

에너지 선택형 안테나 백-엔드 보호를 위한 저전력 통과 필터 설계

Design of Low-Power Pass Filter for Energy Selective Antenna Back-End Protection

정 보 석¹ · 권 종 화^{2*} · 홍 익 표³Bo-Seok Jeong¹ · Jong-Hwa Kwon^{2*} · Ic-Pyo Hong³

요 약

본 논문에서는 에너지 선택형 안테나(ESA, energy selective antenna) 백-엔드에서 동작하는 수신단을 이중으로 보호할 수 있는 SSPP(spoof surface plasmon polariton) 기반 저전력 통과 필터를 설계하였다. 제안된 필터는 외부 DC 전원 및 바이어스 회로 없이 입력 신호 전력에 따라 핀 다이오드(SMP1345-079LF)가 ON/OFF 되도록 구성하였으며, 저전력 조건에서는 2.0~2.6 GHz 대역에서 약 2 dB 수준의 삽입손실로 통과 특성을 확보하고 고전력 조건에서는 2.3 GHz에서 $S_{21} = -57.6$ dB의 강한 차단 특성과 -10 dB 대역폭 300 MHz를 갖도록 설계하였다. SSPP 주기 구조의 특성을 활용하여 단위구조를 총 10개 배열 하였으며, 제작이 용이한 FR4($h=1.0$ mm) 기판 위에 구현하였다. 설계 성능을 확인하기 위하여 LPKF를 사용해 제작 하였으며 측정결과로부터 저전력 통과 및 고전력 차단 동작이 목표 대역에서 유효함을 확인하였다.

Abstract

In this study, spoof surface plasmon polariton (SSPP) - based low-power pass filter is designed to provide dual protection to a receiver operating at the back end of an energy-selective antenna (ESA). The proposed filter operates without any external DC power supply or bias circuit and uses a PIN diode (SMP1345-079LF) whose on/off state is determined by the incident signal power level. Under low-power conditions, the filter exhibits a passband characteristic with an insertion loss of approximately 2 dB over the 2.0~2.6 GHz frequency range, whereas under high-power conditions, a strong blocking performance with $S_{21} = -57.6$ dB at 2.3 GHz and a -10 dB bandwidth of 300 MHz is achieved. The filter is implemented by arranging a total of ten SSPP unit cells and realized on an FR4 substrate with a thickness of 1.0 mm for ease of fabrication. To verify the designed performance, the proposed filter is fabricated using an LPKF, and the measurement results confirm that the desired low-power transmission and high-power blocking characteristics are effectively achieved in the target frequency band.

Key words: Energy Selective Antenna, Spoof Surface Plasmon Polariton, Power-Dependent Filter, Pin Diode

「본 연구는 2022년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원(RS-2022-NF000835), 2025년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2019-NR040074), 2025년도 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-02642985, 고출력 전자파 방호를 위한 식별·보호·감시 기술 개발).」

국립공주대학교 스마트정보기술공학과(Department of Smart Information Technology Engineering, Kongju National University)

*한국전자통신연구원 전파연구본부(Radio Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute)

1: 대학원생(<https://orcid.org/0009-0004-6604-9664>), 2: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-2132-7403>), 3: 교수(<https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>)

· Manuscript received January 2, 2026 ; Revised February 2, 2026 ; Accepted February 9, 2026. (ID No. 20260102-7S)

· Corresponding Author: Ic-Pyo Hong (e-mail: iphong@kongju.ac.kr)

I. 서 론

최근 전장 및 보안 환경에서 고출력 마이크로파(HPM, high-power microwave) 및 고강도 전자기 간섭(EMI, electromagnetic interference) 위협이 증가함에 따라, 무선 통신 시스템의 RF 수신단을 보호하기 위한 고전력 선택형 보호 기술에 대한 요구가 커지고 있다. 무선 통신 시스템의 수신단은 저잡음 증폭기(LNA) 등의 민감 소자를 포함하고 있어 순간적인 고전력 유입에도 성능 열화 또는 영구 손상이 발생할 수 있으며, 이에 따라 통신에 필요한 저전력 신호는 유지하면서 고전력 성분만 선택적으로 억제할 수 있는 보호기술이 필요하다.

에너지 선택형 안테나(ESA, energy selective antenna)는 비선형 소자를 안테나 구조에 결합하여 입사 전력 세기에 따라 방사 및 전달 특성이 변화하도록 함으로써 별도의 제어 회로 없이도 고출력 성분을 1차적으로 억제할 수 있는 장점을 가지고 있다^[1]. Folded dipole 구조와 PIN 다이오드 등을 이용하여 전력에 따라 안테나 동작이 변화하는 ESA 구조가 제안되는 등, 고출력 전자파 환경에서의 능동적 보호 개념이 다양한 형태로 확장되고 있다^[2]. 그러나 ESA만 사용할 경우에는 잔여 고전력 성분이 백엔드로 유입될 가능성이 존재하므로, ESA 백엔드에서 추가로 동작하는 2차 보호 구조의 적용이 요구된다.

한편 주기적 패턴을 단위구조로 하여 전송 특성을 제어하는 SSPP(spoof surface plasmon polariton) 전송 구조는 금속 표면에 형성된 주기 구조에 의해 분산 특성과 차단 주파수를 제어할 수 있는 전자기 구조이다. 이는 단위구조의 형상 및 크기, 배열 간격, 반복 개수, 그리고 기판의 두께 및 전기적 특성 등에 의해 전송 특성이 결정되며, 평면형 구조로 구현 가능하다는 장점이 있다. 따라서 SSPP 구조는 대역통과 필터 등 주파수 선택형 소자로 확장되어 다양한 마이크로파/테라헤르츠 응용에 적용되어 왔으며^[3], 최근에는 저역통과 SSPP 필터의 소형화 및 차단대역 특성 개선을 위해 단위구조를 고도화하는 연구가 진행되고 있다^[4]. 또한 입력 전력에 따라 전달 특성이 변화하는 “energy selective” 개념이 도파관 기반 필터 구조로도 보고된 바 있으며^[5], 비선형 다이오드의 전력 의존 특성을 이용하여 외부 DC 전원 및 바이어스 회로 없이도

SSPP 전달 특성이 재구성되는 all-passive 전력 변조 동작이 실험적으로 검증되었다^[6]. 더 나아가 ESS(energy-selective surface) 기술은 전자기 보호 관점에서 대역 확장 및 기능 다변화 방향으로 발전 동향이 정리되고 있어, 안테나/필터 레벨에서의 전력 선택형 보호 구조 설계의 중요성이 강조되고 있다^[7].

본 논문에서는 ESA 백-엔드 보호를 목적으로 핀 다이오드(SMP1345-079LF)를 결합한 SSPP 기반 저전력 통과 필터를 설계하였다. 제안한 구조는 SSPP 단위구조를 주기적으로 배열한 평면형 구조로 구현하였으며, 외부 DC 전원 및 바이어스 회로 없이 입력 전력에 따라 필터 특성이 변화하도록 구성하였다.

II. 본 문

그림 1은 ESA 백-엔드에 SSPP 기반 저전력 통과 필터를 적용한 개념도를 나타낸다. 저전력의 통신 신호는 ESA 및 필터를 통과하여 시스템으로 전달되며, 고전력 전자파 유입 시에는 ESA에서 1차 억제 후 잔여 고전력 성분이 필터에서 차단되는 보호 구조로 동작한다. 제안된 필터 구조는 외부 DC 전원 없이 입력 전력에 의해 다이오드가 ON/OFF 상태로 전환되도록 구성하였다.

그림 2는 제안된 SSPP 저전력 통과 필터의 단위 구조 및 설계 변수와 전체 구조를 나타낸다. 단일구조는 주기적으로 반복되어 SSPP 전송 특성을 형성하며, $L_1 \sim L_5$, $H_1 \sim H_5$ 및 K 는 단위구조의 주요 형상 파라미터로 정의된다. 본 논문에서는 해당 설계 변수를 기반으로 목표 통과 대역 및 차단 특성을 만족하도록 단위구조를 구성하고, 이후 unit cell을 주기적으로 배열하여 전체 필터를 설

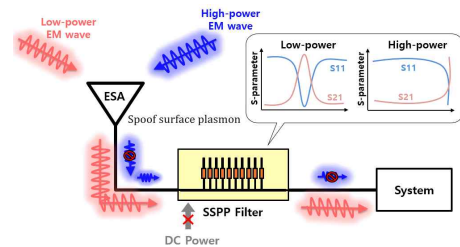


그림 1. ESA에 적용된 SSPP 저전력 통과 필터 개념
Fig. 1. Concept of SSPP low-power-pass filter applied to ESA.

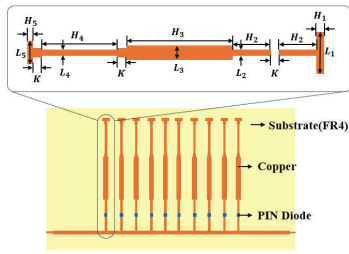


그림 2. 제안한 SSPP 단위구조 및 전체 구조
Fig. 2. Proposed SSPP unit cell and overall structure.

계하였다. 기판은 FR4($h=1.0$ mm)를 적용하였으며, 핀 다이오드는 SMP1345-079LF를 사용하였다. 저전력 조건에서는 다이오드가 OFF 상태로 통과 대역을 형성하고, 고전력 조건에서는 다이오드가 ON 상태로 전환되어 SSPP 경로의 유효 임피던스/손실/분산 특성이 변화함으로써 목표 대역에서 전송이 억제되는 저전력 통과 필터 동작을 구현하였다.

제안된 SSPP 저전력 통과 필터는 단위구조의 반복 배열을 통해 분산 특성과 차단 대역을 형성하는 구조로, 단위구조의 배열 개수는 필터의 대역폭 및 차단 성능을 결정하는 주요 설계 파라미터이다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 SSPP 단위구조의 개수를 2개, 4개, 6개, 10개로 변화시키며 전달 특성(S_{21})을 비교 분석한 결과, 배열 개수가 증가함에 따라 차단 대역에서의 감쇄량이 점차 증가하고, -10 dB 기준 대역폭 또한 확장되는 경향을 확인할 수 있다. 단위구조 2개 배열의 경우 -10 dB 대역폭은 약 130 MHz 수준으로 비교적 협소하게 형성되었다. 반면 단위구조를 4개 및 6개로 증가시킬 경우 -10 dB 대역폭이 각각

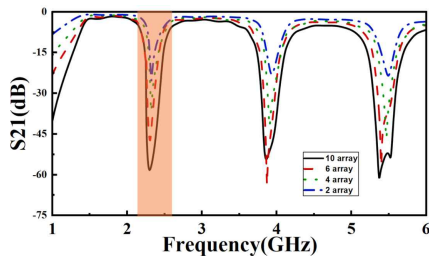


그림 3. SSPP 단위구조 배열 개수에 따른 S_{21} 특성 (Diode ON 상태일 때)
Fig. 3. S_{21} according to the number of SSPP unit cell's array (at Diode ON state).

약 200 MHz 및 250 MHz로 확장되었고, 차단 대역에서의 S_{21} 최솟값 또한 점차 감소하여 성능이 향상되었다. 단위구조를 10개로 배열한 경우 -10 dB 대역폭은 약 300 MHz로 가장 넓게 형성되었으며, 차단 대역에서 -50 dB 이하의 깊은 감쇄 특성을 나타내어 우수한 차단 성능을 확보하였다. 이러한 결과는 SSPP 구조에서 단위구조의 반복 배열 개수가 증가함에 따라 차단 대역에서의 전파 감쇄가 누적되고, 주기 구조에 의해 형성되는 밴드갭 특성이 강화되기 때문으로 판단된다^{[8],[9]}. 그러나 단위구조의 개수가 과도하게 증가할 경우 구조 길이 증가로 인한 삽입손실 및 크기 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 차단 성능과 대역폭 확장 효과를 확보하면서 구조적 복잡도를 과도하게 증가시키지 않는 관점에서, 단위구조 10개 배열을 최종 설계 구조로 채택하였다.

이러한 특성을 기반으로 하여 각 설계 파라미터에 대한 최적화된 파라미터 값을 표 1에 나타내었으며, 그에 대한 S_{21} 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다. 다이오드 OFF 상태에서는 2.0~2.6 GHz 대역에서 약 2 dB 수준의 삽입손실을 가지는 통과 특성이 확인되었으며, 다이오드 ON 상태에서는 2.3 GHz에서 $S_{21}=-57.6$ dB의 강한 차단 특성과 -10 dB 기준 대역폭 300 MHz가 확인되었다. 이를 통해 ESA를 통과한 잔여 고전력 성분을 백-엔드에서 추가로 억제할 수 있음을 의미한다.

제안한 필터의 성능을 검증하기 위하여 연구실에서 간

표 1. SSPP 구조 파라미터값(단위: mm)
Table 1. SSPP structure parameter values (unit: mm).

K	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
1	8	0.65	1.5	0.5	2.5	1.95	8.3	16.2	15.2	0.5

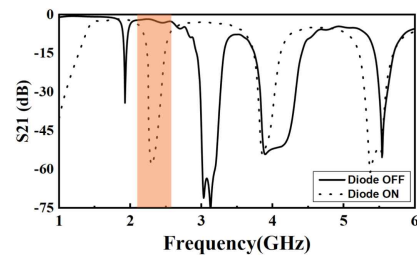


그림 4. 제안된 필터의 시뮬레이션 S_{21}
Fig. 4. Simulated S_{21} of the proposed filter.

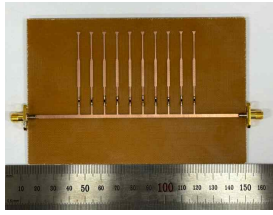


그림 5. 제작한 필터
Fig. 5. Fabricated filter.

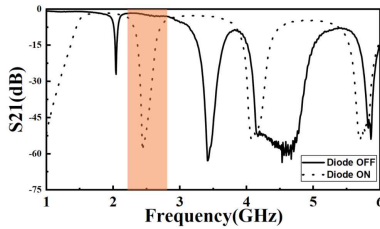


그림 6. 제안된 필터의 측정된 S21
Fig. 6. Measured S21 of the proposed filter.

단하고 빠르게 PCB 제작을 할 수 있는 LPKF 장비를 사용하여 그림 5와 같이 제작하였으며, 이를 측정한 결과는 그림 6과 같다. 다이오드 OFF 상태에서는 2.1~2.8 GHz 대역에서 약 2.5 dB 수준의 삽입손실을 가지는 통과 특성이 확인되었으며, 다이오드 ON 상태에서는 고출력 인가 시 다이오드 ON 상태를 모사하기 위해 PIN 다이오드의 등가모델을 적용하여 2 Ω 저항으로 대체한 조건에서 측정하였다. 해당 조건에서 2.45 GHz에서 $S_{21} = -56.4$ dB의 강한 차단 특성과 -10 dB 기준 대역폭 300 MHz임을 확인하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 ESA 백-엔드 보호를 위한 SSPP 기반 저전력 통과 필터를 설계하고 제작하였다. 시뮬레이션을 통해 다이오드 OFF 시 2.1~2.6 GHz에서 2.5 dB 삽입손실을, ON 시 2.31 GHz에서 $S_{21} = -59.4$ dB의 차단 특성을 확인하였다. 이를 제작하여 측정된 결과, OFF 상태에서 2.1~2.8 GHz 대역에서 약 2.5 dB의 삽입손실을 나타내어 시뮬레이션과 일치하는 결과를 얻었다. ON 상태에서는 2.45 GHz에서 -56.4 dB의 차단 성능과 300 MHz의 대역폭을 확보하였으며 시뮬레이션 대비 중심주파수가 140 MHz 이동하는 모습을 확인하였다.

References

- [1] M. Wang, M. Tang, H. C. Zhang, and J. Mao, "Energy selective antenna: Concept, design, and experiment," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 65, no. 2, pp. 539-545, Jan. 2023.
- [2] J. Fang, Q. Wu, and D. Su, "An energy selective antenna based on the folded dipole structure and PIN diodes," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 65, no. 6, pp. 2006-2014, Oct. 2023.
- [3] R. K. Jaiswal, N. Pandit, and N. P. Pathak, "Spoof surface plasmon polaritons based reconfigurable band-pass filter," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 31, no. 3, pp. 218-221, Dec. 2018.
- [4] Z. H. Gao, X. S. Li, M. Mao, C. Sun, F. X. Liu, and L. Zhang, et al., "Ultra-compact low-pass spoof surface plasmon polariton filter based on interdigital structure," *Micromachines*, vol. 14, no. 9, p. 1687, Aug. 2023.
- [5] Z. Wu, M. Lin, J. Zhang, and J. Liu, "Energy selective filter with power-dependent transmission effectiveness in waveguide," *Electronics*, vol. 8, no. 2, p. 236, Feb. 2019.
- [6] W. Y. Cui, X. Gao, J. Zhang, Y. Luo, and T. J. Cui, "Power-modulated reconfigurable nonlinear plasmonic devices without DC power supply and feed circuit," *npj Nanophotonics*, vol. 1, p. 11, Jun. 2024.
- [7] J. Lv, C. Luo, J. Zhao, H. Han, H. Lu, and B. Zheng, "Development of energy-selective surface for electromagnetic protection," *Micromachines*, vol. 16, no. 5, p. 555, May 2025.
- [8] L. Yang, H. Liu, Z. Zhang, and X. Cui, "Miniaturized broadband low-pass filter based on spoof surface plasmon polariton transmission line," *Scientific Reports*, vol. 15, p. 1243, 2025.
- [9] Y. Zhang, J. Wang, M. Chen, and T. J. Cui, "Broadband low-pass filter with sharp roll-off based on spoof surface plasmon polaritons," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 126418-126426, 2021.