

완전 디지털 다기능 레이더에 적용 가능한 능동 위상 배열 안테나의 수신 근접전계 시험

Receiving Near-Field Measurement of Active Phased Array Antennas Applicable to Full-Digital Multifunction Radars

주정명 · 임재환 · 황성환 · 박종국 · 강연덕 · 한일탁* · 김두수* · 이동국*

JoungMyoung Joo · Jae-Hwan Lim · Sung-Hwan Hwang · Jongkuk Park · Yeon-Duk Kang ·
Il-Tak Han* · Doo-Soo Kim* · Dong-Kook Lee*

요 약

본 논문에서는 다기능 레이더에 적용 가능한 디지털 능동 위상 배열 안테나의 수신 근접전계 시험에 대해 기술하였다. 먼저 아날로그형 능동 위상 배열 안테나와의 구조적인 차이로 인해, 기존의 수신 근접전계 시험 구성을 그대로 적용하기 어려우므로 디지털 능동 위상 배열 안테나에 적합한 수신 근접전계 시험 구성을 제안하였다. 시뮬레이션에서는 근접전계 측정 시 발생한 누설 신호에 의해 왜곡된 빔 패턴과 누설 신호 보상 결과를 제시하고, 이 결과를 바탕으로 측정된 근접전계 데이터를 검토하였다. 또한, 동시 측정된 7개의 수신 근접전계 데이터를 원전계 빔 패턴으로 변환하여 디지털 다중 빔 형성 기능을 검증하고, 보어사이트에 대해서는 빔 패턴 및 주요 성능에 대한 결과를 제시하였다. 마지막으로, 측정된 수신 빔을 이용해 합/차 패턴을 생성하고, 모노펄스 기울기를 계산하였다. 측정된 모든 결과가 이상적인 빔 패턴 및 계산 결과와 매우 유사함을 보임으로써, 제안된 수신 근접전계 시험 구성 및 측정 결과에 대한 유효성을 검증하였다.

Abstract

Herein, we describe the receiving (Rx) near-field measurement of digital active phased array antennas applicable to multifunction radars. Because of the structural differences with analog active phased array antennas, it is difficult to apply the conventional Rx near-field test configuration. Therefore, we have proposed a configuration of a near-field test suitable for digital active phased arrays. In the simulation, the results are presented for the beam pattern distorted by the leakage signal generated in the near field test and the beam pattern corrected for these leakage signal. After which, based on these results, the measured near-field data is reviewed. Furthermore, by converting seven near-field data measured simultaneously with far-field patterns, multiple digital beam-forming features were verified, and for the boresight, the beam patterns and its main findings were presented. Finally, sum/difference patterns were generated with multiple Rx beams, and the monopulse slope was calculated. By demonstrating that all the measured results are very similar to the ideal beam patterns and the calculation results, the validity of the proposed Rx near-field test configuration with the measurement results is verified.

Key words: Multi-Function Radar, Near-Field Measurement, Digital Active Phased Array Antenna, Full Digital Radar

LIG 넥스원(LIG Nex1)

*국방과학연구소(Agency of Defence Department)

· Manuscript received January 9, 2020 ; Revised February 6, 2020 ; Accepted February 18, 2020. (ID No. 20200109-004)

· Corresponding Author: JoungMyoung Joo (e-mail:joungmyoung.joo@lignex1.com)

I. 서 론

초기의 레이더는 하나의 송수신기에 배열 안테나를 결합하여 안테나 개구면을 기계적으로 회전시켜 표적을 탐지하는 수동 배열 안테나 시스템을 사용하였다. 다음으로 복사소자에 위상 변위기를 추가하여 전자적으로 안테나 빔을 조향하는 수동 위상 배열 안테나를 거쳐 하나의 송수신기만 사용했던 수동형 시스템에서 각각의 배열 소자에 송수신모듈을 포함하는 능동형 위상 배열 안테나로 발전해왔다. 이전의 아날로그형 위상 배열 안테나와 다르게 오늘날의 안테나는 디지털 송수신모듈을 적용하여 위상 변위기를 사용하지 않고 전자적 빔 조향이 가능하며, 각 복사소자 채널의 송수신 신호를 모두 디지털화 한 개별 소자 단위의 디지털 능동 위상 배열 안테나로 진화하고 있다. 이러한 디지털 능동 위상 배열 안테나는 면배열로서 방위각/고각 방향으로 모두 빔 조향이 가능하며, 디지털화 된 각각의 채널별 수신 데이터로부터 디지털 빔 형성기를 통해 동시에 다중 빔을 형성할 수 있는 등 굉장히 많은 장점이 있다^{[1]~[2]}.

기존의 아날로그형과 디지털형 능동 위상 배열 안테나는 빔을 합성하는 방식에서부터 차이가 있기 때문에, 그에 따라 시스템 특성을 고려하여 안테나 성능 검증을 위한 빔 패턴 시험 방식도 달라져야 한다. 따라서 본 논문에서는 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나 시스템에 적합한 수신 근접전계 시험 방안을 제시하였다. 또한, 디지털 능동 위상 배열 안테나의 근접전계 시험 시 다양한 원인에 의해 필연적으로 발생하는 누설 신호(leakage) 영향으로 인해 안테나 빔 패턴에 왜곡이 나타날 수도 있다^[3]. 이러한 누설 신호는 안테나 주 신호의 크기 및 위상차, 시스템 노이즈 크기 등에 따라 빔 패턴에 미치는 영향이 달라지므로, 시뮬레이션을 통해 근접전계 시험에서 획득한 각각의 측정 데이터 샘플로부터 누설 신호 제거 필요 유무에 대해 검토하였다.

근접전계 시험에 있어서는 앞서 제안한 수신 근접전계 시험 구성을 적용하여 안테나 빔 패턴에 대한 특성을 검증하고 더불어 다중 수신 빔 형성 결과도 함께 제시하였다. 근접전계 시험 시 송신 신호 소스(source)로부터 측정 프로브에 입력되는 절대 전력과 시스템 노이즈를 측정하

여 능동 위상 배열 안테나 수신 시험에서 검증해야 할 매우 중요한 항목 중 하나인 안테나 이득 대비 시스템 노이즈 온도 비(G/T, Ratio between Antenna Gain and System Noise Temperature)를 계산함으로써 레이더 성능 분석 시 사용되는 레이더 방정식에 직접적으로 이용될 수 있도록 하였다^{[4],[5]}. 마지막으로 본 논문에서 시험한 디지털 능동 위상 배열 안테나는 수신 다중 빔을 형성하여 생성된 다중 빔을 이용해 모노펄스 기술기(Monopulse Slop)를 검토하였다.

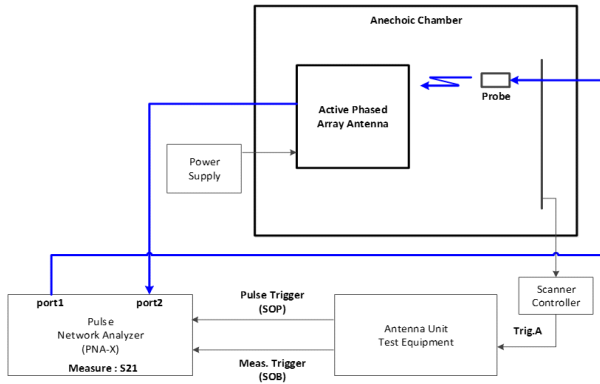
II. 수신 근접전계 시험 개요

2-1 수신 근접전계 시험 구성

본 논문에서 소개하는 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나는 각각의 배열 소자마다 송수신 단일칩을 포함한 디지털 송수신모듈을 적용하였다^[6]. 디지털 송수신모듈은 크게 RF(Radio Frequency) 회로와 디지털 회로로 구성되어 있으며, 송신 시 디지털 회로에서 생성한 디지털 파형은 송수신 단일칩을 통해 RF 신호로 변환되어 RF 회로로 전달된다. 반대로 수신 시에는 RF 회로에서 수신한 RF 신호를 송수신 단일칩에서 디지털 신호로 변환하여 뒷단으로 출력해준다. 즉, 디지털 송수신모듈을 매개로하여 아날로그 신호와 디지털 신호가 변환된다.

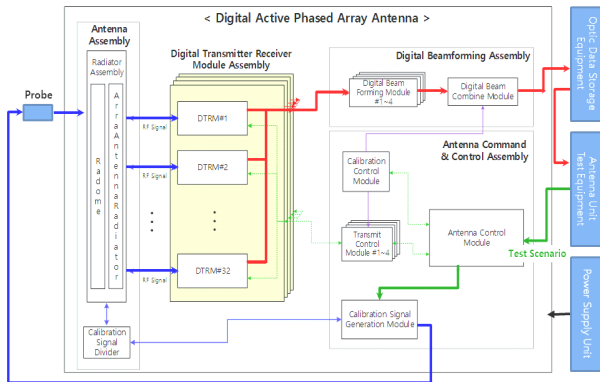
이와 같이 디지털 능동 위상 배열 안테나는 RF 수신 신호가 송수신모듈에서 디지털화 되어 출력되고, 디지털 빔 형성기에서 수신 빔이 합성되는 반면, 기존의 아날로그 능동 위상 배열 안테나에서는 복사소자를 거쳐 송수신 모듈로 수신된 RF 신호가 아날로그 빔 형성기를 통해 수신 빔이 합성된다. 그러므로 수신 근접전계 시험 시 아날로그 능동 위상 배열 안테나는 벡터 네트워크 분석기(Vector Network Analyzer)를 통해 수신 신호 측정이 가능하지만, 디지털 능동 위상 배열 안테나는 상용 계측기를 사용하여 측정이 불가능하다^[7]. 따라서 본 논문에서는 디지털 능동 위상 배열 안테나의 수신 근접전계 측정을 위한 시험 구성을 제안하였다. 그림 1에 아날로그 및 디지털 능동 위상 배열 안테나에 대한 수신 근접전계 시험 구성도를 비교하였다. 여기서 파란 실선은 RF 신호 흐름을 나타내고, 빨간 실선은 디지털 신호 흐름을 나타낸다.

그림 1(b)에 보인 것과 같이 디지털 능동 위상 배열 안



(a) 아날로그 능동 위상 배열 안테나의 수신 근접전계 시험 구성도

(a) Rx near-field measurement configuration for the analog active phased array antenna



(b) 디지털 능동 위상 배열 안테나의 수신 근접전계 시험 구성도

(b) Rx near-field measurement configuration for the digital active phased array antenna

그림 1. 능동 위상 배열 안테나의 수신 근접전계 시험 구성 비교

Fig. 1. Configuration comparison for Rx near-field measurement of active phased array antenna.

테나에서는 수신 근접전계 시험 시 송신 소스로 안테나 내부 장비인 보정신호 생성 모듈을 이용하였다. 보정신호 생성 모듈에도 송수신 단일칩을 적용함으로써 입력된 제어 명령에 따라 디지털 송신 파형을 생성하고, RF 신호로 변환하여 송신할 수 있도록 하였다. 프로브를 통해 송신된 RF 신호를 복사소자 조립체에서 수신하여 디지털 반도체 송수신 조립체로 전달 및 디지털 변환되고, 디지털 빔형성 조립체에서 각 배열 소자별 정렬값, 가중치 분포

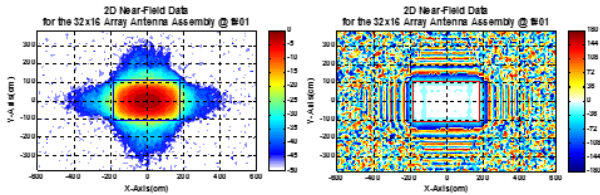
및 빔 조향 위상을 적용하여 최종 수신 빔이 합성되어 외부로 출력된다. 이와 같은 수신 근접전계 시험 구성을 통해 신호 발생 및 송수신부터 빔 형성까지 일련의 과정들이 디지털 능동 위상 배열 안테나 내부 장비에서 수행되기 때문에 송수신 신호 간 동기도 자연스럽게 일치하게 된다.

2-2 누설 신호 검토 시뮬레이션

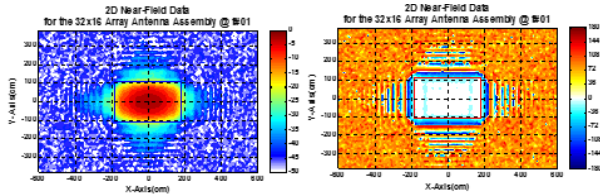
서두에 언급한 것과 같이 디지털 능동 위상 배열 안테나는 시스템 특성 상 I/Q 채널 간 불균형(imbalance), DC Offset, RF 소자 간 낮은 격리도 특성, 송수신 경로상의 불안정한 커넥터/케이블 등의 원인으로 누설 신호가 발생하게 되며, 발생한 누설 신호에 의해 안테나 빔 패턴에 왜곡이 일어날 수 있다^[3]. 본 논문에서는 근접전계 시험에 앞서 시스템 특성을 반영한 수신 근접전계 데이터를 모델링하여, 시뮬레이션을 통해 누설 신호가 수신 빔 패턴에 미치는 영향성을 알아보고, 누설 신호 보정의 필요성에 대해 검토하였다.

시뮬레이션을 위해 먼저 실제 수신 근접전계 측정 영역과 동일한 크기의 데이터를 생성하여 안테나 개구면 크기의 영역에는 주 신호(크기 80.5 dB, 위상 0°)를 인가하고, 이 데이터를 백프로젝션 기법을 이용해 측정 프로브면으로 이동시킨 후 시스템 노이즈(RMS 크기 약 30 dB)를 데이터 전체 영역에 추가하였다. 가능한 한 실제 상황과 유사한 수신 근접전계 데이터를 모사하기 위해 인가한 주 신호와 시스템 노이즈 크기는 시험을 통해 측정된 값을 적용하였다. 그림 2에 이상적인 경우의 수신 근접전계 데이터와 누설 신호(크기 35 dB, 위상 90°)가 있을 때의 데이터를 비교하였다. 근접전계 측정 데이터에 누설 신호가 포함되면 안테나 개구면 이외의 영역에서도 일정한 성분의 크기와 위상이 존재함을 한눈에 알 수 있다.

다음으로 이상적인 근접전계 데이터에 크기 1 dB~40 dB, 위상 0°~180° 범위에서 누설 신호를 변화시키며 인가하여 누설 신호에 의한 안테나 빔 패턴 변화를 검토하였다. 여기서 인가한 누설 신호의 위상은 곧바로 주 신호와의 위상차가 되며, 누설 신호가 없는 이상적인 빔 패턴 대비 누설 신호의 크기가 커질수록 이득 및 빔폭 오차가 커졌다. 또한, 누설 신호의 크기가 같더라도 주 신호와



(a) 누설 신호가 없을 때 근접전계 데이터의 크기/위상 분포
(a) Magnitude/phase distribution for near-field data without leakage



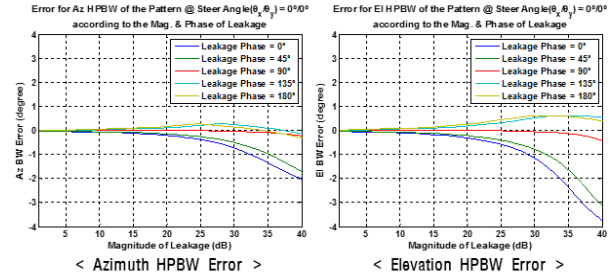
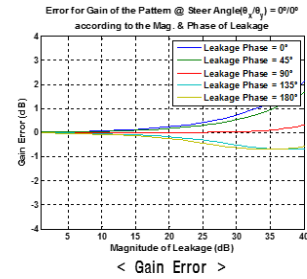
(b) 누설 신호가 있을 때 근접전계 데이터의 크기/위상 분포
(b) Magnitude/phase distribution for near-field data with leakage

그림 2. 누설 신호 유/무에 따른 수신 근접전계 데이터
Fig. 2. Rx near-field data with or without leakage signal.

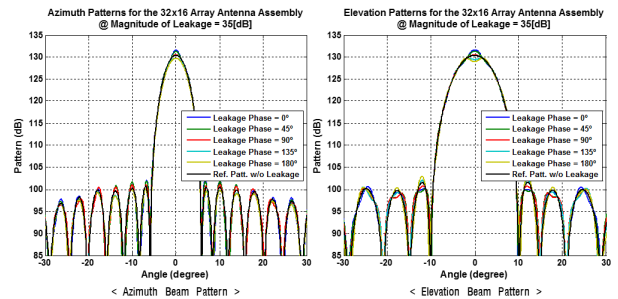
의 위상차에 따라 왜곡의 정도와 경향이 달라 이득 및 빔 폭 오차에 차이가 있었고, 누설 신호의 크기가 시스템 노이즈보다 작은 경우에 이득 오차는 약 ± 1 dB, 빔 폭 오차는 약 $\pm 1^\circ$ 이내의 결과를 나타내었다(그림 3 참조).

참고문헌 [3]에 제안된 것과 같이, 근접전계 데이터를 백프로젝션을 통해 안테나 개구면에서의 크기/위상 분포로 변환하고, 이 데이터로부터 누설 신호를 추출하여 근접전계 데이터에 포함된 누설 신호를 제거하였다. 그림 4에 누설 신호(크기 약 35 dB)가 제거된 근접전계 데이터 및 원전계 빔 패턴 결과를 보였다.

누설 신호 제거 후에 근접전계 데이터의 크기/위상 분포가 그림 2(a)에 보인 이상적인 경우의 근접전계 데이터와 매우 유사해졌고, 원전계 빔 패턴에도 왜곡 현상이 나타나지 않았으며, 이득 및 빔폭에 대한 오차 역시 누설 신호 제거 전에 비해 현저히 줄어들었다. 하지만 누설 신호의 크기가 시스템 노이즈보다 작을 때는 복소 상수(Complex Constant)인 누설 신호 특성이 무작위 특성인 시스템 노이즈에 가려지게 된다. 그로 인해 근접전계 데이터로부터 누설 신호의 정확한 크기/위상 성분 추출이 어려워지기 때문에, 누설 신호에 대한 예측 오차가 커지고, 오히려 누설 신호 제거 후 빔 패턴에 왜곡이 발생하여 성능 오차 또한 커지게 된다(그림 5 참조). 따라서 누설 신



(a) 누설 신호에 의한 이득 및 빔폭 오차
(a) Error in gain and half power beam width due to leakage



(b) 누설 신호(35 dB)에 의한 빔 패턴 왜곡 결과
(b) Distortion results of beam pattern due to leakage(35 dB)

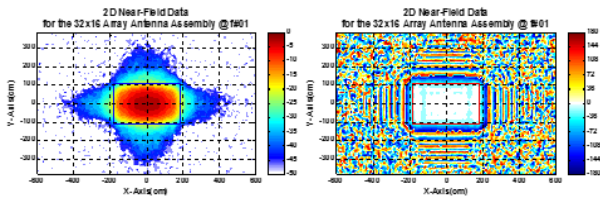
그림 3. 누설 신호 크기 및 주 신호와의 위상차에 따른 빔 패턴 결과
Fig. 3. Results of beam pattern according to magnitude of leakage and phase difference from main signal.

호와 시스템 노이즈의 크기에 따라 누설 신호를 제거하는 과정이 필요치 않을 수 있다.

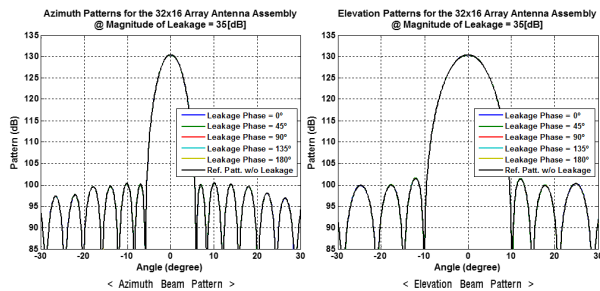
III. 수신 근접전계 시험 및 결과

3-1 채널별 정렬값 및 기준 보정값 추출 시험

안테나에서 배열 소자 간 수신 경로상의 물리적인 길이 차이가 있고, 각각의 복사소자와 능동/수동 소자들의



(a) 누설 신호가 제거된 근접전계 데이터의 크기/위상 분포
(a) Magnitude/phase distribution for near-field data with removed leakage



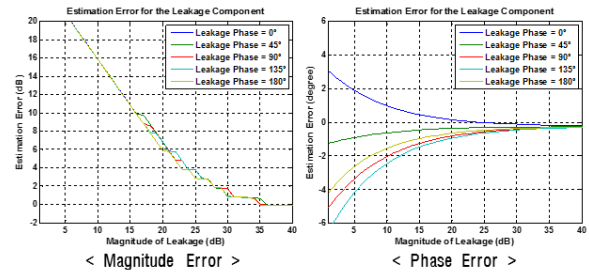
(b) 누설 신호가 제거된 방위각/고각 원전계 빔 패턴
(b) Az/EI far-field beam pattern with removed leakage

그림 4. 누설 신호(35 dB) 제거 후의 근접전계 및 원전계 빔 패턴 결과

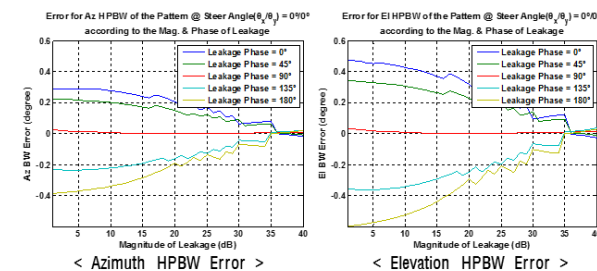
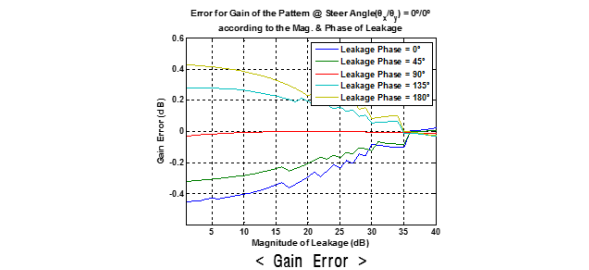
Fig. 4. Results for near-field and far-field beam pattern after removing leakage(35 dB).

특성이 다르기 때문에, 채널별 특성 차이를 최소화시키기 위한 정렬값을 적용하여 빔 패턴이 형성될 수 있도록 해야 한다. 또한, 레이더를 장시간 운용하게 되면 외부 환경이나 열 등에 의해 능동 소자들의 상태가 변하여 장비 특성이 달라질 수 있다. 이를 방지하기 위해 레이더 운용 중 보정을 수행하여 장비를 초기의 정렬된 상태로 되돌려주는 기능이 필요하다. 특히나 디지털 능동 위상 배열 안테나는 장비를 켜 때마다 채널별 위상 상태가 달라지기 때문에 최초에 보정 기능을 수행한 후 레이더를 운용해야 한다. 따라서 근접전계 측정 전 채널별 정렬 및 보정을 위한 기준값 추출 시험을 수행한다.

먼저, 채널별 정렬값 추출 시험은 그림 1(b)의 시험 구성에서 측정 프로브를 각 개별 복사소자의 중심에 위치시키고 S_{21} 을 측정하였다. 이때 프로브 송신 위치의 타이밍에 따라 해당하는 디지털 송수신모듈만 순차적으로 on/off 되도록 개별 제어했고, 디지털 반도체 송수신 조립체에서 출력된 I/Q 데이터를 안테나 제어 조립체로 전달하여



(a) 누설 신호 크기/위상 예측 오차
(a) Estimation error for magnitude/phase of leakage



(b) 누설 신호 제거 후 안테나 빔 패턴의 이득 및 빔폭 오차
(b) Error in gain and beam width of antenna beam pattern after removing leakage

그림 5. 누설 신호 크기 및 주 신호와의 위상차에 따른 누설 신호 보정 결과

Fig. 5. Results of removing leakage according to magnitude of leakage and phase difference from main signal.

안테나부 시험장비에 저장되도록 하였다.

정렬값 추출 시험 전/후로는 그림 6과 같은 시험 구성에서 기준 보정값 추출 시험을 진행하였다. 여기서는 모든 채널의 디지털 송수신모듈이 동시에 on/off 되도록 전체 제어하며, 보정신호 생성 모듈에서 송신된 신호는 안테나 조립체와 디지털 반도체 송수신 조립체를 거쳐 안테나 제어조립체 및 제어 라인을 통해 시험장비에 저장된다.

채널별 정렬값 추출 시험을 수행하는 동안 장비 상태

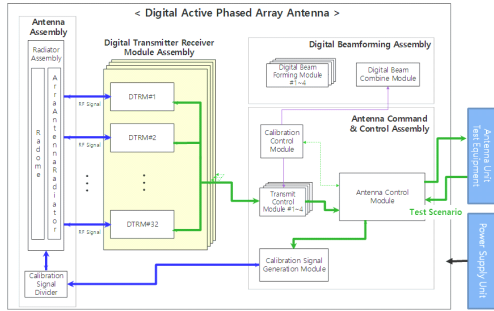
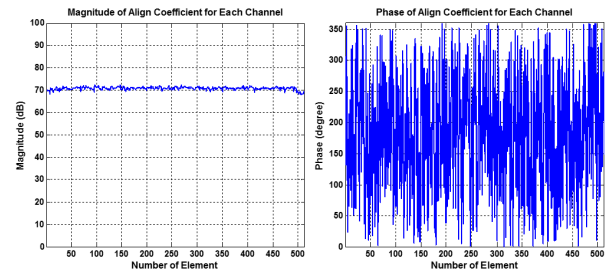


그림 6. 채널별 기준 보정값 추출 시험 구성도
Fig. 6. Measurement configuration to extract reference calibration coefficient for each channel.

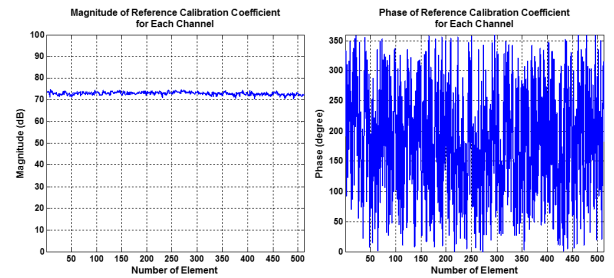
가 변했는지를 확인할 목적으로 기준 보정값 추출 시험은 정렬값 추출 시험 전/후로 2회 측정하였으며, 이 시험 순서를 한 세트로, 각 시험에 대한 측정 데이터의 신뢰도 향상을 위해 총 3 세트를 시험하였다. 따라서 채널별 정렬값은 총 3회, 기준 보정값은 총 6회의 측정 데이터를 평균하였으며, 시험을 수행하는 동안 장비 변화 없이 데이터가 매우 안정적으로 획득되었다. 최종 추출된 채널별 정렬값 및 기준 보정값을 그림 7에 나타내었다.

3-2 수신 빔 패턴 및 G/T 측정 시험

수신 근접전계 시험에 앞서 3-1장에서 추출한 채널별 정렬값과 기준 보정값을 테이블화하여 각각 디지털빔형성 조립체와 안테나제어 조립체의 메모리에 저장하였다. 다음으로 그림 1(b)의 디지털 능동 위상 배열 안테나에 대한 수신 근접전계 시험 구성을 적용하고, 중심 주파수에서 안테나 수신 근접전계를 측정하였다. 프로브를 통해 송신된 신호는 512개 복사소자에서 수신되어 디지털반도체 송수신 조립체로 전달된다. 디지털반도체 송수신 조립체에서는 각 채널별 디지털 송수신 모듈의 RF 회로와 디지털 회로를 거치면서 수신된 아날로그 신호가 디지털 신호로 변환되며 직렬화 과정 후 광 케이블을 통해 디지털 빔형성 조립체로 전달된다. 마지막으로 디지털 빔형성 조립체에서는 미리 저장된 채널별 정렬값 및 가중치 분포와 시험장비에서 명령된 빔 조향값을 적용하여 합성된 수신 빔 패턴 데이터를 출력해 준다. 본 논문의 디지털 능동 위상 배열 안테나는 일반 운용 모드에서 디지털 빔형성 조립



(a) 최종 추출된 채널별 정렬값에 대한 크기/위상
(a) Magnitude/phase for final extracted channel align coefficient



(b) 최종 추출된 채널별 기준 보정값에 대한 크기/위상
(b) Magnitude/phase for final extracted reference calibration coefficient

그림 7. 최종 추출된 채널별 정렬값 및 기준 보정값
Fig. 7. Final extracted align and reference calibration coefficient for each channel.

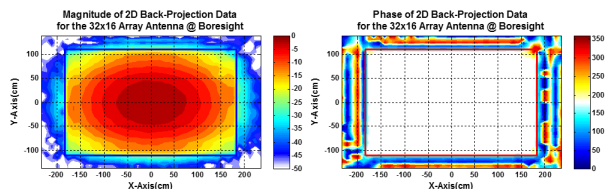
체에 구성된 7개의 광 채널로부터 5개의 주 안테나 빔 패턴과 2개의 부엽 차단 안테나 빔 패턴을 동시에 생성할 수 있도록 하였으며, 레이더 운용 모드에 따라서 훨씬 더 많은 수신 빔을 한 번에 생성할 수도 있다. 따라서 일반 운용 모드에서 수신 시험 시 주파수 또는 빔 조향각을 시나리오로 이용하면, 한 번의 근접전계 측정을 통해 시나리오 개수×7개의 빔 패턴 데이터를 동시에 획득할 수 있게 된다.

능동 위상 배열 안테나의 수신 시험에서는 G/T 혹은 G/N(Ratio between Antenna Gain and System Noise Power) 항목을 검증하기 위해 수신 빔 이득과 시스템 노이즈 값을 알아야 한다. 보정신호 생성 모듈에서 신호를 송신하고 스펙트럼 분석기(Spectrum Analyzer)나 첨두 전력 측정기(Peak Power Meter)를 이용하여 프로브 단에 입력되는 전력을 측정한다. 측정된 프로브 입력 전력을 근접전계 데이터에 보상하고, 변환된 원전계 빔 패턴으로부터 수신 빔 이득을 얻을 수 있다. 다음으로 수신 근접전계 시험과

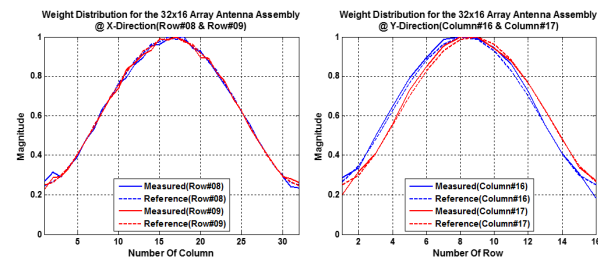
동일한 상태에서 트리거 신호를 인가하여 수신되는 시스템 노이즈를 측정하고, 전력 단위로 환산 후 RMS(Root Mean Square)를 취한다. 이때, 보정신호 생성 모듈에서 신호를 송신하지 않도록 제어해야 한다. 이와 같이 수신 빔 이득과 전력 단위의 RMS 시스템 노이즈를 획득하기 위한 2가지 측정을 수신 근접전계 시험 전/후로 수행하여 평균값을 사용함으로써 시스템 상태 변화 여부를 확인함과 동시에 측정 데이터에 대한 신뢰도를 향상시켰다.

그림 8은 보어사이트에서 측정한 근접전계 데이터로부터 백프로젝션 기법을 통해 안테나 개구면에서의 크기/위상 분포를 계산한 결과이다. 디지털 빔형성 조립체에서 복사소자별 가중치 분포(테일러 30 dB)와 정렬값이 정상적으로 적용되었음을 알 수 있다.

개구면에서의 크기/위상 분포를 통해 채널별 정렬 상태 확인 후 2-2장에서 기술한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 측정된 수신 근접전계 데이터로부터 누설 신호 보정



(a) 백프로젝션 기법을 통해 계산된 안테나 개구면에서의 크기/위상 분포
(a) Calculated magnitude/phase distribution on antenna aperture by back-projection technique



(b) X/Y-축 방향에 대한 측정 및 이상적인 1차원 가중치 분포 비교 결과
(b) Comparison result of measured and ideal 1D weight distribution for X/Y-axis direction

그림 8. 가중치 분포 및 정렬값 적용 결과 @ 안테나 개구면
Fig. 8. Results of applying weight distribution and ch align coefficient @ antenna aperture.

에 대한 필요성을 검토하였다. 그림 9는 근접전계 데이터를 안테나 개구면으로 백프로젝션 한 데이터에서 개구면의 약 120% 영역을 제외한 나머지 영역의 크기/위상에 대한 도수 분포도를 나타낸다. 개구면 영역 이외의 백프로젝션 데이터에서 대부분의 크기는 어느 한 값에 분포해 있으나, 위상은 무작위 특성을 보였다. 이 결과는 노이즈 특성과 매우 유사한 것으로서 누설 신호의 크기가 시스템 노이즈보다 훨씬 작다는 것을 의미하며, 이 경우 누설 신호 추출 오차가 매우 크기 때문에 누설 신호 보정 시 오히려 빔 패턴에 왜곡을 발생시킬 수 있다. 따라서 수신 근접전계 데이터에서는 누설 신호를 제거할 필요가 없을 것으로 판단하였다.

측정된 하나의 수신 근접전계 데이터로부터 각 채널에 미리 저장된 가중치 분포에 따라 동시 생성된 7개의 다중 디지털 수신 빔 형성 결과는 그림 10과 같다. 여기서 빔 인덱스 1~5번은 주 안테나 빔 패턴으로서 조향 명령된 5번 빔을 기준으로 상하/좌우에 4개의 빔이 형성되도록 하였고, 6~7번이 부엽 차단 안테나 빔 패턴에 해당한다. 추가적으로 그림 10(d)로부터 2D 공간상의 전(全) 영역에서 2개의 부엽 차단 안테나 빔 패턴(6~7번)이 주 안테나 빔 패턴(5번)의 부엽을 모두 덮었음을 확인할 수 있다. 또한, 앞서 언급한 것과 같이 프로브에 입력되는 절대 전력을 근접전계 데이터에 반영하여 수신 빔 이득에 대해 빔 패턴을 나타내었으며, 시스템 노이즈를 측정해 G/N을 계산하고, 최종적으로 식 (1)을 이용해 G/T를 도출하였다.

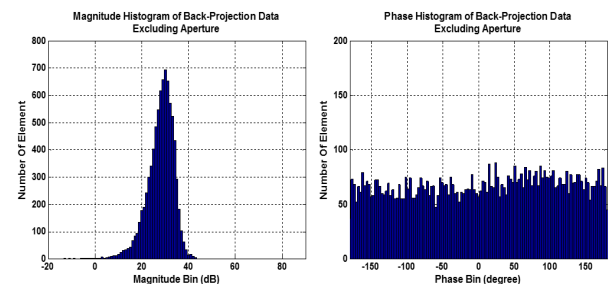
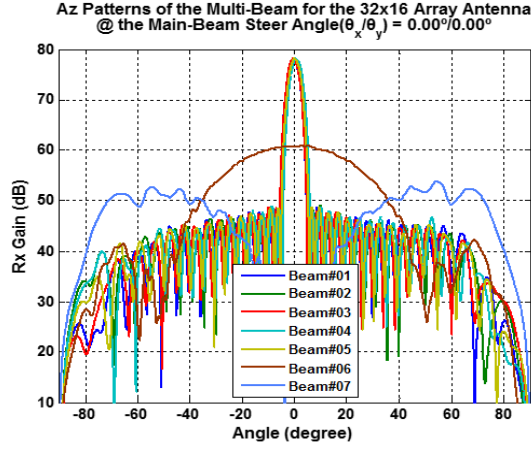
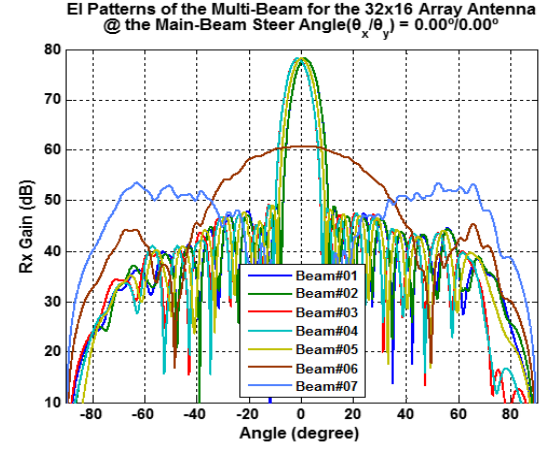


그림 9. 백프로젝션 데이터의 안테나 개구면 이외 영역에 대한 크기/위상 도수 분포도 @ 보어사이트
Fig. 9. Magnitude and phase histogram for back-projection data excluding antenna aperture @ boresight.

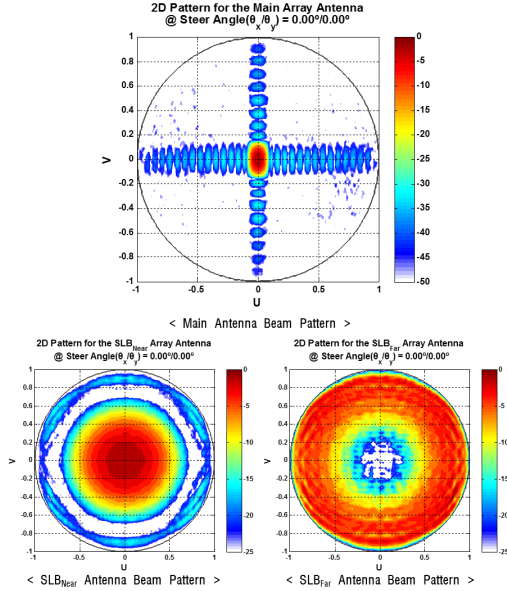
완전 디지털 다기능 레이더에 적용 가능한 능동 위상 배열 안테나의 수신 근접전계 시험



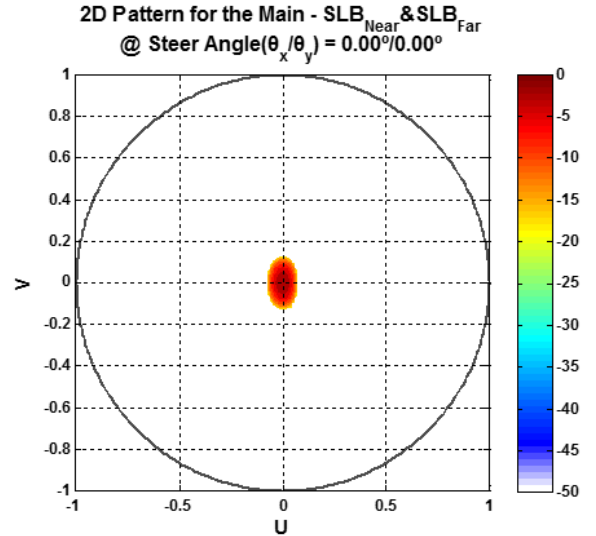
(a) 수신 이득을 반영한 방위각 방향 빔 패턴
(a) Azimuth beam patterns for Rx gain



(b) 수신 이득을 반영한 고각 방향 빔 패턴
(b) Elevation beam patterns for Rx gain



(c) 2D 공간에서의 주 안테나 및 부엽 차단 안테나 빔 패턴
(c) Beam patterns for main antenna and SLB antenna in 2D space



(d) 부엽 차단된 주 안테나 빔 패턴
(d) Side-lobe blanked beam pattern for main antenna

그림 10. 다중 디지털 수신 빔 형성 결과 @ 보어사이트
Fig. 10. Results for multi digital Rx beam formation @ boresight.

시스템 노이즈 전력과 시스템 노이즈 온도 사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$N_{system} = kBT_0F = kBT_{system} \quad (1)$$

여기서 k 는 Boltzmann 상수(1.380658×10^{-23} J/K), B 는 수신

기의 잡음 대역폭, T_0 는 수신기 주변의 절대 온도, F 는 수신기 잡음 지수를 의미한다.

표 1에는 빔 패턴에 대한 측정 결과와 이상적인 값/예측값을 통해 계산한 결과를 비교하였다. 배열 안테나의 복사소자 간 상호 간섭에 의한 개별 소자 패턴의 차이, 레

표 1. 측정 및 이상적인 경우의 안테나 빔 패턴 성능 비교 @ 보어사이트

Table 1. Performance comparison for antenna beam pattern @ boresight.

Item		Ideal results	Measured results
HPBW	Azimuth	4.06°	4.08°
	Elevation	6.96°	6.99°
Max. SLL	2D	-30.26 dB	-28.81 dB
	Azimuth	-30.26 dB	-29.34 dB
	Elevation	-30.30 dB	-29.08 dB
Received beam gain		77.87 dB	78.14 dB
G/N		137.27 dB/dBm	137.73 dB/dBm
G/T		3.44 dB/dBK	3.90 dB/dBK

※ Measured value

System noise: -59.59 dBm, Receiver noise bandwidth: 3 MHz
Receiver gain: 47.3 dB, Receiver noise figure: 2.5 dB.

※ Expected value

Radiator gain: 30.57 dB, receiver room temperature: 290 K.

이동에 의한 개별 소자 패턴의 영향과 채널별 정렬값 및 보정값 적용 시 한정된 비트에 의한 오차, 측정 오차 등의 원인으로 빔폭 및 부엽준위에서 약간의 차이가 발생하였으나, 이상적인 결과와 크게 다르지 않았다.

또한, 수신 빔 이득과 G/N(또는 G/T)의 경우에도 측정값과 예측값 간 오차가 각각 0.27 dB 및 0.46 dB/dBm으로 거의 유사한 결과가 도출되었다. 수신 빔 이득 및 G/N의 예측값 계산 과정에서 측정이 가능한 파라미터는 실측값을 적용하였다.

마지막으로 수신 근접전계 시험 시 시나리오로 적용한 빔 조향각과 측정된 수신 빔 패턴의 조향 결과를 그림 11에 나타내었으며, 제어 명령한 조향 위치에서 다중 수신 빔이 모두 형성되었음을 확인할 수 있다. 여기서 빨간 실선은 능동 위상 배열 안테나에 요구된 빔 조향 범위이다.

3.3 모노펄스 기율기

다기능 레이더를 포함한 다수의 레이더는 표적을 탐지/추적하는데 주로 모노펄스 기율기를 이용하여 표적에 대한 오차각 정보를 추출한다^[7]. 이러한 모노펄스 기율기는

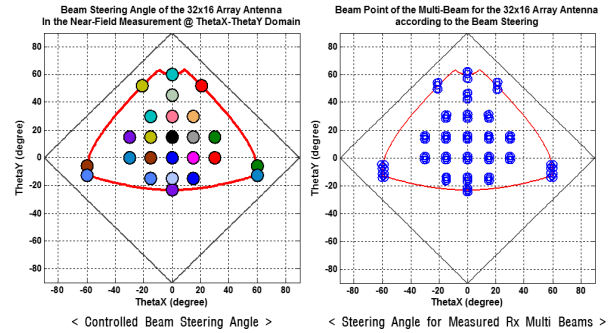


그림 11. 제어 명령 대비 측정된 빔 조향 결과 비교

Fig. 11. Comparison of results for measured beam steering against control commanded beam steering.

안테나의 합 패턴과 탐지/추적 방향(방위각/고각)의 차 패턴으로부터 계산될 수 있다.

본 논문에서는 3-2장에서 측정된 7개의 수신 다중 빔 중 4개(1~4번) 빔을 이용해 식 (2)와 같이 합 패턴과 방위각/고각 방향 차 패턴을 생성하였고, 생성된 패턴 데이터를 식 (3)에 대입하여 모노펄스 기율기를 추출하였다.

$$Patt_{Sum} = E_{\#1} + E_{\#2} + E_{\#3} + E_{\#4} \quad (2-1)$$

$$Patt_{\Delta Az} = -E_{\#1} + E_{\#2} - E_{\#3} + E_{\#4} \quad (2-2)$$

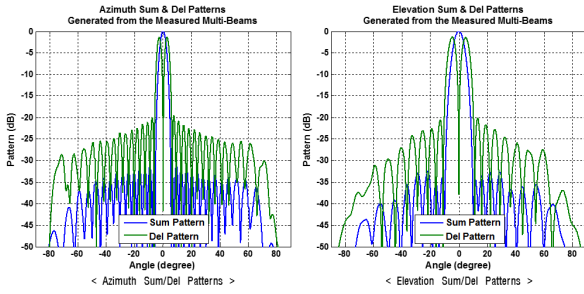
$$Patt_{\Delta El} = E_{\#1} + E_{\#2} - E_{\#3} - E_{\#4} \quad (2-3)$$

$$Monopulse \ Slop_{Az} = \text{real} \left(\frac{Patt_{\Delta Az}}{Patt_{Sum}} \right) \quad (3-1)$$

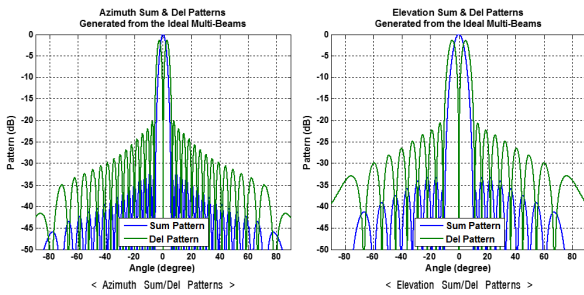
$$Monopulse \ Slop_{El} = \text{real} \left(\frac{Patt_{\Delta El}}{Patt_{Sum}} \right) \quad (3-2)$$

추가적으로, 이상적인 수신 빔 패턴을 이용해 합/차 패턴을 생성하고, 이로부터 모노펄스 기율기를 계산하여 측정 결과와 비교하였다. 그림 12와 그림 13에 보이는 것과 같이 측정 및 이상적인 수신 빔 패턴으로부터 생성된 합/차 패턴과 모노펄스 기율기가 매우 유사하였다.

또한 측정된 모노펄스 기율기와 이상적인 경우의 모노펄스 기율기 차이를 그림 14에 제시하였으며, 방위각/고각 방향 빔폭(4.17°/7.24°) 내에서 모노펄스 기율기 차이가 최대 약 ±0.004°로 매우 작은 수치임을 확인함으로써 측정 데이터로부터 추출한 모노펄스 기율기가 유효함을 검증하였다.



(a) 측정된 수신 빔 패턴으로부터 생성된 합/차 패턴
(a) Sum/difference patterns generated from measured Rx beam patterns



(b) 이상적인 수신 빔 패턴으로부터 생성된 합/차 패턴
(b) Sum/difference patterns generated from ideal Rx beam patterns

그림 12. 수신 다중 빔으로부터 생성된 합/차 패턴 결과 비교

Fig. 12. Results comparison for sum/difference patterns generated from Rx multi beam.

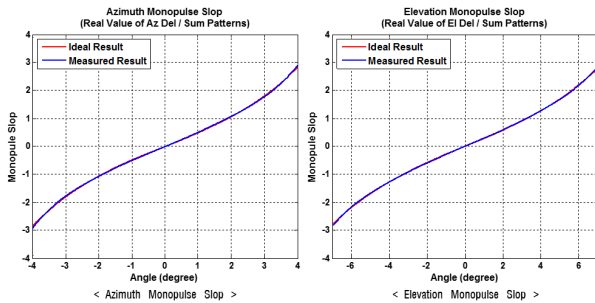


그림 13. 방위각/고각 방향 모노펄스 기울기 결과 비교
Fig. 13. Results comparison for azimuth/elevation monopulse slope.

IV. 결 론

본 논문에서는 다기능 레이더에 적용 가능한 개별 소자 단위의 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나의 수신 빔

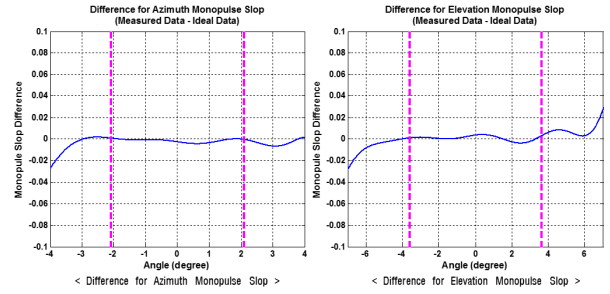


그림 14. 측정 및 이상적인 방위각/고각 방향 모노펄스 기울기 차이

Fig. 14. Difference for azimuth/elevation monopulse slope.

패턴 검증을 위한 근접전계 시험 구성을 제안하였다. 근접전계 시험을 수행하기에 앞서 시뮬레이션을 통해 누설 신호에 의한 안테나 빔 패턴의 영향성에 대해 알아보고, 누설 신호 제거 후의 빔 패턴 오차를 제시하였다.

수신 근접전계 시험에 있어서는 시험 절차에 따른 측정 결과와 주요 검증 항목에 대해 순차적으로 기술하였다. 또한 앞선 시뮬레이션 결과를 바탕으로, 측정된 수신 근접전계 데이터에서 누설 신호를 제거해야 할 필요가 있는지에 대해 판단하였다. 다음으로 근접전계 데이터를 안테나 개구면으로 백프로젝션하여 크기/위상 분포를 통해 채널별 정렬 상태를 확인함으로써 추출된 채널별 정렬값 및 기준 보정값의 유효성과 빔형성 조립체와 안테나 제어 조립체의 정렬 및 보정 기능을 검증하였다. 상대값으로 측정된 7개의 수신 근접전계 데이터에 프로브 입력 전력을 보상하여 원전계 빔 패턴에 곧바로 수신 빔이득이 반영되도록 하였다. 여기에 시스템 노이즈를 측정하여 G/N 과 G/T 를 계산하고, 보어사이트 빔 패턴의 주요 성능에 대해서는 이상적인 결과와 매우 유사함을 보였다. 빔 조향 기능과 다중 수신 빔 형성 기능을 검증하기 위해 근접전계 시험 시 빔 조향각을 시나리오로 적용하였으며, 제어 명령된 모든 빔 조향각에서 다중 빔이 형성되었음을 확인하였다.

마지막으로 형성된 수신 다중 빔 중 일부 채널을 이용해 합 패턴과 방위각/고각 방향의 차 패턴을 생성하고, 모노펄스 기울기를 추출하였다. 마찬가지로 이상적인 경우의 수신 빔 패턴으로부터 합/차 패턴과 모노펄스 기울기를 계산하여 측정 결과와 비교하였다. 그 결과, 합/차 빔

패턴과 모노펄스 기울기 역시 이상적인 결과와 매우 일치했으며, 방위각/고각 방향 빔폭 내 모노펄스 기울기 오차가 최대 ± 0.004 임을 보임으로써 수신 근접전계에 대한 측정 데이터의 유효성을 검증하였다.

References

- [1] S. H. Talisa, K. W. O'Haver, T. M. Comberiate, M. D. Sharp, and O. F. Somerlock, "Benefits of digital phased array radars," in *Proceedings of the IEEE*, Mar. 2016, vol. 104, no. 3, pp. 530-543.
- [2] H. Steyskal, "Digital beamforming: An emerging technology," in *MILCOM 88, 21st Century Military Communications - What's Possible? Conference Record. Military Communications Conference*, San Diego, CA, Oct. 1988, vol. 2, pp. 399-403.
- [3] F. J. Cano-Facila, S. Burgos, and M. Sierra-Castaner, "New methods to reduce leakage errors in planar near-field measurements," in *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP)*, Rome, Apr. 2011, pp. 3581-3585.
- [4] Y. W. Kim, H. D. Chae, J. K. Park, H. G. Na, and M.

H. Jeon, "Measurement technique for the active phased array antenna," in *Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, Mar. 2014, vol. 25, no. 2, pp. 50-59.

- [5] H. Chae, J. M. Lee, Y. W. Kim, H. S. Kim, H. S. Jin, and J. Park, "Near-field receiving measurement of active phased array antenna for full digital radar application," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 7, pp. 625-634, Jul. 2016.
- [6] J. H. Lim, S. J. Park, S. M. Jun, H. S. Jin, K. S. Kim, and T. H. Kum, et al., "Design and fabrication of an L-band digital TR module for radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 11, pp. 857-867, Nov. 2018.
- [7] Y. I. Choi, S. G. Hong, J. H. Ko, J. T. Park, and Y. S. Jang, "A study on amplitude comparison monopulse receiver using digital I/Q," *The Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 55, no. 8, pp. 118-123, Aug. 2018.

주 정 명 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8210-1758>



2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2013년 3월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2013년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원
 [주 관심분야] 수동 및 능동 위상 배열 안테나, 레이더 시스템

임 재 환 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5338-3285>



2004년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
 2006년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2006년 2월~2008년 1월: 삼성전자 무선사업부
 2008년 2월~현재: LIG넥스원 수석연구원
 [주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 송수신기 설계, 반도체 송수신모듈, 디지털 레이더 시스템

황 성 환 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8922-6780>



2005년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 5월~2007년 8월: LG전자 DA사업부 연구원
2007년 8월~현재: LIG넥스원 선임연구원
[주 관심분야] 디지털 하드웨어 설계, 디지털 능동 위상 배열 레이더 시스템, FPGA 설계

FPGA 설계

한 일 탁 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7944-4816>



2006년 2월: 충남대학교 전자전과정정보통신공학부 (공학사)
2008년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2008년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템 및 신호처리, 전자파 전파 및 산란, 전자전파 특성 예측 모델링

박 종 국 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5834-9238>



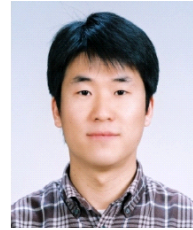
1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
2001년 11월~현재: LIG넥스원 수석연구원

원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 안테나 시스템, 다기능 레이더 시스템, 적응형 빔 형성, 전자파 수치 해석

김 두 수 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1570-1291>



2001년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2006년 1월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 최적화 알고리즘 구현

강 연 덕 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0527-3641>



1993년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 8월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학박사)
2000년 9월~현재: LIG넥스원 연구위원

[주 관심분야] 다기능 레이더 시스템, 초고주파 소자, 전자파 해석

이 동 국 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7372-1218>



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2002년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 다기능 레이더 시스템, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 전자장 수치 해석