

고차 고조파 방사가 억제된 능동위상배열안테나 설계

Design of an Active Phased-Array Antenna
with Suppressed High-Order Harmonics Radiation정 태 용¹ · 이 동 근² · 황 금 철³Taeyong Jeong¹ · Dong Geun Lee² · Keum Cheol Hwang³

요 약

본 논문에서는 비선형 레이더 시스템에 적용 가능한 능동위상배열 안테나 설계를 제안한다. 제안된 배열 안테나의 동작 주파수는 3~3.2 GHz이며, 크기는 5×5 삼각 격자로 구성되어 있다. 배열 안테나의 급전 부분에 coaxial type의 저역 통과 필터를 삽입하여 2차 고조파에 의한 방사를 억제하였다. 동작 주파수 대역에서의 측정된 단일 복사 소자 최대 이득은 5.42 dBi이며, 고조파 대역에서의 이득은 -28.85 dBi이다. 동축 선로와 전력 분배기의 손실이 보상된 배열 안테나의 보상된 이득과 시뮬레이션 이득은 각각 19.2 dBi, 19.3 dBi이다.

Abstract

In this paper, we propose an active phased-array antenna design applicable to nonlinear radar systems. The operating frequency of the array antenna is 3~3.2 GHz, and the antenna comprises a triangular grid with a size of 5×5. A coaxial-type low-pass filter is inserted into the feeding part of the array antenna to suppress radiation from the second harmonic. The measured maximum gain of a single radiating element in the operating frequency band is 5.42 dBi, and the gain in the harmonic band is -28.85 dBi. The calibrated and simulated gains of the array antenna, which are compensated for the loss of the coaxial line and the power dividers, are 19.2 dBi and 19.3 dBi, respectively.

Key words: Active Phased Array Antenna, Nonlinear Radar, Harmonic Suppression

I. 서 론

전통적인 레이더 기술은 target에 강력한 전자기파를 인가하여 반사되는 신호를 탐지하여 target의 존재 여부를 판단하는 방식으로 발전되어 왔다. 그러나, 반도체 집적 기술의 발달로 다양한 전자 위협 장비가 소형화되고 은

닉하기에 쉬워지면서 기존의 전통적인 레이더를 활용하여 위협 장비를 식별하기가 어려워지고 있다^[1]. 비선형 레이더는 은닉된 전자 장비의 안테나에 전자기파를 입사시켜 은닉된 장비에 내장된 능동소자를 여기 시킴으로써 발생된 고조파를 수신 및 탐지하는 레이더이다^[1]. 그러나, 송신용 안테나의 동작 대역 이외의 고조파 성분이 인접

「이 연구는 2020년 국방과학연구소 미래도전국방기술 연구개발사업(No.912902601)의 지원을 받았음.」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

1: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-4779-937X>), 2: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-7279-6197>),

3: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-8074-1137>)

· Manuscript received July 14, 2022 ; Revised August 15, 2022 ; Accepted August 30, 2022. (ID No. 20220714-006S)

· Corresponding Author: Keum Cheol Hwang (e-mail: khwang@skku.edu)

한 수신용 안테나에 수신될 경우, 레이더의 탐지 성공 확률을 떨어트릴 수 있다^[2]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 RF front-end 단계 필터를 추가시켜 동작 대역 이외의 신호를 억제할 수 있으나 필터와 안테나 사이에 추가적인 매칭 네트워크를 필요하게 되어 시스템 크기가 커지게 된다. 따라서, 본 논문에서는 단일 복사 소자의 급전 부분에 저역통과 필터를 일체화시킨 고조파 억제 안테나를 설계 및 제작하였으며, 이를 기반으로 삼각 격자 형태의 5×5 배열 안테나를 설계 및 제작하여 active S-parameter, 안테나 이득을 측정하였다.

II. 단일 복사 소자 설계 및 측정

그림 1은 배열 안테나를 구성하는 단일 복사 소자의 입체도를 보여주고 있다. 참고문헌^[3]을 활용하여 단일 복사 소자를 설계하였으며, 방위각/고각 $\pm 45^\circ$ 조향 시 grating lobe 회피를 위해서 dx 와 dy 는 54.37 mm, 50.62 mm로 결정하였다. 사용된 기판은 TLE-95($\epsilon_r = 2.95$)이며, 두께는 1.27 mm이다. 필터 구조를 감싸고 있는 테플론($\epsilon_r = 2.1$)과 도체의 두께는 모두 0.5 mm이다. 설계된 필터는 0.1 dB 리플을 가지는 Chebyshev 6차 필터이며, 차단주파수가 3.6 GHz가 되도록 설계되었다. 이외의 설계 파라미터는 표 1을 통하여 제시한다.

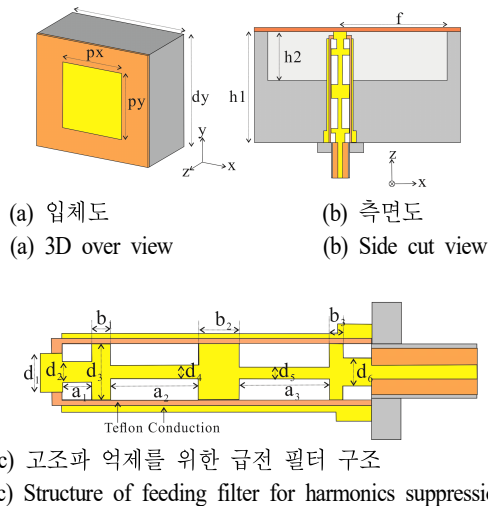


그림 1. 단일 복사 소자 구조

Fig. 1. Structure of radiating element.

그림 2는 필터 삽입 유/무에 따른 단일 복사 소자의 S_{11} 및 최대 이득을 보여주고 있으며, 그림 3은 동작대역과 고조파 대역의 방사 패턴을 보여주고 있다. 필터가 삽입되지 않는 복사 소자가 2차 고조파 대역에서 공진이 발생하였으며 동작 이외의 대역에서 높은 세기의 방사가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 표 2를 통하여 필터 삽입 유/무에 따른 시뮬레이션 및 측정 결과에 대하여 정량적으로 제시한다. 동작 대역에서 필터의 삽입 손실로 인하여 복사 소자의 이득이 감소하였으나, 고조파 구간에서 측정

표 1. 단일 복사 소자 설계 파라미터(단위: mm)

Table 1. Design parameters of a radiating element (unit: mm).

px	28.8	a_1	2.6	b_3	1.2	d_5	1
py	29.8	a_2	8	d_1	3.4	d_6	2.4
h_1	29.2	a_3	8	d_2	1.7		
h_2	12.7	b_1	1.6	d_3	5		
f	28.3	b_2	3.5	d_4	1.2		

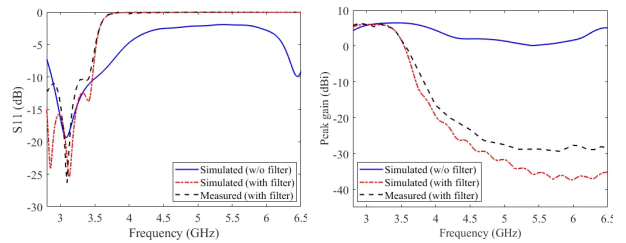


그림 2. 제안된 단일 복사 소자 S_{11} 및 peak gain

Fig. 2. S_{11} and peak gain of proposed radiating elements.

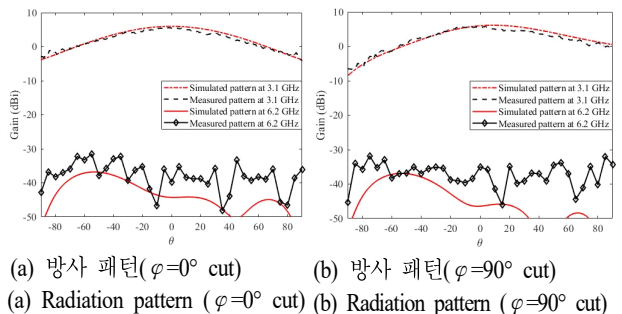


그림 3. 시뮬레이션 및 측정된 단일 복사 소자 방사 패턴

Fig. 3. Simulated and measured radiation pattern of radiating element.

표 2. 필터 삽입 유무에 따른 단일 복사 소자 특성(S_{11} , gain)

 Table 2. Characteristics of a radiating element with or without filter insertion (S_{11} , gain).

	S_{11} (< -10 dB)	Gain at 3.1 GHz	Gain at 6.2 GHz
Simul. ant. w/o filter	2.87~3.54 GHz	6.14 dBi	3.09 dBi
Simul. ant. with filter	2.76~3.46 GHz	5.98 dBi	-36.59 dBi
Meas. ant. with filter	2.74~3.42 GHz	5.42 dBi	-28.85 dBi

값 기준 31 dB 억제하는 것을 확인할 수 있다.

III. 배열안테나 설계 및 측정

그림 4는 제안된 능동위상배열 안테나의 형상을 보여주고 있다. 복사 소자 간격 dx , dy 는 54.37 mm, 50.62 mm이며, 배열 환경은 삼각 격자이다. 안테나 총면적 mx , my 는 359.4 mm, 309.72 mm이다.

그림 5는 제안된 배열 안테나의 빔 조향 각도 방위각/고각 45° 조향 시 중심 주파수 3.1 GHz에서 이득 변화를 보여주고 있다. Boreishgt에서의 시뮬레이션 이득은 19.3 dBi이며, 방위각 $\pm 45^\circ$ 조향 시 이득은 17.35 dBi, 17.94 dBi이다. 고각 $\pm 45^\circ$ 조향 시 이득은 모두 17.66 dBi이다.

그림 6은 조향 각도 변화에 따른 제안된 안테나의 active S -parameter 결과를 보여주고 있다. 식 (1)을 활용하여 배열 소자의 중심 소자(13번 소자)에 대한 active S -parameter를 계산하였다. 여기서, x_n 과 y_n 은 소자의 배열 위치, θ_0 과 ϕ_0 는 조향하는 각도, $S_{13,n}$ 은 13번 소자와 인접 소자 간 결합 계수, k 는 자유공간에서의 wave number를 의미한다. 시뮬레이션 및 측정된 결과의 경향성

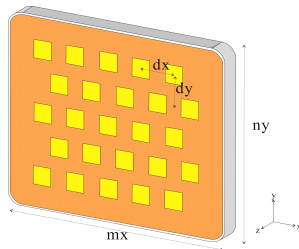
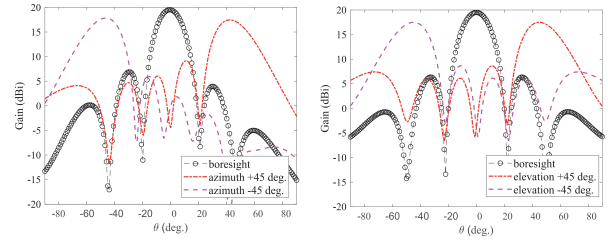


그림 4. 제안된 능동위상배열 안테나 구조

Fig. 4. Structure of proposed active phased array antenna.


 (a) 방사 패턴 ($\varphi=0^\circ$)

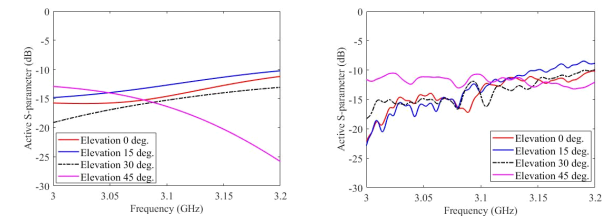
 (b) 방사 패턴 ($\varphi=90^\circ$)

 (a) Radiation pattern ($\varphi=0^\circ$)

 (b) Radiation pattern ($\varphi=90^\circ$)

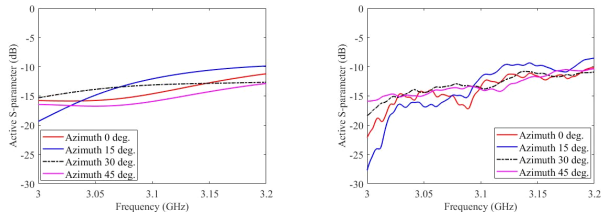
그림 5. 제안된 배열안테나 시뮬레이션 방사 패턴

Fig. 5. Simulated radiation pattern of proposed array antenna.


 (a) 시뮬레이션 active S -parameter (고각 조향)

 (b) 측정된 active S -parameter (고각 조향)

 (a) Simulated active S -parameter (elevation scan)

 (b) Measured active S -parameter (elevation scan)

 (c) 시뮬레이션 active S -parameter (방위각 조향)

 (d) 측정된 active S -parameter (방위각 조향)

 (c) Simulated active S -parameter (azimuth scan)

 (d) Measured active S -parameter (azimuth scan)

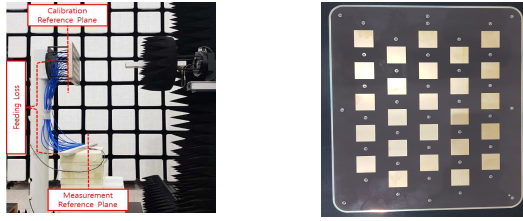
 그림 6. 제안된 배열안테나의 시뮬레이션 및 측정된 active S -parameter

 Fig. 6. Simulated and measured active S -parameter of proposed array antenna.

이 비슷하며, 두 결과 모두 우수한 active S -parameter가 확보됨을 확인할 수 있다.

$$\Gamma_{13} = \sum_{n=1}^{25} S_{13,n} \cdot e^{-jk(x_n \sin \theta_0 \cos \phi_0 + y_n \sin \theta_0 \sin \phi_0)} \quad (1)$$

그림 7은 제안된 배열 안테나의 근접 전계 시험을 통한



(a) 근접 전계 측정환경 (b) 제작된 배열안테나
(a) Environment of near-field scan (b) Fabricated array antenna

그림 7. 제안된 배열 안테나 방사 패턴 측정 환경 및 제작
Fig. 7. Fabrication and measurement environment to acquire radiation pattern of proposed array antenna.

방사 패턴 측정환경 및 제작된 형상도를 보여주고 있다. 제안된 배열 안테나를 동시 급전시키기 위하여 7개의 50-Ω 정합과 25개의 동축선로가 결합된 32채널 전력분배기가 활용되었다. 25 채널 전력분배기를 활용할 경우 이론상 각 포트별로 -13.98 dB의 신호가 전달되지만, 32채널 전력분배기를 활용할 경우 -15.05 dB가 전달되며, 이외에도 실제 분배기와 동축선로가 가지고 있는 ohmic loss를 고려하면 더 작은 신호가 급전되게 된다. 정확한 이득을 측정하기 위해서는 분배기 채널 개수에 따른 분배 및 ohmic loss가 보상되어야 한다. 식 (2)는 사용된 7개의 50-Ω 정합과 25개의 동축선로가 결합된 32채널 전력분배기와 이상적인 25채널 전력분배기 전달 신호 차이를 나타내며, 이를 average feeding loss(AFL)라고 정의하였다.

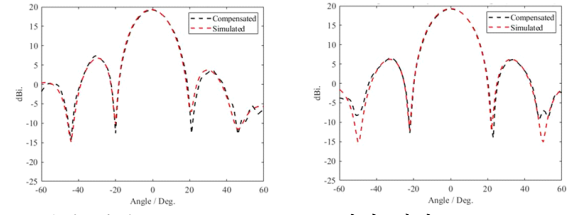
$$\text{AFL} = 10 \log \left(\frac{1}{25} \right) - \frac{\sum_{k=1}^{25} (S_{k,1})_{dB}}{25} \quad (2)$$

그림 8과 표 3은 식 (3)을 활용하여 AFL이 보상된 방사 패턴과 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 3.1 GHz에서 시뮬레이션 이득이 19.3 dBi이며, 보상된 이득은 19.2 dBi로 두 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 고조파 이득은 근접 전계 프로브가 감지하기에 방사되는 신호의 크기가 매우 작아 시뮬레이션 값으로 대체하였다.

$$\text{Compensated gain} = \text{Measured gain} + \text{AFL} \quad (3)$$

IV. 결 론

본 논문에서는 고조파 억제 가능한 단일 복사 소자를 기반으로 5×5 배열 안테나를 설계하고, active S-parameter,



(a) 방사 패턴($\varphi=0^\circ$) (b) 방사 패턴($\varphi=90^\circ$)
(a) Radiation pattern ($\varphi=0^\circ$) (b) Radiation pattern ($\varphi=90^\circ$)

그림 8. 시뮬레이션 및 보상된 방사 패턴 비교($f=3.1$ GHz)
Fig. 8. Comparison of simulated and compensated radiation patterns ($f=3.1$ GHz).

표 3. 제안된 안테나의 측정된 이득 및 평균 급전손실
Table 3. Measured gain and average feeding loss of proposed array antenna.

Frequency [GHz]	Measured gain [dBi]	AFL [dB]	Compensated gain [dBi]	Simulated gain [dBi]
3	16.0	3.1	19.1	19.3
3.1	16.2	3.0	19.2	19.3
3.2	15.8	3.1	18.9	19.4
6.2	-	-	-	-26.2

방사 패턴의 시뮬레이션과 측정값을 비교하였다. 두 결과가 일치함에 따라 제안된 안테나는 비선형 레이다 등 고조파 억제 시스템에 활용 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] G. J. Mazzaro, "Nonlinear junction detection vs. electronics: System design and improved linearity," in *2020 IEEE International Radar Conference(RADAR)*, Washington, DC, Apr. 2020, pp. 654-658.
- [2] G. J. Mazzaro, A. F. Martone, K. I. Ranney, and R. M. Narayanan, "Nonlinear radar for finding RF electronics: System design and recent advancements," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 5, pp. 1716-1726, May 2017.
- [3] J. Yun, S. Trinh-Van, J. Y. Park, Y. Yang, K. Y. Lee, and K. C. Hwang, "Cavity-backed patch filtenna for harmonic suppression," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 221580-221589, Dec. 2020.