The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 22, No. 4, pp.59-65, Aug. 31, 2022. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.4.59
JIIBC 2022-4-9

완전 디지털 능동위상배열 안테나의 효과적인 부엽 차단 빔 형성 방법

An Effective Method to Form Side-Lobe Blanking Beam of Fully Digital Active Phased Array Antenna

주정명*, 박종국*, 임재환*, 이재민*

Joung-Myoung Joo*, Jongkuk Park*, Jae-Hwan Lim*, Jae-Min Lee*

요 약 본 논문에서는 디지털 능동위상배열 안테나를 간략히 소개하고 주 빔의 부엽을 차단하기 위해 적용된 이중 채널 부엽 차단 빔 형성 방법에 대해 기술하였다. 그리고 안테나 주 빔 및 부엽 차단 빔 설계 결과와 안테나 근접전계 측정 결과로부터 안테나 성능을 검증하였다. 다음으로 기존의 이중 채널 부엽 차단 빔 운용 방식 보다 채널수를 줄이기 위해 단일 채널 부엽 차단 빔 형성 방법을 제안하고, 제안한 방법으로 부엽 차단 안테나에 대한 소자별 가중치 분포를 설계하였다. 마지막으로 설계된 단일 채널 부엽 차단 빔 패턴과 차단 능력을 검증하고 이중 채널 부엽 차단 빔과 비교하였다. 또한, 디지털 능동위상배열 안테나의 수신 근접전계 시험을 통해 측정한 이중 채널 부엽 차단 빔과 제안된 단일 채널 부엽 차단 빔 패턴 및 부엽 차단 성능을 비교/검증함으로써 제안된 부엽 차단 빔 형성 방법에 대한 유효성을 확인하였다.

Abstract In this paper, a digital active phased array antenna is briefly introduced and beam forming method for a dual-channel side-lobe blanking applied to blank the side-lobe of the main beam is described. Next, the antenna performance was verified from results of design and antenna near-field measurement for the antenna main beam and side-lobe blanking beam. Then, a single-channel side-lobe blanking beam forming method was proposed to reduce the number of channels than the existing system operating dual-channel side-lobe blanking beam and weight distribution for each element of the side-lobe blanking antenna was designed with the proposed method. Finally, the designed single-channel side-lobe blanking beam pattern and blanking ability were verified and compared with the dual-channel side-lobe blanking beam. In addition, by comparing/verifying the conventional dual-channel and the proposed single-channel side-lobe blanking beam patterns measured through the receiving near-field test of the digital active phased array antenna and their ability to blank side-lobe of the main beam, validity of the proposed method for forming single-channel side-lobe blanking beam was confirmed.

Key Words : SLB Antenna, Side-Lobe Blanking, Fully Digital Active Phased Array Antenna

*정회원, LIG넥스원(주)
접수일자 2022년 5월 30일, 수정완료 2022년 7월 3일
게재확정일자 2022년 8월 5일

Received: 30 May, 2022 / Revised: 3 July, 2022 / Accepted: 5 August, 2022
*Corresponding Author: joungmyoung.joo@lignex1.com
Dept. Microwave and Antenna R&D, LIG Nex1 Co., Ltd, Korea.

Ⅰ. 서 론

표적 탐지를 위해 사용되는 레이다에서 능동위상배열 안테나는 송신기로부터 전력을 전달받아 자유공간상으로 RF(Radio Frequency) 신호를 송신하고, 표적으로부터 되돌아온 신호를 수신하여 수신기에 전달하는 신호 인터페이스 역할을 한다[1]. 다음으로 안테나 주 빔으로 수신된 신호를 분석하여 표적 정보를 획득하게 되는데, 레이다 운용 환경에 의한 클러터 신호나 적의 재밍 신호 등에 의해 여러 간섭 신호가 함께 수신된다. 이때, 표적 신호보다 상대적으로 훨씬 큰 클러터나 재밍 신호가 안테나 주 빔의 부엽에 수신되면 실제 표적 위치를 식별할 수 없거나 허위 표적을 탐지하게 되어 레이다 오경보율이 높아지게 된다[2]. 이러한 오탐지 현상을 방지하기 위해 주 안테나 외에 별도의 보조 안테나를 추가하여 부엽 차단 빔을 운용하게 된다. 특히, 조향 범위가 넓은 능동위상배열 안테나의 경우 빔 조향 시 주 빔의 부엽이 크게 증가하기 때문에 이러한 부엽 차단 안테나는 반드시 필요하다.

최근 하드웨어 기술이 발전함에 따라 레이다에 디지털 능동위상배열 안테나가 적용되는 사례가 증가하고 있으며[3], 이와 같은 안테나 시스템에서는 기존의 아날로그 능동위상배열 안테나와 다르게 부엽 차단 안테나를 위한 시스템을 추가로 구성할 필요가 없다[4]. 디지털 능동위상배열 안테나에서는 소자별 수신 데이터를 합성하여 수신 빔을 형성하므로, 다중빔을 생성하거나 주 안테나의 일부 소자를 이용해 부엽 차단 빔을 형성할 수 있으며, 수신된 광 데이터를 전송하기 위해 수신빔 개수만큼의 광 채널만 추가하면 된다[5~6]. 하지만 광 채널이 늘어나게 되면 그에 따라 비용이 증가하게 되므로 레이다 운용 목적 및 사용 환경에 맞춰 최적화된 빔을 형성하고 시스템을 구성해야 할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 디지털 능동위상배열 안테나에서 이중 채널을 사용해 2개의 부엽 차단 빔을 운용하는 방식에서, 하나의 부엽 차단 빔을 형성하고 운용하는 효과적인 방법을 제안하였다. 이와 같이 제안한 방법을 통해 형성된 단일 채널 부엽 차단 빔 운용 방식은 기존보다 채널수는 줄이면서 부엽 차단 능력은 동일하게 유지할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 디지털 능동위상배열 안테나 및 기존의 이중 채널 부엽 차단 빔 형성 방법에 대해 소개하고, 단일 채널 부엽 차단 빔 형성 방법 및 설계 결과에 대해 기술하였다. 마지막으로 안테나 근접전계 시험을 통해 최종 빔 패턴을 검증하고, 부엽 차단 능력에 대해 기존의 이중 채널 부엽 차단 방식과 비교한 결과를 제시하였다.

Ⅱ. 기존의 부엽 차단 빔 형성

1. 디지털 능동위상배열 안테나 구성

본 논문에서 소개하는 완전 디지털 능동위상배열 안테나는 크게 안테나조립체, 디지털반도체송수신조립체, 디지털빔형성조립체 및 안테나제어조립체로 구성되어, 개별 소자 단위에서 아날로그-디지털 신호 변환이 이루어지며 수신 디지털 빔을 형성하게 된다[5].

먼저, 안테나조립체는 32x16배열로 구성되어 총 512개의 복사소자를 통해 RF 신호를 송수신하는 역할을 하고, 디지털반도체송수신조립체는 128개의 디지털송수신모듈로 구성되며 디지털송수신모듈은 다시 RF 회로와 디지털 회로로 구성되어 있다[4]. 이러한 디지털송수신모듈은 RF-디지털 신호 간 A/D(Analog to Digital) 변환 및 송수신을 담당하며, 이러한 디지털반도체송수신조립체로부터 전달된 디지털 데이터는 디지털빔형성조립체를 통해 소자별 가중치 분포에 따라 원하는 안테나 빔 패턴이 형성된다[6]. 마지막으로 안테나제어조립체는 FPGA(Field Programmable Gate Array) 기반의 보드(Board)들로 구성되어 있으며, 디지털 능동위상배열 안테나를 구성하고 있는 각 조립체 및 일련의 송수신 과정을 제어하는 역할을 한다. 그림 1에 완전 디지털 능동위상배열 안테나의 시스템 구성도 및 신호 흐름을 간략히 나타내었다.

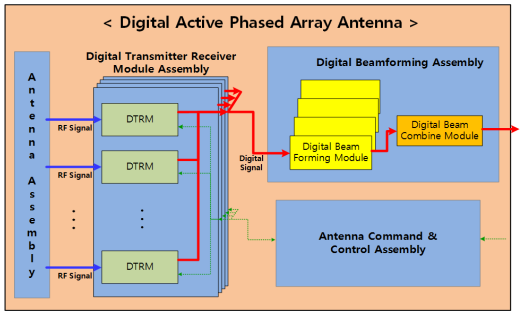
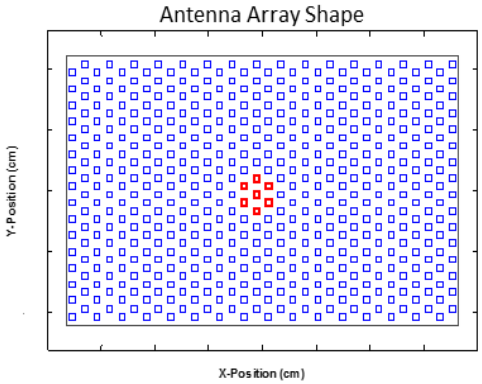


그림 1. 디지털 능동위상배열 안테나 구성도 및 신호 흐름도
Fig. 1. Configuration and signal flow for digital active phased array antenna

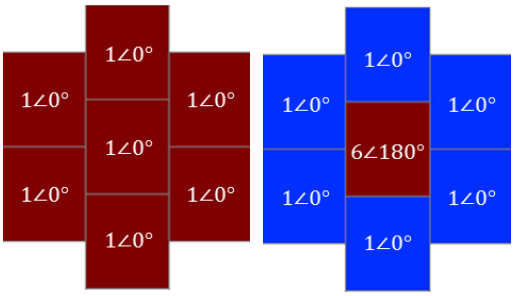
2. 이중 채널 부엽 차단 안테나 설계 결과

앞서 소개한 디지털 능동위상배열 안테나에서 주 빔의 부엽을 모두 덮기 위해 그림 2. (a)와 같은 부엽 차단 안

테나를 구성하였다. 완전 디지털 능동위상배열 안테나는 소자 단위로 수신한 디지털 데이터를 이용해 수신빔을 형성하기 때문에 부엽 차단을 위한 별도의 안테나 시스템을 추가할 필요가 없다. 따라서 주 안테나를 구성하는 배열 소자 중 일부 소자를 이용해 부엽 차단 빔을 형성할 수 있으며, 여기서는 총 512개 소자에서 7개 소자만을 사용하였다. 주 빔 패턴의 부엽을 모두 차단하기 위해 근거리 및 원거리 부엽을 각각 차단하는 이중 채널 부엽 차단 빔 운용 시스템을 구성하였으며[4], 각각의 부엽 차단 안테나에 대한 소자별 가중치 분포 설계 결과를 그림 2. (b)에 나타내었다.



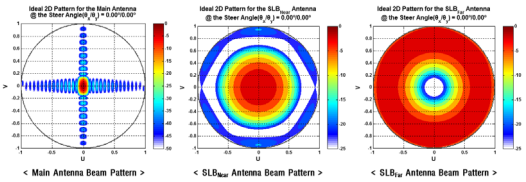
(a) 디지털 능동위상배열 안테나 및 부엽 차단 안테나 형상
(a) Antenna structure for digital phased array & SLB



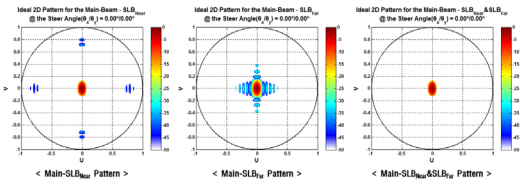
(b) 근거리 및 원거리 부엽 차단 안테나 가중치 분포
(b) Weight distribution for Near & Far SLB antennas

그림 2. 안테나 형상 및 이중 채널 부엽 차단 안테나 가중치 분포 설계 결과
Fig. 2. Design results for the antenna structure and weight distribution of dual channel side-lobe blanking antennas

설계된 2개의 부엽 차단 안테나에 대한 차단 능력 검증을 위해 능동위상배열 안테나 주 빔과 비교한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3. (a)는 능동위상배열 안테나의 주 빔 및 근거리/원거리 부엽 차단 안테나 빔 패턴에 대한 설계 결과이며, 그림 3. (b)는 주 빔에서 각각의 부엽 차단 빔에 의해 차단되는 영역을 제외한 나머지 영역을 표현한 결과이다. 보이는 것과 같이 2D 공간상의 전 영역에서 근거리 및 원거리 부엽 차단 안테나 빔에 의해 주 빔의 부엽이 모두 차단됨을 확인하였다.



(a) 안테나 주 빔 및 부엽 차단 빔 패턴 설계 결과
(a) Design results of beam pattern for main & SLB antennas



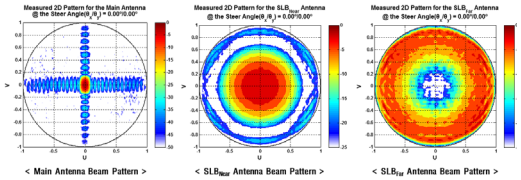
(b) 부엽 차단된 주 안테나 빔 패턴 결과
(b) Results of side-lobe blanked beam patterns for main antenna

그림 3. 이중 채널 부엽 차단 안테나 빔 패턴 설계 및 성능 결과
Fig. 3. Design results of beam pattern and performance for dual channel side-lobe blanking antennas

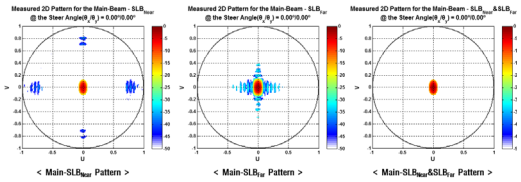
3. 이중 채널 부엽 차단 안테나 시험 결과

다음으로 디지털 능동위상배열 안테나의 수신 근접전계 시험을 통해, 설계된 주 안테나와 이중 채널 부엽 차단 안테나의 빔 패턴을 측정하고 성능을 검증하였다.

먼저, 디지털빔형성조립체의 메모리에 저장된 주 안테나 수신빔과 근거리 및 원거리 부엽 차단용 빔에 대한 소자별 가중치 분포와 소자별로 수신된 디지털 데이터를 이용해 수신빔이 동시에 형성될 수 있도록 하였다. 따라서 여기서는 3개의 광 데이터 전송 채널이 필요하며, 이 데이터로부터 디지털 수신빔 형성 결과를 확인하였다. 그림 4. (a)는 Ⅱ-2절의 그림 3. (a)와 마찬가지로 수신 근접전계 시험을 통해 획득한 안테나의 주 빔 및 이중 채널 부엽 차단 안테나 빔 패턴에 대한 측정 결과를 나타내며, 그림 4. (b)는 주 빔에서 근거리 및 원거리 부엽 차단 빔에 의해 차단되는 영역을 제외한 나머지 영역을 나타낸 결과이다. 3개의 빔 패턴에 대한 측정 결과가 앞선 설계 결과와 일치함을 확인할 수 있다.



(a) 안테나 주 빔 및 부엽 차단 빔 패턴 측정 결과
(a) Measured Results of beam pattern for main & SLB antennas



(b) 부엽 차단된 주 안테나 빔 패턴 결과
(b) Results of side-lobe blanked beam patterns for main antenna

그림 4. 이중 채널 부엽 차단 안테나 빔 패턴 측정 및 성능 결과
Fig. 4. Measured results of beam pattern and performance for dual channel side-lobe blanking antennas

Ⅲ. 제안된 부엽 차단 빔 형성

1. 단일 채널 부엽 차단 안테나 설계 결과

Ⅱ장에서는 완전 디지털 능동위상배열 안테나의 일부 소자를 이용하여 부엽 차단 빔을 형성하는 방법에 대해 소개하였다. 부엽 차단 안테나를 구현하기 위한 별도의 시스템은 요구되지 않지만, 앞서 언급한 것과 같이 주 빔의 부엽을 차단하기 위해 근거리 및 원거리 부엽 차단 빔을 사용하므로 2개의 광 채널을 필요로 한다.

본 논문에서는 이러한 이중 채널 부엽 차단 빔을 이용하여 하나의 부엽 차단 빔을 형성하고 주 빔의 모든 부엽을 차단하는 방법에 대해 소개하고자 한다. 이와 같이 단일 채널 부엽 차단 빔을 운용하면 이중 채널 부엽 차단 운용 방식에 비해 광 채널을 줄일 수 있고, 이는 곧 시스템 부하를 줄이고 비용 절감 효과로 이어지게 된다. 또한 절약한 광 채널을 다른 수신빔 형성에 이용할 수도 있다.

주 안테나 빔의 부엽을 모두 차단할 수 있는 하나의 부엽 차단 빔을 형성하기 위해, Ⅱ장의 근거리 부엽 차단 빔과 원거리 부엽 차단 빔 간 90° 위상차를 주어 합성했다. 형성된 단일 채널 부엽 차단 빔에 대한 소자별 가중치 분포를 그림 5에 나타내었다.

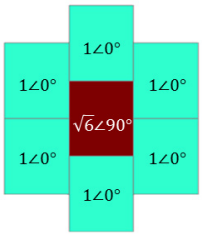


그림 5. 단일 채널 부엽 차단 안테나 가중치 분포 설계 결과
Fig. 5. Design result for weight distribution of single channel side-lobe blanking antenna

보어사이트에 대한 주 안테나 빔 패턴 및 단일 채널 부엽 차단 빔 패턴은 그림 6과 같으며, 이중 채널 부엽 차단 빔 결과(그림 3 참조)와 마찬가지로 2D 공간상에서 주 빔의 부엽이 모두 차단됨을 확인할 수 있었다.

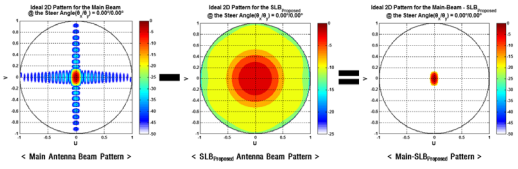


그림 6. 단일 채널 부엽 차단 안테나 빔 패턴 설계 및 성능 결과
Fig. 6. Design results of beam patterns and performance for single channel side-lobe blanking antenna

그림 7에는 설계된 주 안테나와 이중 채널 및 단일 채널 부엽 차단 안테나에 대한 방위각/고각 방향 빔 패턴을 나타내었다. 제안한 단일 채널 부엽 차단 빔 패턴이 근거리 및 원거리용 부엽 차단 빔의 포락선(Envelope) 형상과 유사함을 알 수 있다.

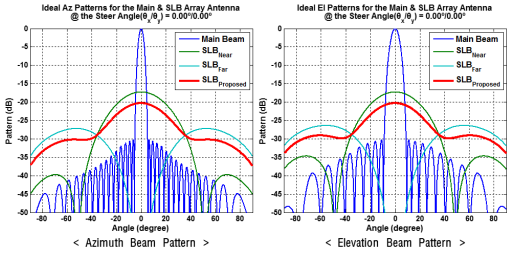


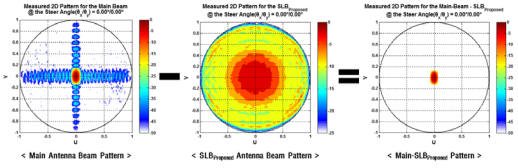
그림 7. 이중 채널 및 단일 채널 부엽 차단 빔 패턴 비교
Fig. 7. Comparison of beam patters for dual & single channel side-lobe blanking antennas

이 포락선의 최대치 대비 단일 채널 부엽 차단 빔 이득이 약 3dB 정도 낮지만, 이중 채널 부엽 차단 빔의 차단 마진(Margin)이 충분하기 때문에 디지털 능동위상배열 안테나 주 빔의 부엽을 모두 차단하는 데에는 문제가 없다.

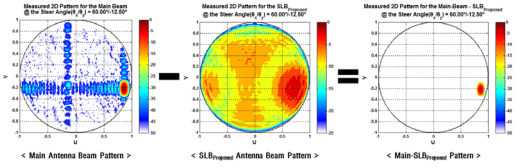
2. 단일 채널 부엽 차단 안테나 시험 결과

마지막으로, 수신 근접전계 시험에서 획득한 디지털 능동위상배열 안테나의 주 빔 및 이중 채널 부엽 차단 빔에 대한 실제 측정 데이터를 이용해, 본 논문에서 제안한 단일 채널 부엽 차단 빔 형성 방법의 유효성을 검증하였다.

앞서 언급한 것과 같이 Ⅱ-3절의 그림 4. (a)에 나타낸 근거리 및 원거리 부엽 차단 빔 패턴 데이터에서 원거리 부엽 차단 빔에 90° 위상 지연 후 근거리 부엽 차단 빔과 합성하였다. 형성된 단일 채널 부엽 차단 빔의 보어사이트 및 본 디지털 능동위상배열 안테나의 최대 조향각인 60°/-12.5°(θ_x/θ_y)로 조향된 패턴을 그림 8에 나타내었다. 보어사이트 경우뿐 아니라 빔 조향된 경우에 대해서도 제안된 단일 채널 부엽 차단 빔에 의해 주 빔의 부엽이 모두 차단됨을 확인할 수 있다.



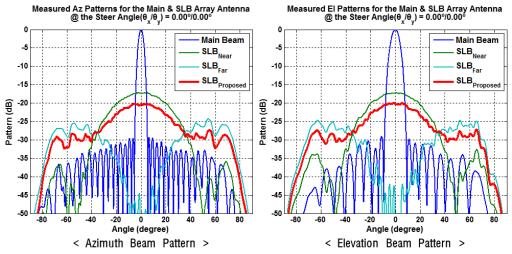
(a) 주 빔 및 단일 채널 부엽 차단 빔 패턴 @ 보어사이트
(a) Beam patterns for main & single channel SLB antennas @ Boresight



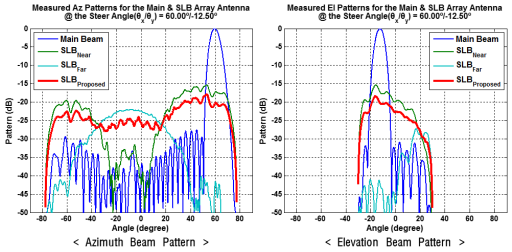
(b) 주 빔 및 단일 채널 부엽 차단 빔 패턴 @ 60°/-12.5°(θ_x/θ_y)
(b) Beam patterns for main & single channel SLB antennas @ 60°/-12.5°(θ_x/θ_y)

그림 8. 단일 채널 부엽 차단 안테나 빔 패턴 측정 및 성능 결과
Fig. 8. Measured results of beam patterns and performance for single channel side-lobe blanking antenna

이중 채널 부엽 차단 빔과 제안된 단일 채널 부엽 차단 빔 패턴 및 차단 능력을 동시에 비교하기 위해, 그림 8에 보인 보어사이트 및 최대 빔 조향된 경우에 대해 방위각/고각 방향 빔 패턴을 각각 제시하였다. 앞서 보인 그림 7의 설계 결과와 그림 9의 측정 결과가 매우 유사하며, 측정 결과에서도 이중 채널 부엽 차단 빔의 포락선에 대한 최대치와 단일 채널 부엽 차단 빔의 이득 간 약 3dB 차이를 보였다.



(a) 이중 채널 및 단일 채널 부엽 차단 빔 패턴 @ 보어사이트
(a) Beam patterns for dual & single channel SLB antennas @ Boresight



(b) 이중 채널 및 단일 채널 부엽 차단 빔 패턴 @ 60°/-12.5°(θ_x/θ_y)
(b) Beam patterns for dual & single channel SLB antennas @ 60°/-12.5°(θ_x/θ_y)

그림 9. 빔 조향에 따른 이중 채널 및 단일 채널 부엽 차단 빔 패턴 비교
Fig. 9. Comparison of beam patters for dual & single channel side-lobe blanking antennas according to the beam steering

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 먼저 완전 디지털 능동위상배열 안테나에서 주 빔의 부엽을 차단하기 위해 구현한 기존의 이중 채널 부엽 차단 빔 형성 방법 및 설계/측정 결과에 대해 소개하였다. 하지만 이와 같이 근거리 및 원거리용 부엽 차단 빔을 운용하는 방식은 빔 개수만큼의 광 채널이 요구되며, 이것은 곧 비용 증가로 연결된다. 따라서 기존의 이중 채널 부엽 차단 빔을 이용하여 하나의 단일 채널 부엽 차단 빔을 형성하는 방법에 대해 제안하였다.

다음으로 제안한 방법에 따라 소자별 크기/위상 가중치 분포를 설계하고, 형성된 부엽 차단 빔 패턴 및 주 빔의 부엽 차단 능력에 대한 M&S 결과를 제시하였다. 그 결과 이중 채널 부엽 차단 빔과 같이 2D 공간상에서 주 빔의 부엽을 모두 차단함을 확인할 수 있었다.

마지막으로 완전 디지털 능동위상배열 안테나의 수신 근접전계 시험을 통해 확보한 측정 데이터를 이용해 단일 채널 부엽 차단 빔을 형성하고, 설계 결과와 비교/검증하였다. 또한, 측정 데이터를 통해 보어사이트뿐 아니라 빔 조향된 경우에 대해서도 이중 채널 부엽 차단 안테나와의 빔 패턴 및 차단 능력을 비교함으로써 제안한 단일 채널 부엽 차단 빔 형성 방법에 대한 유효성을 검증하였다.

References

[1] Jong-Hyuk Joo, Woo-Young Song, "A Study on the Beam Pattern Compensation for Target Estimation", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 273-278, July 2009.

[2] Kwan-Hyeong Lee, "A Study on Overlapped Adaptive Subarray Beamforming LCMV Method for Decrease Side Lobe Level", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 57-62, Apr 2011.

[3] Se-Woong Kwon, Sung-Min Hong, Seong-Hyun Ryu, Chae-Hyun Jung, Sung-Hwan Sohn, Ki-Won Lee, Yeon-Duk Kang, "A Performance Enhancement of a Naval Multi-Function Radar Signal Processor", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 20, No. 2, pp. 141-147, Apr 2020.
DOI: https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.2.141

[4] JoungMyoung Joo, JaeMin Lee, Jongkuk Park, Hyung-Suk Jin, Yeon-Duk Kang, Il-Tak Han, Doo-Soo Kim, Dong-Kook Lee, "A Study of Dual Channel Side-Lobe Blanking Beam Pattern Formation Optimized for Digital Active Phased Array Antennas of Multi-Function Radar Systems", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 31, No. 1, pp. 62-71, Jan 2020.
DOI: https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.1.62

[5] JoungMyoung Joo, Jae-Hwan Lim, Sung-Hwan Hwang, Jongkuk Park, Yeon-Duk Kang, Il-Tak Han, Doo-Soo Kim, Dong-Kook Lee, "Receiving Near-Field Measurement of Active Phased Array Antennas Applicable to Full-Digital Multifunction Radars", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 31, No. 2, pp. 188-199, Feb 2020.
DOI: https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.2.188

[6] Sung-Hwan Hwang, HanSaeng Kim, Jae-Hwan Lim, JoungMyoung Joo, KiWon Lee, MinSang Kwon, Woo-Sung Kim, "Design of Real-Time Digital Multi-Beamformer of Digital Array Antenna System for MFR", Journal of the Korean Institute of Military Science and Technology, Vol. 25, No. 2, pp. 151-159, Apr 2022.
DOI: https://doi.org/10.9766/KIMST.2022.25.2.151

저 자 소 개

주 정 명(정회원)

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

박 종 국(정회원)

- 1995년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학석사)
- 2001년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부(공학박사)
- 2001년 11월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원
- 주 관심분야 : 능동 위상 배열 안테나 시스템, 다기능 레이다 시스템, 적응형 빔 형성, 전자파 수치 해석

임 재 환(정회원)

- 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 레이다 시스템

이 재 민(정회원)

- 2011년 2월 : 경기대학교 전자공학부 (공학사)
- 2013년 3월 : 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임 연구원
- 주 관심분야 : 능동 위상 배열 안테나 설계, 레이다 시스템, 위성용 SAR 안테나