^{\circ} \sim 25^{\circ})$ 범위 내에서 45° slant 단 편파로 송신이 가능함을 시뮬레이션을 통해 확인하였으며, 빔 조향각 내에서 그레이팅 로브가 최소화되는 복사소자의 최적 삼각배열 간격은 최대운용주파수(f_{\max}) 기준으로 dx_{tri} 는 $0.84 \lambda_h$, dy_{tri} 는 $0.42 \lambda_h$ 임을 확인하였다.

시뮬레이션을 통해 예측된 최적 배열 간격을 적용하여 그림 3과 같이 45° slant 8×8 광대역 평면형 능동위상배열 안테나^[4]를 제작하였으며, 64개의 송신채널에 사용되는 복사소자 외 더미 복사소자를 구성하여 배열 송신 빔 패턴이 최적화되도록 설계하였다.

Ⅲ. 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 시스템 설계

광대역 평면형 능동위상배열 안테나 시스템은 그림 4와 같이 8×8 배열안테나와 배열 송신 빔 패턴 최적화를 위한 추가적인 더미안테나를 포함한 광대역 평면형 능동위상

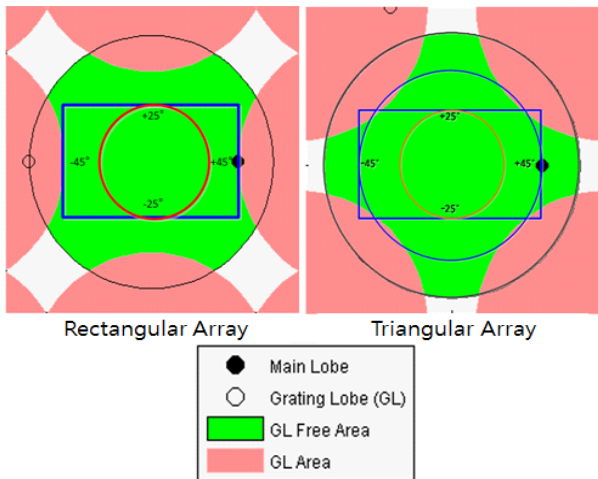


그림 2. 최대운용주파수(f_{\max})에서의 그레이팅 로브 발생 영역 시뮬레이션

Fig. 2. Grating lobe region simulation at f_{\max} .

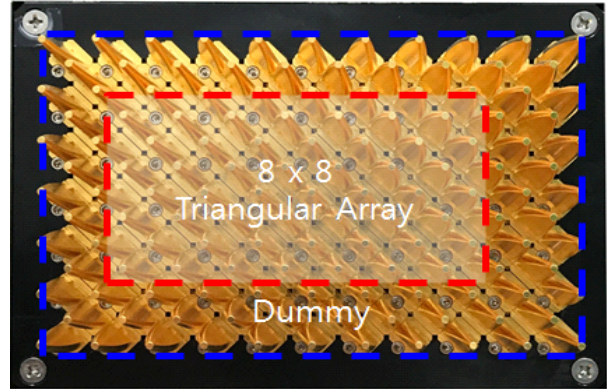


그림 3. 제작된 45° slant 8×8 광대역 평면형 능동위상배열 안테나

Fig. 3. Manufactured 45° slant 8×8 wide-band planar active array antenna.



그림 4. 제작된 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 시스템 형상

Fig. 4. Manufactured wide-band planar active phased array antenna system.

배열 안테나, 각각의 송신채널 내에 송신출력을 만족하는 GaN 반도체 고효율 증폭기와 크기/위상을 변화시켜 다양한 빔 조향을 수행하는 GaAs 다기능집적회로를 적용한 8채널의 고효율송신모듈 8개, 고효율 송신모듈 상·하부면에 각각 4 ch당 1개씩 적용된 빔 조향제어기 16개, 파형발생기에서 공급된 RF 신호를 고효율송신모듈 상·하부에 동일하게 분배하는 16 ch 광대역 분배기, 전원공급기, 시스템제어기로 구성된다. 개발된 GaN 반도체 고효율증폭기와 GaAs다기능집적회로는 수출제한(export licence)탈피를 위해 국내 자체개발하였다.

전자전 재밍 시스템은 그림 5와 같이 광대역 주파수 영역에서 적의 위협 방향으로 빔 조향하여 다중 신호, 다중

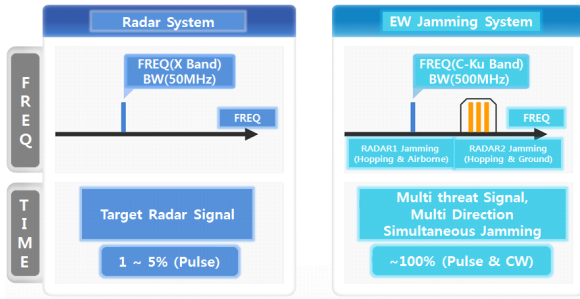


그림 5. 레이더 시스템과 전자전 재밍 시스템 RF module 비교
Fig. 5. Radar system versus EW jamming system RF module.

방향 재밍 송신이 가능해야 하고, 지속파(CW) 및 펄스(pulse)의 신호증폭에 문제가 없도록 설계해야 한다. 시스템의 고출력 송신모듈 내의 각각의 채널은 GaN 반도체 고출력 증폭기^[5]와 GaAs다기능집적회로^[6]를 가지고 있다. GaAs 다기능집적회로는 8-bit 실시간 지연소자와 7-bit 감쇠기 그리고 구동증폭기가 내장되어있어 송신 채널 내 크기/위상을 변화시키는 역할을 한다.

GaN 반도체 고출력증폭기는 펄스형태의 레이더 시스템에 적용 시 협대역/고출력/고효율에 특화시켜 설계/제작하나, 전자전 시스템에 고출력 증폭기 적용 시 광대역에서 고출력 성능과 제한된 단위면적 안에서 특히 지속파 신호 증폭 시 발생하는 열에 문제가 없도록 광대역/고출력/고효율로 설계해야 하므로 서로 상반 관계인 RF출력성능과 효율 성능의 최적화에 설계/제작에 어려움이 있다. 표 1과

표 1. 레이더 시스템과 전자전 재밍 시스템 고출력 증폭기 발열량 비교

Table 1. Radar system versus EW jamming system high power amplifier heating value.

	Radar system	EW jamming system	Comparison heating value
Frequency range	Narrow band	Wide band	
Power amplifier efficiency	20~40 % (AVG. 30 %)	10~20 % (AVG. 15 %)	×2
Duty	5 % (95 % power off)	100 %	×20
Planar array per active unit area	X-band (1)	Ku-band (0.25)	×4
Total heating value			×160

같이 전자전 재밍 시스템에 고출력 증폭기 적용 시 발열량에 대한 한계점과 단점에 대한 보완을 위해 시스템에 적용한 GaN 반도체 증폭기 설계/제작 시 높은 열전도도를 갖는 캐리어와 액체냉각 방식의 최적 방열구조로 설계하여 고출력송신모듈에 장착하였다.

GaAs 다기능집적회로는 광대역에서 원하는 방향으로 빔 조향하여 송신 시에 주파수 변화에 따라 발생하는 빔 편이 현상을 피하기 위해 8-bit의 실시간 지연소자를 적용하였다^[7]. 그림 6 에서 보는 바와 같이 시스템의 빔 지향 방향을 나타내는 방위각(azimuth, zx -plane)과 고각(elevation, yz -plane)은 구좌표계(θ , ϕ)를 사용하여 변환하였고, 변환된 (θ , ϕ)를 사용한 $m \times n$ 삼각배열에서의 시간 지연을 구하는 수식은 다음 식 (2)와 같다.

$$\Delta t = (m + 0.5 \cdot x_{off(n)}) (d_x / c) \sin \theta \cos \phi + (7 - n) (d_y / c) \sin \theta \sin \phi \quad (2)$$

c : speed of light

$x_{off(n)} = 1$ when $n = \text{odd}$,

$x_{off(n)} = 0$ when $n = \text{even}$

위의 식 (2)를 통해 계산한 결과, 시스템요구 최소 빔

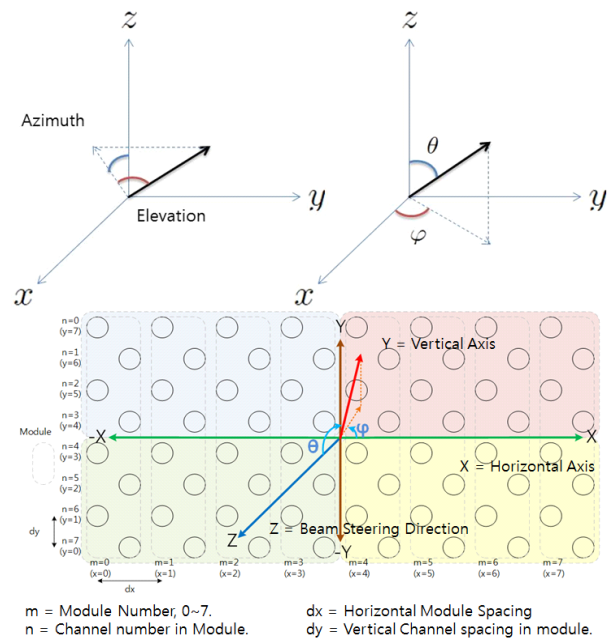


그림 6. 시스템의 삼각 배열 구조

Fig. 6. Triangular array structure of system.

조향 해상도 2.5° 를 위해 필요한 최소시간지연 값(t_{\min})은 1 ps, 최대시간지연 값(t_{\max})은 293 ps로 분석하였다. 시스템 빔 조향 성능 및 채널 간 위상차 그리고 시간지연에 대한 감쇠를 보상하기 위해 255 ps의 시간지연이 가능한 8-bit 시간 지연 회로가 포함된 다기능집적회로 2개를 cascade 형태로 고풍속통신모듈에 장착하여 최대 510 ps 까지 시간지연이 가능하도록 설계하였다. 위상변위기 대비 시간지연 시 신호감쇠가 발생하기 때문에 이에 대한 보상을 할 수 있도록 7-bit 디지털 감쇠기를 사용하였다.

그림 7은 식 (2)로 계산된 시간지연 설정 값으로 시스템 요구 최대 빔 조향 각 중 방위각/고각 (45° , 25°)의 이상적인 빔 조향 시뮬레이션을 수행한 2D/3D 패턴이다. 그림 8은 방위각/고각 방향으로 (45° , 25°) 빔 조향을 위한 시간 지연 설정 값으로 시뮬레이션한 결과를 적용한 2D 빔 패턴에 대해 위에서부터 최저 주파수, 중간 주파수, 최대 주

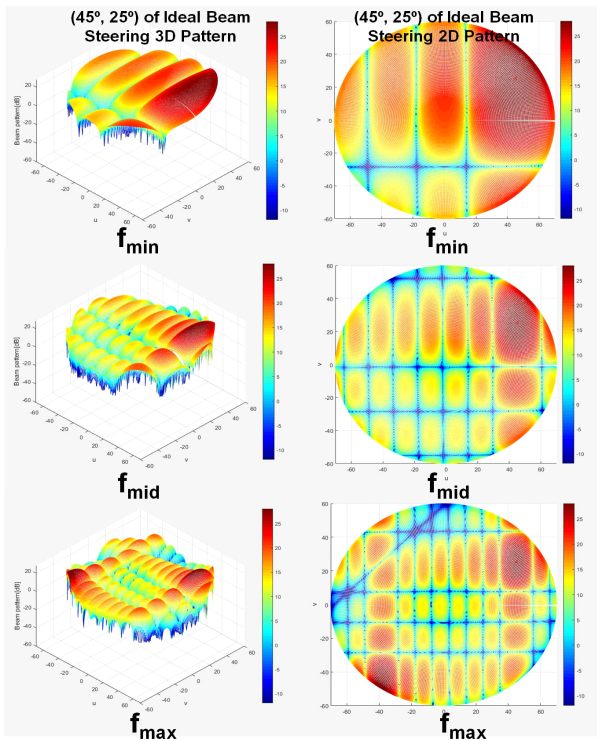


그림 7. 최저 주파수, 중간 주파수, 최대 주파수에서의 (45° , 25°) 이상적인 빔 조향 2D/3D 패턴

Fig. 7. (45° , 25°) of ideal beam steering 2D/3D pattern at min. freq., mid. freq., max. freq..

파수의 1D 단면을 보여주고 있다. 1D 단면은 이득 최대 지점을 기준으로 방위각 면 고각 면을 보여준다. 즉, 방위각의 단면은 고각 이득의 최대 지점인 25° 이고, 고각의 단면은 방위각 이득의 최대 지점인 45° 를 확인할 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 시간지연소자를 사용하여 빔 조향 제어 시 최소, 중간, 최대 주파수 영역에서 빔편이 현상 없이 동일한 방향으로 빔 조향이 가능함을 확인하였다.

그림 9는 설계된 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 모델에 균일(uniform) 분포를 적용하여 방위각($0 \sim 45^\circ$)/고각($0 \sim 25^\circ$) 방향으로 빔 조향 시 배열 빔패턴의 시뮬레이션을 수행한 결과이며, 복사소자의 특성 및 배열구조 및 간격에 대한 성능이 포함된 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 성능 예측결과, Boresight에서 f_{\min} 이득 15 dB, 수평/수직 빔폭 $22.3^\circ/42^\circ$, f_{mid} 이득 20.7 dB 수평/수직 빔폭 $11.4^\circ/24^\circ$, f_{\max} 이득 24.1 dB 이상 수평/수직 빔폭 $7.4^\circ/15^\circ$,

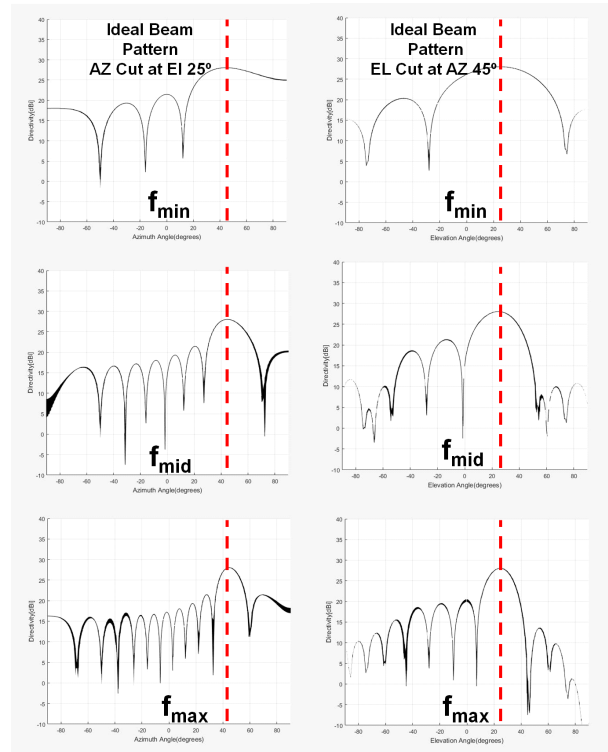
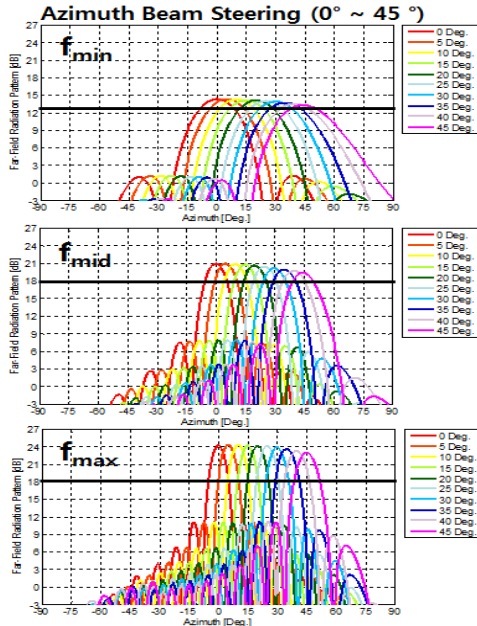
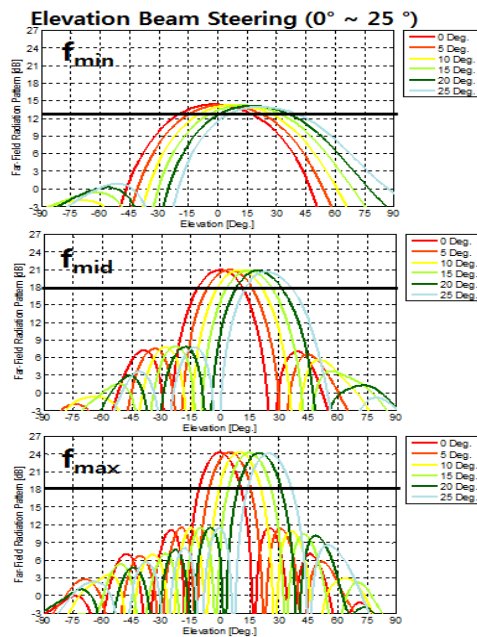


그림 8. 최저 주파수, 중간 주파수, 최대 주파수에서의 (45° , 25°) 이상적인 빔 조향 1D 단면

Fig. 8. (45° , 25°) of ideal beam steering 1D cut at min. freq., mid. freq., max. freq..



(a) 방위각 0°~45° 빔 조향 패턴
(a) Azimuth 0°~45° beam steering pattern



(b) 고각 0°~25° 빔 조향 패턴
(b) Elevation 0°~25° beam steering pattern

그림 9. 최저 주파수, 중간 주파수, 최대 주파수에서의 빔 조향 패턴

Fig. 9. Beam steering pattern at min. freq., mid. freq., max. freq..

모든 주파수 대역에서 부엽준위 -13 dB 이하임을 확인할 수 있다. 방위각 고각 방향으로 각각 최대 빔 조향 시 시뮬레이션 성능 예측 결과, Boresight 이득 성능 대비 빔 조향에 따라 안테나 이득이 감소함을 확인하였으나, 모든 주파수 대역에서 시스템 EIRP 목표성능을 만족할 수 있는 안테나 이득 성능 f_{min} 이득 13.3 dB 이상, f_{mid} 이득 18 dB 이상, f_{max} 이득 18 dB 이상임을 확인하였다.

IV. 시스템 송신 근접전계 시험 및 결과

전자전용 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 시스템은 64개의 고출력 증폭 채널과 복사소자로 구성되며, 각각의 고출력 증폭 채널은 빔 조향제어기를 통해 고출력 송신모듈 내의 다기능집적회로 8-bit 시간지연기로 위상 제어와 7-bit 감쇠기로 이득제어를 실시하고, GaN 반도체 고출력 증폭기를 통해 RF 신호를 고출력 증폭한 후 배열 복사소자를 통해 빔을 방사하면 공간상에서 송신 빔 패턴을 형성한다. 하지만 배열구조와 복사소자의 특성 그리고 배열 소자 상호 간 간섭 효과(mutual coupling)로 인해 각 송신채널이 동일한 빔 패턴을 갖지 않는다. 또한, 채널을 구성하는 능동/수동소자들은 모두 동일한 특성을 갖지 않으며, 각각 채널의 특성 차이가 존재한다. 따라서 시스템의 송신 패턴 측정 수행을 위해 각 채널 간 위상 및 이득에 대한 정렬을 실시하는 보정과정이 필요하다. 보정과정은 각 채널별 위상 및 이득을 측정하는 보정측정, 측정된 데이터를 기반으로 각 채널별 시간지연 값을 장입하는 보정장입, 정렬된 각 채널별 위상 및 이득을 측정하여 확인하는 보정확인으로 진행된다.

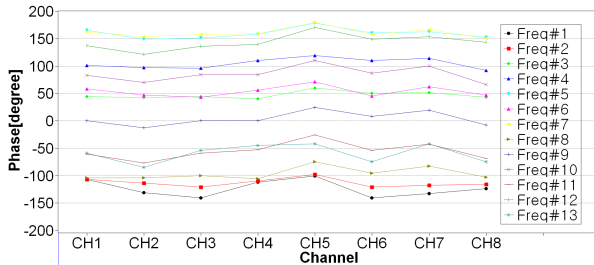
보정측정과 보정확인은 네트워크분석기를 사용하여 각 채널의 위상과 이득을 측정하며, 보정장입은 측정된 위상과 이득을 보정하여 보정테이블을 빔 조향제어기 내부 메모리에 저장한다. 보정테이블은 크게 세 가지로 구성되며, 빔 조향 제어에 따른 보정테이블과 채널 간 보정테이블, 그리고 배열 장착 후 보정테이블로 구성된다.

빔 조향 제어에 따른 보정테이블은 빔 조향 시 설정하는 시간지연 값 그리고 시간 지연 설정에 따라 발생하는 신호감쇠를 보상하기 위한 감쇠 값으로 구성되며, 채널 간 보정테이블은 채널 간 위상 및 이득에 대한 정렬을 실시한 테이블로 구성된다. 빔 조향 제어에 따른 보정테이

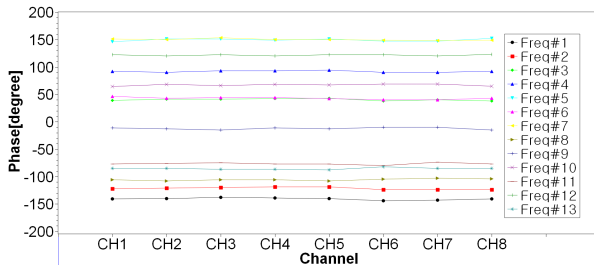
블은 다기능집적회로의 성능 측정을 통한 보정테이블로, 본 논문에서는 채널 간 보정테이블과 배열 장착 후 보정테이블 두 가지만 다루기로 한다.

그림 10은 고출력송신모듈 각 주파수 별 채널 간 보정테이블을 적용한 보정과정 이전과 이후의 위상 측정 결과이며, 보정과정 전 채널 간 최대 위상차가 51° 에서 보정과정 후에 채널 간 위상차가 10° 이하로 차이가 줄어들어 채널 간 위상정렬이 되었음을 확인하였다. 그림 11은 고출력 송신모듈 채널 간 보정과정 이후 각 주파수별 채널 간 이득 측정 결과이며, 각 채널의 이득에 대한 보정은 GaN 고출력 증폭기의 최대 출력을 사용할 수 있도록 설정하여 같은 주파수 내에서 각 채널 간 2 dB 이하의 이득차를 갖도록 하였다.

전자전용 광대역 평면형 위상배열 안테나 시스템은 그림 12와 같이 고출력의 펄스 RF 신호뿐만 아니라, 지속과 RF 신호를 송신하기 때문에, 시스템 빔 조향 범위 및 출력 세기를 고려하여 가로 6 m, 세로 6.2 m 스캔이 가능하며, 가장 큰 고출력이 방사되는 전면 중앙부 및 프로브 주변에



(a) 채널 간 보정 과정 이전
(a) Before calibration



(b) 채널 간 보정 과정 이후
(b) After calibration

그림 10. 채널 간 보정 과정 이전/이후의 위상 측정값
Fig. 10. Measured phase before/after calibration.

최대 100 kW의 내성을 갖는 고출력 흡수체 HFX-36HC를 적용한 근접전계 시험시설에서 시스템 시험을 구성하였다.

그림 13과 같이 송신 근접전계 시스템 시험을 구성한 후, 스캔 프로브를 각 채널의 복사소자 정면으로 위치시켜 네트워크분석기(PNA-X)를 통해 송신 빔 패턴의 크기와 위상에 대해 측정하며, 측정을 통해 얻은 데이터의 배열 전면 방향 개구면에서 위상 오차에 대한 보상 값으로 배열 장착 후 보정테이블을 구성하였다.

배열의 정렬 상태를 확인하기 위해 모든 송신 채널에 보정테이블 세 가지를 모두 적용한 후 동시에 방사하였다. 근접전계 시험을 통해 측정된 결과는 그림 14와 같다. 측정된 배열 소자 빔 패턴 위상 비교 방법을 사용하여 각 채널의 위상 지연특성이 $\pm 4.7^\circ$ 이내로 정렬되었음을 확인

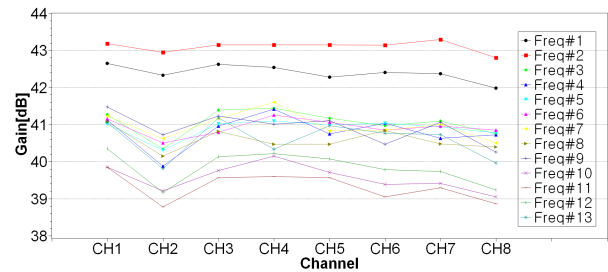


그림 11. 채널 간 보정 과정 이후 이득 측정값
Fig. 11. Measured gain after calibration.

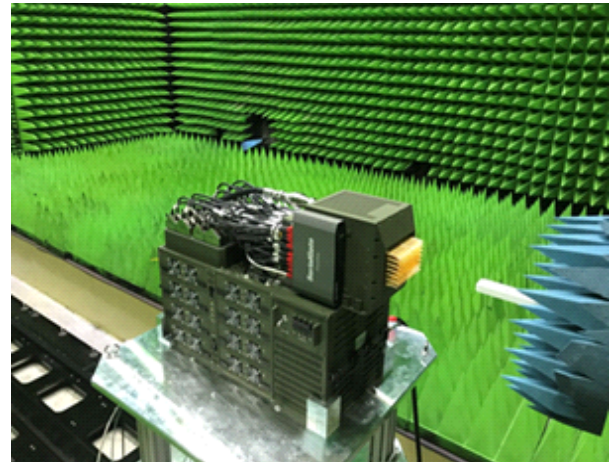


그림 12. 송신 근접전계 시스템 시험 구성
Fig. 12. System test configuration for transmit near field measurement.

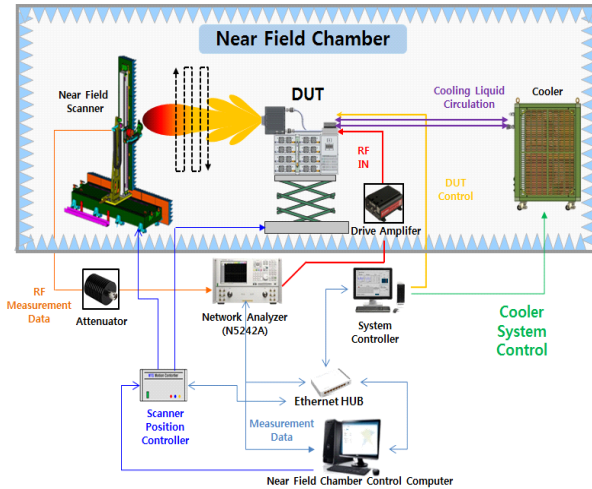


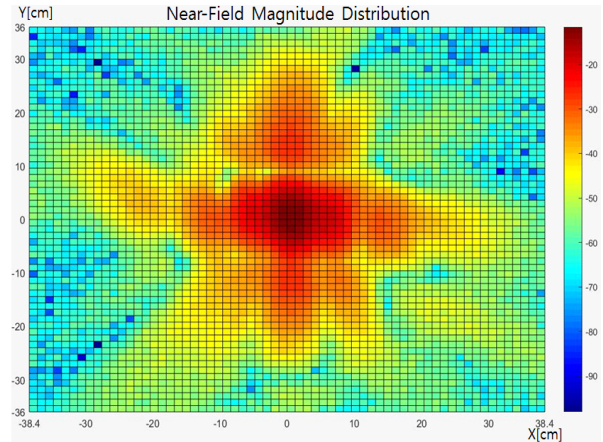
그림 13. 송신 근접전계 시험 구성도

Fig. 13. Block diagram for transmit near field measurement.

할 수 있었다. 채널 크기 정렬은 모든 송신채널이 포화영역에서 동작하므로 크기 정렬은 수행하지 않았다.

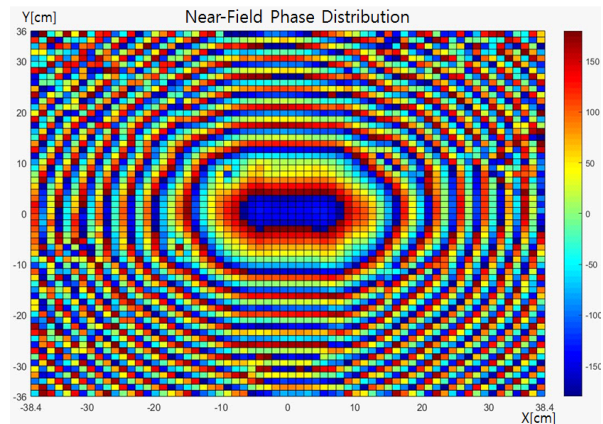
시스템 배열의 정렬을 완료한 후 위상 정렬 값과 송신 출력에 대해 균일 분포를 사용하였으며, 지속파의 RF 신호를 모사하기 위해 130 us의 Dwell timing으로 입력 RF 신호를 주입하여 유효방사출력(EIRP)을 확인하였다. 목표 성능확인을 위해 BoreSight에서 근접전계 시험을 수행한 후 원전계 변환을 하였다^{[8],[9]}. 측정 결과, 그림 15와 같이 BoreSight에서 유효방사출력과 빔의 송신 패턴을 확인할 수 있다. 유효방사출력의 목표성능(P) 대비 최소 주파수에서 P+3.42 dBm, 부엽준위 12.98 dB 이하, 3 dB 빔폭은 방위각 22°, 고각 40°이며, 중심주파수에서 P+5.89 dBm, 부엽준위 12.99 dB 이하, 빔폭 방위각 11°, 고각 23°, 최대 주파수에서 P+9.8 dBm, 부엽준위 11.29 dB 이하, 빔폭 방위각 7°, 고각 14°으로 목표성능을 만족함을 확인하였다.

시스템은 방위각 고각 양 방향 모두 정밀 빔 조향이 가능한 2차원 재밍 송신이 가능해야 하므로, 방위각 및 고각방향으로 빔 조향 시에도 송신 빔 패턴이 목표 유효방사출력성능을 만족하는지 확인하였다. 방위각($-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$)/고각($-25^{\circ} \sim 25^{\circ}$) 범위의 빔 조향의 정확도와 빔 형성 제어를 확인하기 위해 시험 시 최소 주파수, 중간 주파수, 최대 주파수의 방위각에서 고각방향으로 각각 5° 단위영역



(a) 크기 분포

(a) Magnitude distribution



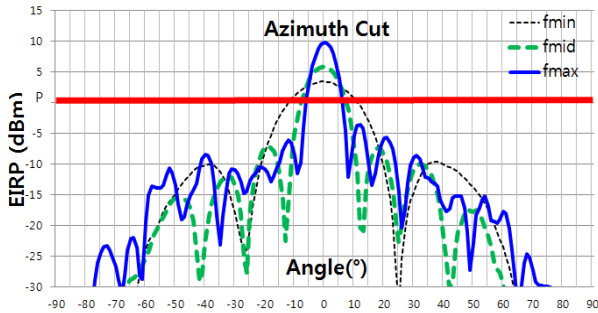
(b) 위상 분포

(b) Phase distribution

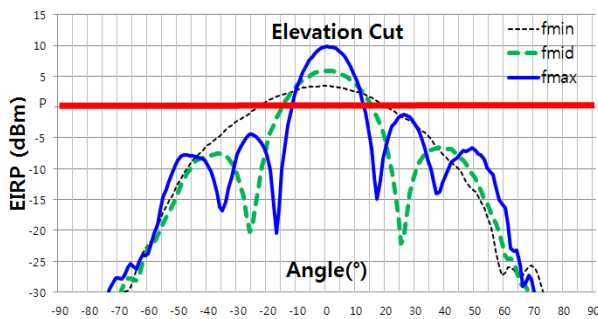
그림 14. 시스템의 채널 위상 정렬 후 측정된 송신 근접전계 시험 데이터

Fig. 14. Measured transmit near-field test data after channel phase alignment of system.

총 49개 지점에서 시스템 빔 조향 요구 성능과 시스템 유효방사출력 성능을 확인하였다. 앞서 식 (2) 및 빔 조향 시 물레이션을 통해 빔 조향 방향에 따라 추출한 시간지연 값을 적용하여 최저, 중간, 최대 주파수에 대해 근접전계 시험으로 빔 패턴을 측정하였다. 그림 16은 빔 조향 시 방위각 및 고각 1D 단면 빔패턴 측정결과이며, 방위각 또는 고각방향으로 최대 빔 조향 시에도 시스템 유효방사출력 목표성능을 만족함을 확인할 수 있다. 또한 빔 조향 측정



(a) 방위각 1D 단면 빔 패턴
(a) Azimuth 1D cut beam pattern



(b) 고각 1D 단면 빔 패턴
(b) Elevation 1D cut beam pattern

그림 15. 최소 주파수, 중간 주파수, 최대 주파수의 Boresight EIRP 측정 결과

Fig. 15. Boresight EIRP measurement result of min. freq, mid. freq, max. freq..

결과, 빔 조향 오차 2.35°(RMS) 이내임을 확인할 수 있었다. (45°, 25°), (-45°, 25°), (45°, -25°), (-45°, -25°) 빔 조향에 대해서는 앞서 시뮬레이션을 통해 예측된 바와 같이 최대 주파수 영역에서 grating lobe가 발생하므로, grating lobe에 대한 시스템의 영향을 최소화하기 위해 (42.5°, 22.5°), (-42.5°, 22.5°), (42.5°, -22.5°), (-42.5°, -22.5°)로 실시간 지연 값을 설정하여 3 dB 빔 폭으로 빔 조향 범위 내 EIRP를 만족하는 방법으로 시험을 수행하였다. 그림 17은 방위각, 고각 방향으로 (0°, 0°), (0°, 25°), (42.5°, 22.5°), (45°, 0°), (42.5°, -22.5°), (0°, -25°), (-42.5°, -22.5°), (-45°, 0°), (-42.5°, 22.5°) 최대 빔 조향 시 최소, 중간, 최대 주파수에서의 2D 빔 패턴 측정결과를 나타내었고, 동일한 시간 지연 값으로 빔 조향 제어 시 광대역에서 빔 편이 현상 없이 빔 조향 가능함을 확인할 수 있다.

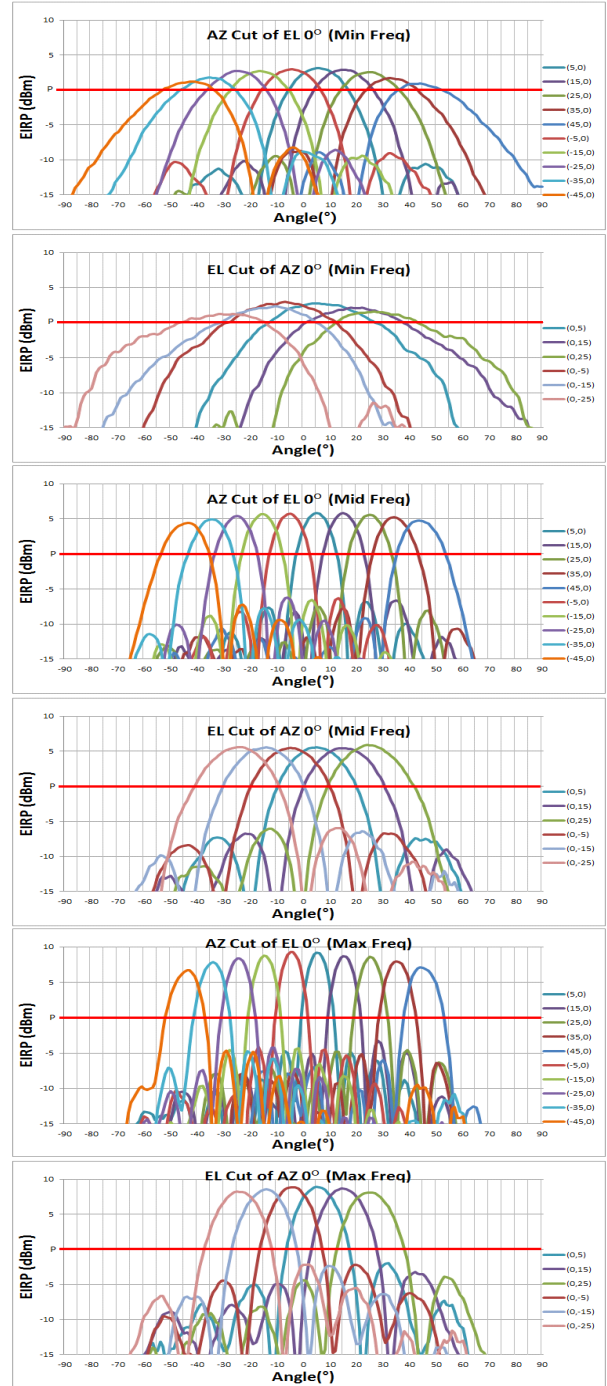


그림 16. 빔 조향 시 방위각 및 고각 1D 단면 빔 패턴 측정 결과(min. freq., mid. freq., max. freq.)

Fig. 16. Azimuth and elevation 1D cut beam pattern measured result of beam steering(min. freq., mid. freq., max. freq.).

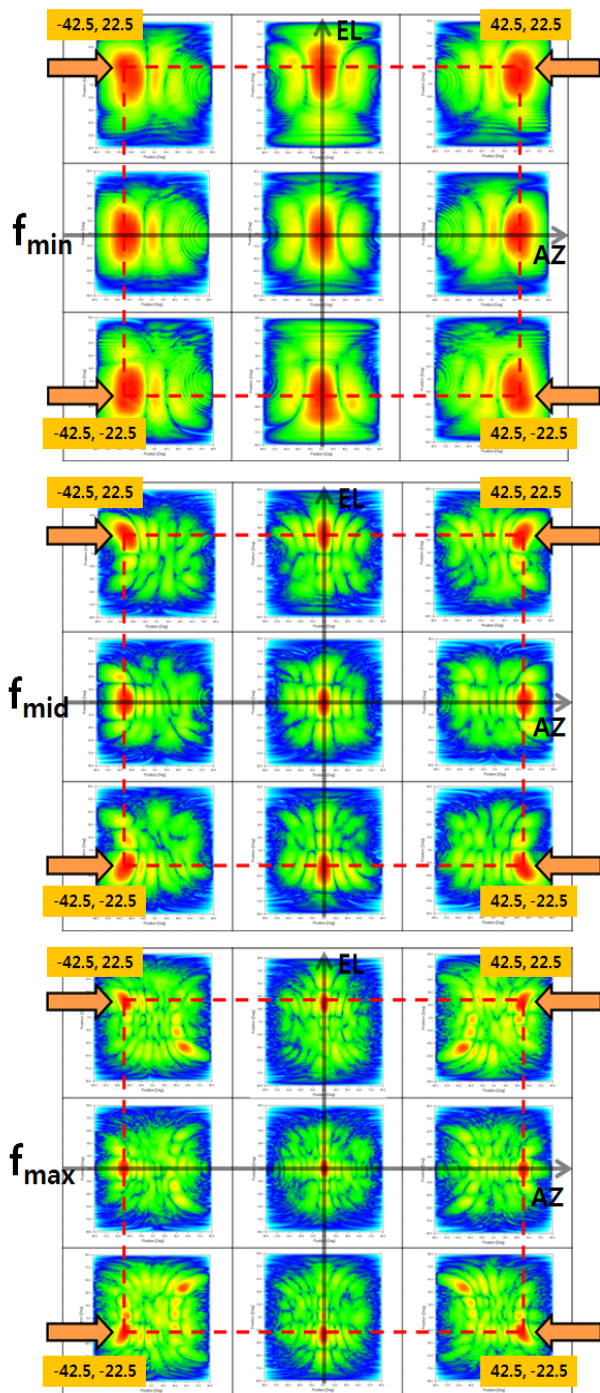


그림 17. 최대 빔 조향 시 2D 빔 패턴 측정결과(min. freq., mid. freq., max. freq.)

Fig. 17. Azimuth and elevation 2D beam pattern measured result of maximum beam steering(min. freq., mid. freq., max. freq.).

V. 결 론

본 논문에서는 전자전용 고출력 재밍 송신장치에 사용할 수 있는 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 시스템의 설계 및 제작 측정 결과를 확인하였다. 광대역 평면형 능동위상배열안테나 시스템은 지속파와 고출력 방사 시 내성을 갖는 금속형 복사소자를 8×8 삼각배열구조와 GaN 기반 반도체 증폭기를 적용하여, 기존 TWT 기반의 전자전용 고출력 재밍 송신장치 대비 높은 EIRP 성능으로 보다 먼 거리에서 적의 위협에 대해 재밍할 수 있는 능력을 확보할 수 있으며, 실시간 지연소자가 탑재된 GaAs 다기능집적회로 적용으로 광대역 재밍 송신 시 빔 편이 현상 없이 방위각 고각 방향으로 보다 정밀하고 넓은 빔 조향 성능을 구현할 수 있다. 본 논문에서는 광대역 평면형 능동위상배열안테나 시스템의 설계 및 제작결과를 알아보았다. 또한 제작된 시스템의 측정을 위한 송신 근접 전계 시험 구성을 확인하였으며, C~Ku-band의 광대역 3:1 대역폭($f_{\min}:f_{\max}=1:3$)에서 송신 빔 패턴 및 EIRP 측정 결과를 확인하였다. 본 논문을 통해 개발된 시스템은 향후 개발되는 전자전용 광대역 고출력 재밍 송신장치의 설계 및 제작과 성능분석에 도움이 될 것으로 기대한다.

References

- [1] E. Gorud, C. Mehl, C. Renard, E. Semmler, and K. Weidmann, "Design and measurement of an active array antenna for an airborne X-Band SAR/MTI radar," in *2006 First European Conference on Antennas and Propagation*, Nice, Nov. 2006, pp. 1-4.
- [2] D. W. Hess, "Measurement of EIRP and antenna response for active antennas with spherical near-field scanning," in *2004 IEE Antenna Measurements and SAR, AMS 2004*, Loughborough, May 2004, pp. 49-54.
- [3] W. Haselwander, M. Uhlmann, S. Wustefeld, and M. Bock, "Measurement on an active phased array antenna on a near-field range and an anechoic far-field chamber," in *2001 31st European Microwave Conference*, London, Sep. 2001, pp. 1-5.

- [4] I. S. Kim, C. H. Lee, S. Y. Choi, and J. Y. Kim, "Single-polarized wideband array antenna of all-metal structure with modified TSA elements," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 10, pp. 2445-2449, Mar. 2017.
- [5] J. C. Jeong, D. P. Jang, D. H. Shin, I. B. Yom, J. D. Kim, and W. Y. Lee, et al., "An AlGaIn/GaN based ultra-wideband 15-W high-power amplifier with improved return loss," *ETRI Journal*, vol. 38, no. 5, pp. 972-980, Oct. 2016.
- [6] J. C. Jeong, I. B. Yom, J. D. Kim, W. Y. Lee, and C. H. Lee, "A 6~18-GHz GaAs multifunction chip with 8-bit true time delay and 7-bit amplitude control," *IEEE*

- Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 5, pp. 2220-2230, May 2018.
- [7] M. Longbrake, "True time-delay beamsteering for radar," in *2012 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, Dayton, OH, Jul. 2012, pp. 246-249.
- [8] A. C. Newell, R. D. Ward, and E. J. McFarlane, "Gain and power parameter measurements using planar near-field techniques," *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 36, no. 6, pp. 792-803, Jun. 1988.
- [9] J. J. H. Wang, "An examination of the theory and practices of planar near-field measurement," *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 36, no. 6, pp. 746-753, Jun. 1988.

김 재 덕 [LIG넥스원 전자전연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7059-1542>



2010년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2012년 2월: 광운대학원 전파공학과 (공학석사)
 2012년 1월~현재: LIG넥스원 전자전연구소 선임연구원
 [주 관심분야] RF Power Amplifier, RF Jamming System, Electronic Warfare System 등

최 삼 열 [LIG넥스원 전자전사업부/매니저]

<https://orcid.org/0000-0001-5296-3683>



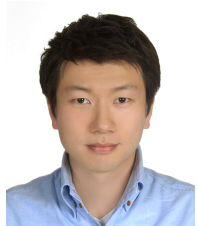
2008년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학사)
 2010년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학석사)
 2009년12월~2013년 4월: 에이스안테나부설연구소 선임연구원
 2013년 4월~2018년 11월: LIG넥스원 전자전연구소 선임연구원

2018년 11월~현재: LIG넥스원 전자전사업부 매니저

[주 관심분야] Antenna, Array Antenna, Electronic Warfare Project Management 등

조 상 왕 [LIG넥스원 전자전연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8799-1684>



2008년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)
 2007년 12월~현재: LIG넥스원 전자전연구소 선임연구원
 [주 관심분야] RF Receiver, RF Jamming System, Electronic Warfare System 등

김 두 환 [LIG넥스원 전자전연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1066-2468>



2015년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학과 (공학사)
 2012년 2월: 숭실대학원 전자공학과 (공학석사)
 2017년 1월~현재: LIG넥스원 전자전연구소 선임연구원
 [주 관심분야] Digital Hardware, RF Jamming System, Electronic Warfare System 등

박 희 준 [LIG넥스원 전자전연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1045-700X>



1989년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)
1992년 2월: 국민대학원 전자공학과 (공학석사)
1992년 4월~1995년 6월: 국방기술품질원 연구원
1995년 6월~현재: LIG넥스원 전자전연구

소 수석연구원

[주 관심분야] Digital Hardware, RF Jamming System, Electronic Warfare System 등

김 인 선 [국방과학연구소 제2기술본부/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6972-4128>



1995년 2월: 순천향대학교 전자공학과(공학사)
1997년 2월: 순천향대학교 전자공학과 (공학석사)
2005년 8월: 순천향대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년 2월~현재: 국방과학연구소 책임

연구원

[주 관심분야] Electronic Warfare System, RF Passive & Active Components, RF Transmitter/Receiver

김 동 희 [LIG넥스원 전자전연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9494-3891>



1999년 2월: 인하대학교 전자재료공학과 (공학사)
2001년 2월: 인하대학교 전자재료공학과 (공학석사)
2001년 1월~현재: LIG넥스원 전자전연구소 수석연구원

[주 관심분야] Digital Hardware, Digital Receiver, Electronic Warfare System 등

이 창 훈 [국방과학연구소 제2기술본부/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5871-9454>



1999년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
2001년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2006년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2008년~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] Electronic Warfare Signal Processing

이 왕 용 [LIG넥스원 전자전연구소/연구위원]

<https://orcid.org/0000-0002-9955-5983>



1996년 2월: 경북산업대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 2월: 아주대학교 정보전자공학과 (공학석사)
1995년~현재: LIG넥스원 전자전연구소 연구위원

[주 관심분야] Electronic Warfare System, RF Circuit/Signal Processing 등