

비선형레이다 수신부용 동축선로 대역통과 필터일체형

Cavity-Backed 패치 안테나

Cavity-Backed Patch Antenna with Coaxial Line Band-Pass Filter for Nonlinear Radar Receiver

김 준 희¹ · 정 태 용² · 황 금 철³Jun Hee Kim¹ · Taeyong Jeong² · Keum Cheol Hwang³

요 약

본 논문에서는 비선형레이다 수신부용 동축선로 대역 통과 필터 일체형 cavity-backed 패치 안테나를 제안한다. 제안된 안테나의 동작 주파수는 6~6.4 GHz이며, cavity-backed 패치 안테나의 급전부인 동축선로 내에 7단 Chebyshev 응답 특성을 활용하여 저역 통과 필터를 구현한 후 평판형 유전체를 직렬구조로 추가함으로써 목표된 억제 주파수 대역인 3~3.2 GHz 대역에서 약 -32 dB 응답특성을 갖는 대역 통과 필터를 구현하였다. 동작 주파수 대역에서의 측정된 안테나 이득은 최대 6.03 dBi이며, 목표된 억제 주파수 대역에서 약 -51.81 dBi 수준으로 필터가 존재하지 않을 경우의 이득인 -15.05 dBi 대비 약 36.7 dB 수준의 억제 특성을 갖는다.

Abstract

This paper proposes a cavity-backed patch antenna with a coaxial line band-pass filter for nonlinear radar applications. The proposed antenna operates within the frequency range of 6~6.4 GHz. A seventh-order Chebyshev low-pass filter is incorporated within the coaxial line feed of the cavity-backed patch antenna, and a planar dielectric structure is added in series to achieve a band-pass filter with a suppression of approximately -32 dB in the 3~3.2 GHz range. The measured maximum gain in the operating frequency range and suppression band are 6.03 dBi and -51.81 dBi, respectively. This represents a suppression level of approximately 36.7 dB compared to the unfiltered maximum gain of -13.05 dBi.

Key words: Nonlinear Radar Receiver, Coaxial Line Band-Pass Filter, Cavity-Backed Patch Antenna

I. 서 론

비선형레이다는 전자 장비의 비선형성에 의해 발생하는 고조파 신호를 이용하여 은닉된 전자 장비를 탐지하는 레이더 시스템으로써 표적으로부터 반사되는 신호를

탐지하는 전통적인 레이더 시스템과는 달리 은닉된 전자 장비에 전자기파를 입사시킨 후 장비 내 능동소자를 여기시켜 재 방사되는 고조파 신호를 수신하여 탐지하는 방식을 활용한다. 따라서 낮은 RCS를 갖고 무선기기로 동작하는 급조 폭발물과 같은 위협 요소를 식별할 수 있

「이 연구는 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 미래도전국방기술 연구개발사업(No.912902601).」

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

1: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0001-8771-6615>), 2: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-4779-937X>),

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

· Manuscript received September 3, 2024 ; Revised September 15, 2024 ; Accepted October 4, 2024. (ID No. 20240903-089)

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

는 장점이 있다^[1]. 그러나, 수신부 인근에 존재하는 송신 안테나로부터 방사된 신호가 수신안테나로 유입될 경우 수신부 내의 능동소자의 비선형성에 의해 발생한 고조파 신호가 표적 탐지 성능에 열화를 끼칠 수 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 RF front-end 단계 대역 통과 필터를 적용함으로써 동작 주파수 대역 이외의 신호 억제 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 동축선로 내에 7단 Chebyshev 응답특성을 갖는 대역 통과 필터를 설계하였으며, 이를 cavity-backed 패치 안테나와 결합시켜 제작하였다. 주파수에 따른 안테나 이득을 측정함으로써 필터의 억제 특성을 확인하였다.

II. 대역 통과 필터 설계

그림 1(a)는 계단형 임피던스 저역 통과 필터 개념도로 전송선로의 경우 $\lambda/8$ 이하의 길이를 갖을 시 직렬 인덕턴스 성분과 병렬 커패시턴스 성분이 결합된 T-자 형 등가회로로 대체 할 수 있으며, 높은 임피던스를 갖는 전송선로의 경우 직렬 인덕턴스 성분이, 낮은 임피던스를 갖는 전송선로의 경우 병렬 커패시턴스 성분이 주가 된다. 이를 순차적으로 반복하는 방식으로 계단형 임피던스를 구현함으로써 그림 1(b)와 같이 직렬 인덕턴스와 병렬 커패시턴스가 반복되는 형태로 저역 통과 필터로 동작하게 된다^[2]. 제안된 저역 통과 필터의 경우 Z_{High} 및 Z_{Low} 는 각각 94 Ω 및 19 Ω 을 갖도록 설정하였으며, 양끝 단의 임피던스 R_0 는 50 Ω 이 되도록 설정하였다. 식 (1) 및 식 (2)는 각 직렬 인덕턴스 성분 및 병렬 커패시턴스 성분을 나타

내는 계단형 임피던스의 전송선로 길이를 구현하는 식을 나타낸다. 차단주파수의 경우 7.2 GHz로 설정하였으며, 수식 내 g_L 및 g_C 의 경우 식 (3)을 활용하여 7단 Chebyshev 응답특성을 갖도록 설계하였다. 각 단의 g 값을 표 1에 나타내었다^[3]. 그림 2(a)는 제안된 대역 통과 필터 형상으로 동축선로 내 구현되었으며, 두께 2.2 mm의 teflon ($\epsilon_r=2.1$)구조가 감싸고 있는 형태이다. 저역 통과 필터 내 병렬 커패시턴스 성분을 나타내는 1, 7번째 단에 두께 0.1 mm를 갖고 3, 5번째 단에 두께 0.3 mm를 갖는 teflon을 평판형 구조의 형태로 삽입함으로써 직렬 커패시턴스 성분을 구현하였다. 이때의 LC 등가회로를 그림 2(b)에 나타내었다. 삽입된 직렬 커패시턴스 성분의 경우, 각 단의 병렬 커패시턴스 성분 사이에 존재하게 된다.

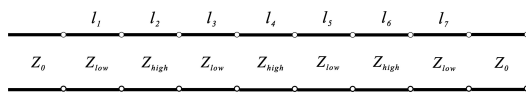
$$l_L = \frac{g_L}{2\pi} \frac{R_0}{Z_{High}} \frac{1}{f_c \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1)$$

$$l_C = \frac{g_C}{2\pi} \frac{Z_{Low}}{R_0} \frac{1}{f_c \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2)$$

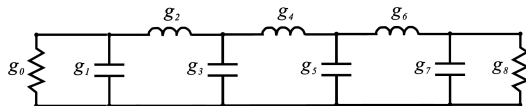
$$g_k = \frac{4a_{k-1}a_k}{b_{k-1}g_{k-1}} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

표 1. 7단 Chebyshev 응답 특성의 g 값
Table 1. g -value of 7th Chebyshev response.

g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8
1	1.181	1.423	2.097	1.573	2.097	1.423	1.181	1



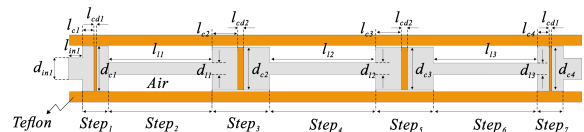
(a) 계단형 임피던스 저역 통과 필터
(a) Stepped-impedance low-pass filter



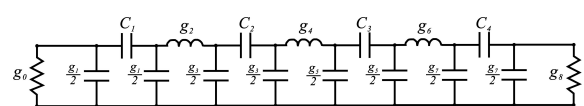
(b) 계단형 임피던스 저역 통과 필터 LC 등가 회로
(b) LC equivalent circuit of Stepped-impedance low-pass filter

그림 1. 저역 통과 필터 구조 개념도

Fig. 1. Diagram of the low-pass filter structure.



(a) 동축선로 내 대역 통과 필터 형상
(a) Band-pass filter within coaxial line



(b) 동축선로 내 대역 통과 필터 LC 등가 회로
(b) LC equivalent circuit of band-pass filter within coaxial line

그림 2. 제안된 대역 통과 필터 구조 및 LC 등가 회로

Fig. 2. Geometry of the proposed band-pass filter.

$$g_1 = \frac{2a_1}{\gamma} \quad (4)$$

$$a_k = \sin \left[\frac{(2k-1)\pi}{2n} \right] \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$b_k = \gamma^2 + \sin^2 \left(\frac{k\pi}{n} \right) \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$\beta = \ln \left(\coth \left(\frac{-10 \log(1 - 10^{0.1L_R})}{17.37} \right) \right) \quad (7)$$

$$\gamma = \sinh \left(\frac{\beta}{2n} \right) \quad (8)$$

III. 필터일체형 안테나 설계 및 측정

설계된 대역 통과 필터 구조의 상세 값을 표 2에 나타내었다. 그림 3은 제안된 저역 및 대역 통과 필터의 주파수 응답 특성으로 설계된 저역 통과에 직렬 커패시턴스 성분을 추가 시 대역 통과 필터로 동작함을 확인할 수 있다. 설계 목표된 통과 대역인 6~6.4 GHz 대역 내에서 약 0.01 dB 수준의 삽입 손실을 가지며, 3 dB 대역의 경우 약 5.40~7.35 GHz이다. 목표한 억제 대역인 3~3.2 GHz 내에서 약 -32 dB 수준 억제 특성을 갖는다. 그림 4는 제안된 대역 통과 필터 일체형 cavity-backed 패치 안테나 구조로 동축선로 내 대역 통과 필터에 metal post가 결합되어 상단 패치와 커플링 급전되는 방식이며 상세 설계 파라미터들을 표 3에 제시하였다. Cavity-backed 구조의 경우 패치 안테나 배열 시 빔 조향 특성에 열화를 발생시키는 surface wave 억제할 수 있는 특성을 가지며, 커플링 급전을 활용하여 추가적인 공진점을 형성함으로써 대역폭을 향상시킬 수 있다^[4]. 그림 5는 제작된 필터일체형 안테나 형상이며 측정 및 시뮬레이션 결과를 그림 6에 도시하였다. 시뮬레이션 Tool의 경우 Dassault System社의 CST

표 2. 대역 통과 필터 설계 파라미터(단위: mm)

Table 2. Design parameters of band-pass filter (unit: mm).

d_{m1}	d_{c1}	d_{c2}	d_{c3}	d_{c4}	d_{l1}	d_{l2}	d_{l3}	l_{in1}
1.03	2.21	2.14	2.14	2.21	0.62	0.59	0.62	1.08
l_{c1}	l_{c2}	l_{c3}	l_{c4}	l_{l1}	l_{l2}	l_{l3}	l_{cd1}	l_{cd2}
0.62	1.3	1.3	0.62	5.3	5.4	5.3	0.1	0.3

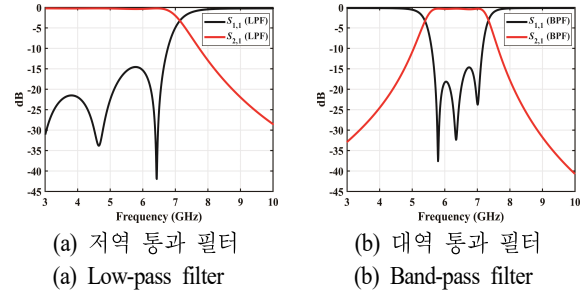


그림 3. 제안된 저역 및 대역 통과 필터 주파수 응답 특성
Fig. 3. Frequency response of proposed low-pass and band-pass filter.

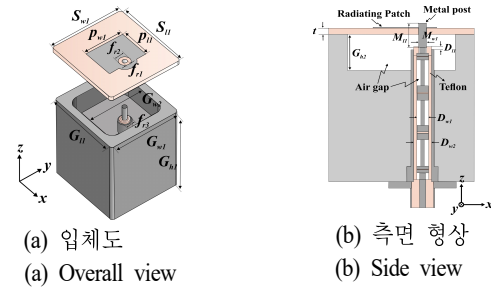


그림 4. 제안된 대역 통과 필터일체형 cavity-backed 패치 안테나 구조

Fig. 4. Geometry of proposed cavity-backed patch antenna with band-pass filter.

표 3. 대역 통과 필터일체형 cavity-backed 패치 안테나 설계 파라미터(단위: mm)

Table 3. Design parameters of cavity-backed patch antenna with band-pass filter (unit: mm).

S_{w1}	S_{l1}	P_{w1}	P_{l1}	f_{r1}	f_{r2}	f_{r3}	G_{w1}	G_{w2}
25.3	27.2	13.25	10.75	1.5	3.62	3.25	25.3	20.2
G_{l1}	G_{h1}	G_{h2}	M_{w1}	M_{l1}	D_{w1}	D_{w2}	D_{l1}	t
27.2	29.63	7.25	1.5	5	2.24	3.25	0.6	1.27

Microwave Studio를 활용하였으며 안테나의 이득 및 방사 패턴의 경우 7 m 원거리장 방사패턴 측정장에서 측정 진행하였다. 반사계수 측정 결과의 경우 동작 주파수 대역인 6~6.4 GHz 대역 내 $S_{11} < -10$ dB 이하 특성을 만족하며 최대 이득의 경우 5.59~6.03 dBi 수준을 보인다. 억제 주파수 대역인 3~3.2 GHz에서의 최대 이득의 경우 약 -51.8~-50.4 dBi 수준으로 측정 및 시뮬레이션 결과 비교 시 전반적으로 유사한 결과를 보인다. 그림 7은 필터

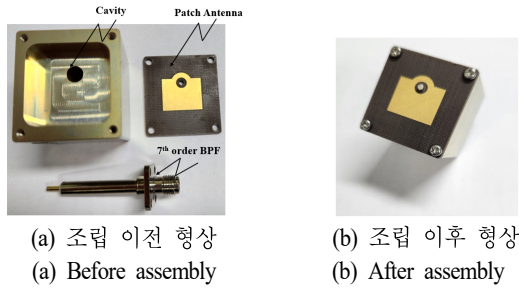


그림 5 제작된 필터일체형 안테나 형상

Fig. 5. fabricated filtering antenna.

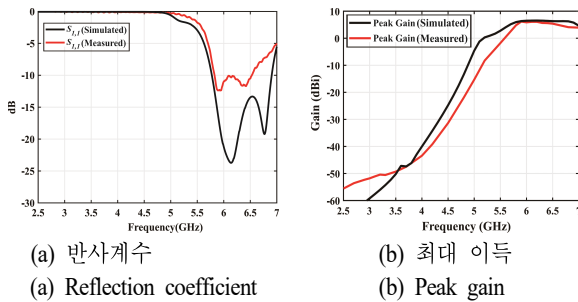


그림 6. 필터일체형 안테나 측정 및 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Simulated and measured results of filtering antenna.

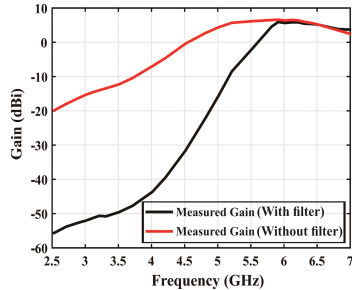


그림 7. 필터 유/무에 따른 최대 이득 측정 결과

Fig. 7. Measured peak gain (with/without filter).

유/무에 따른 최대 이득 측정 결과로 동작 주파수 대역인 6~6.4 GHz 대역 내에서는 필터 유/무와 상관없이 유사한 이득 값을 보이지만, 대역에서 점점 멀어질수록 필터의 억제 특성으로 인해 차이가 발생하게 된다. 억제 대역인 3~3.2 GHz 내에서 필터가 존재하지 않을 경우 약 -15.05~-13.75 dBi 수준의 이득이 나타나며, 필터 존재 시와 비교할 경우 약 36.7 dB 수준의 억제 특성을 가짐을 보인다. 그림 8은 중심 주파수인 6.2 GHz 대역에서의 방사패턴 측정 및 시뮬레이션 결과로 유사한 결과를 보인

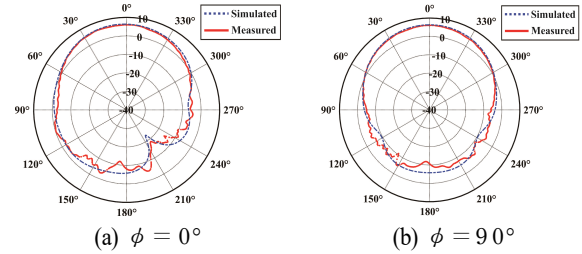


그림 8. 방사패턴 측정 및 시뮬레이션 결과($f=6.2$ GHz)

Fig. 8. Measured and simulated radiation pattern.

다.

IV. 결 론

본 논문에서는 동축선로 내 7단 Chebyshev 응답 특성을 갖는 대역 통과 필터를 설계하고 이를 cavity-backed 패치 안테나와 결합하여 제작 및 측정 진행하였다. 반사계수, 최대 이득 및 방사패턴 비교 결과, 시뮬레이션값과 측정값이 유사한 결과를 보이며, 동작 주파수 대역인 6~6.4 GHz에서 최대 6.03 dBi 수준의 이득을 갖고 억제 대역인 3~3.2 GHz에서 약 -51.8 dBi 수준으로 대역 통과 필터의 경우 약 36.7 dB 수준의 억제 특성을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 제안된 안테나는 비선형레이다 수신부용 안테나로 활용 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] 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.
- [2] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 380-425, 2011.
- [3] J. S. G. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 41-44, 2004.
- [4] 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.