

PIN 다이오드 기반 동축 급전 에너지 선택형 안테나

PIN Diode-Based Energy Selective Antenna with Coaxial Feeding

비스와럽 라나¹ · 조성실^{2*} · 권종희^{3**} · 홍익표^{4*}

Biswarup Rana¹ · Sung-Sil Cho^{2*} · Jong-Hwa Kwon^{3**} · Ic-Pyo Hong^{4*}

요 약

본 연구에서는 동축 급전 방식의 새로운 에너지 선택형 안테나(ESA)를 제안하였다. 제안된 구조는 안테나 네 모서리에 위치한 네 개의 PIN 다이오드를 통해 에너지 선택적 동작을 구현한다. S-대역에서 동작하는 기존 동축 급전 마이크로 스트립 안테나를 먼저 설계한 후, 동일한 구조에 PIN 다이오드를 추가하여 ESA로 확장 구현하였다. 제안된 안테나는 고출력 마이크로파 신호가 존재하지 않을 때는 기존 안테나와 동일하게 동작하며, 고출력 신호가 인가되면 PIN 다이오드가 OFF 상태에서 ON 상태로 전환되어 동작 모드가 변화한다. 이를 통해 고출력 마이크로파 신호를 효과적으로 차단함으로써 회로 및 시스템을 보호할 수 있다.

Abstract

This paper proposes a coaxial-fed energy selective antenna (ESA) that incorporates four PIN diodes at the antenna corners to achieve energy-selective operation. A conventional coaxial-fed microstrip antenna operating in the S-band is first designed, after which the PIN diodes are integrated to realize the ESA. Under normal conditions without high-power microwave (HPM) exposure, the antenna functions identically to the conventional design. When subjected to HPM signals, the PIN diodes switch from the OFF state to the ON state, altering the antenna response. The proposed ESA effectively suppresses HPM signals, providing protection for circuits and systems.

Key words: Energy Selective Antenna (ESA), PIN Diode, Microstrip, Coaxial Feed, Antenna Gain

I. 서 론

핀펫(FinFET)^[1]과 게이트올어라운드 FET(GAA FET)^[2]를 활용한 소형 전자 장치 및 고속 시스템이 발전함에 따

라, 전자 장치와 시스템을 고출력 전자기파로부터 보호하는 것이 필요하다^{[3][4]}. 또한, 이러한 전자 장치와 시스템은 매우 낮은 전압과 전류에서 동작하기 때문에, 시간이 지남에 따라 점점 더 소형화되고 있다.

¹본 연구는 2022년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원(RS-2022-NF000835)과 2025년도 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-02642985, 고출력 전자파 방호를 위한 식별·보호·감시 기술 개발).

국립공주대학교 스마트자연공간연구센터(Smart Natural Space Research Center, Kongju National University)

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

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

1: 박사후연구원(<https://orcid.org/0000-0002-8803-3493>), 2: 박사과정(<https://orcid.org/0000-0003-0878-077X>),

3: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-2132-7403>), 4: 교수(<https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>)

· Manuscript received June 20, 2025 ; Revised July 25, 2025 ; Accepted August 30, 2025. (ID No. 20250620-011S)

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

고출력 전자기파의 발생원은 적에 의해 의도적으로 생성될 수도 있으며, 낙뢰나 기타 다른 원인으로부터 발생할 수도 있다. 전자 장치와 시스템을 고출력 전자기파로부터 보호하기 위해서는 안테나 및 프런트엔드 RF 장치 앞에 에너지 선택 표면 (ESS, energy selective surface)을 배치하거나, 파워 리미터를 사용하거나, 에너지 선택 기능을 갖춘 안테나(ESA, energy selective antenna)를 설계하는 등 다양한 방법으로 보호할 수 있다. 고출력 전자기파를 보호하기 위한 가장 일반적인 방법은 ESS를 사용하는 것으로 최근 관련 연구가 활발히 진행되고 있다^{[5],[6]}. 반면에 ESA는 비교적 새로운 개념으로, 안테나를 통해 들어오는 고출력 전자기파로부터 시스템을 보호할 수 있다^{[7],[8]}. ESA는 구조가 비교적 단순하고 제작이 용이하다는 것이 장점으로 이를 활용하면 다양한 통신 시스템과 레이더 시스템이 다른 기법에 비해 구조가 단순해지고 부피가 줄어든다는 특징이 있다. 이러한 유형의 안테나는 전력 관점에서 “power selective antenna”라고도 할 수 있다. 하지만 유사한 동작 안테나와 관련한 선행 연구에서 ESA로 표현을 하고 있으므로 본 논문에서는 ESA로 사용하고자 한다.

본 논문에서는 고강도 방사 전자파로부터 보호하기 위해 3.48 GHz에서 동작하는 PIN 다이오드 기반의 새로운 동축 급전 ESA를 제안하였다. 제안한 ESA는 동축 급전을 사용한 기본 마이크로스트립 안테나를 설계한 후, 기본 TM01 모드를 교란시키기 위해 패치 위에 4개의 PIN 다이오드를 도입하였다. ESA는 고출력 마이크로파 신호가 없을 때는 기존 마이크로스트립 안테나와 동일한 특성을 보인다. 그때 네 개의 PIN 다이오드는 OFF 상태를 유지한다. 하지만 고출력 마이크로파 신호가 인가되면, 네 개의 PIN 다이오드는 OFF 상태에서 ON 상태로 전환되어 동작 주파수 대역이 이동함에 따라 고출력 전자기파를 보호할 수 있다. 또한 본 논문에서 제시한 ESA는 기존 동축 급전 직사각형 패치 안테나의 크기나 형태를 변경하지 않고 ESA의 특성을 구현할 수 있는 구조설계에 주로 초점을 맞추었다. 기존 ESA는 대부분 구조가 복잡하나 본 논문에서 제시한 안테나는 구조가 매우 단순하여 제작이 용이하여 추후 배열 안테나 설계도 단순하다는 특징을 가지고 있다. II장에서 제안된 안테나의 구성과 측정결과를 제시하며, III장에서 결론을 제시한다.

II. 제안한 ESA

일반 동축 급전 마이크로스트립 안테나의 상단 뷰와 제안된 안테나의 상단 뷰는 각각 그림 1(a) 및 그림 1(b)에 각각 나타내었다. 유전 기판은 비유전율 4.4, 손실 탄젠트 0.02의 FR4 기판을 사용하였으며, 기존 안테나와 본 연구에서 제안한 ESA의 크기는 52×60×1 mm로 동일하다. 본 연구에서는 구조 시뮬레이션을 위해 HFSS(high-frequency structure simulator) 소프트웨어를 사용하였다. 제안한 ESA 구조의 동작 주파수는 S-대역으로 설정하였으며 먼저 3.5 GHz에서 동작하는 동축 급전의 기본적인 마이크로스트립 안테나를 설계한 후 4개의 PIN 다이오드와 4개의 비아(via)를 추가하여 고출력 전자기파로부터 보호할 수 있는 ESA를 제안하였다. ESA를 구현하기 위해서 패치 상단에 PIN 다이오드를 도입하여 동작 대역에서 TM01 모드를 교란하였다. 고출력 마이크로파 신호가 없을 때, 네 개의 PIN 다이오드는 “OFF” 상태를 유지하며 이 상태에서의 방사 메커니즘은 기존 동축 급전 안테나의 전통적인 TM01 모드 방사 방식을 따른다. 하지만 고출력 마이크로파 신호가 인가되면, PIN 다이오드가 “OFF” 상태에서 “ON” 상태로 전환되고 추가 전류 경로가 형성되어, 동작 대역에서 기본 모드가 무효화된다. 그림 2(a)는 기존 동축 급전 마이크로스트립 안테나, 제안된 안테나의 “OFF” 상태, 그리고 제안된 안테나의 “ON” 상태일 때의 반사계수를 나타낸 것이다. 이때 HFSS에서 PIN 다이오드 모델을 설계하기 위해

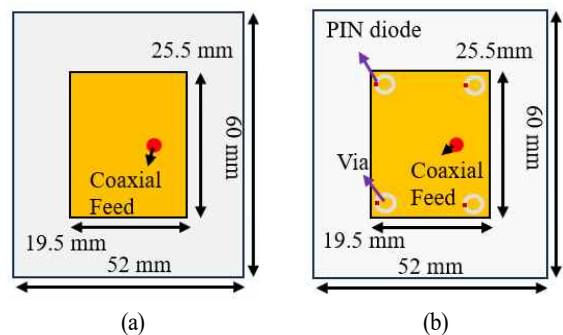


그림 1. (a) 기존 동축 급전 안테나의 상단, (b) 제안한 ESA의 상단

Fig. 1. (a) Top view of the basic coaxial feed antenna, (b) Top view of the proposed ESA.

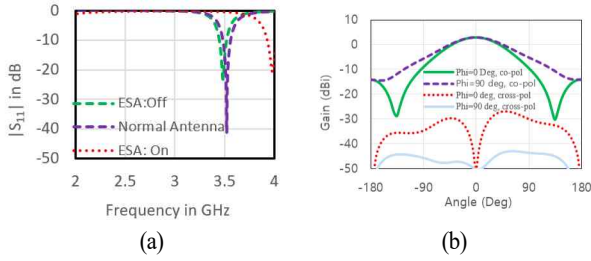


그림 2. (a) 반사계수, (b) 기존 안테나의 방사패턴
 Fig. 2. (a) Reflection coefficient, (b) Radiation pattern of the basic coaxial feed antenna.

RLC 경계 조건을 적용하였으며 시뮬레이션 시 순방향 저항은 3 Ω으로, 역방향 저항은 매우 크게 설정하였다. PIN 다이오드의 순방향 도통 전압을 0.7 V로, 안테나 시스템 임피던스를 50 Ω으로 고려하면, 인가 전력 레벨은 약 6.9 dBm이어야 하지만 안테나 시스템의 여러 손실들 때문에 PIN 다이오드를 “OFF” 상태에서 “ON” 상태로 전환하려면 더 높은 전력 레벨이 필요할 것으로 예상된다.

기존 안테나의 방사 패턴은 그림 2(b)에 나타나 있으며, 전방향에서 최대 시뮬레이션 이득은 2.8 dBi를 갖는다. PIN 다이오드가 “OFF” 상태일 때, 제안된 ESA의 이득은 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 기존 동축 급전 안테나와 유사하며 전방향에서의 최대 이득은 2.7 dBi이다. 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이 고출력 마이크로파 신호가 인가되었을 때 전방향에서의 최대 이득은 -0.3 dBi이다. 그림 4는 PIN 다이오드의 상태에 따른 TM01 모드의 전기장 분포를 나타낸 것으로 그림 4(a)는 기본 TM01 모드의 전기장 분포를 보여주고 있지만 그림 4(b)에서는 기본 모드가 교란되었음을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 안테나는

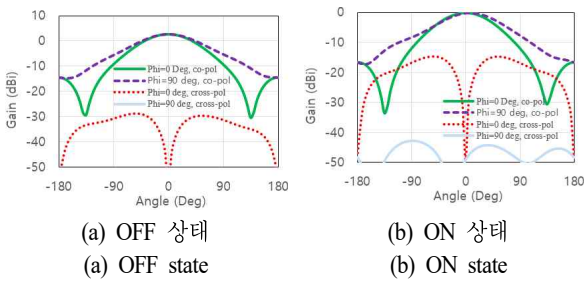


그림 3. 방사패턴
 Fig. 3. Radiation pattern.

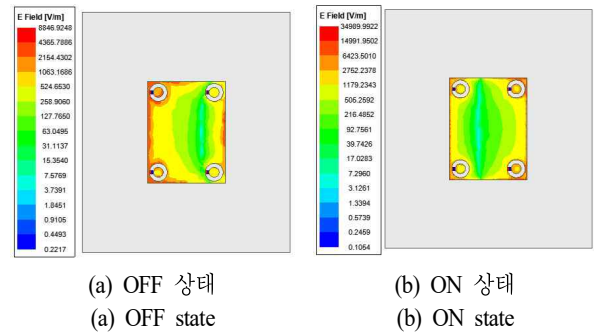


그림 4. 전기장 분포
 Fig. 4. E-field distribution.

고출력 마이크로파 환경에서 비효율적인 방사체가 된다. 본 연구에서 제안한 ESA의 성능을 검증하기 위해 그림 5와 같이 ESA를 제작하였으며 벡터네트워크분석기를 활용하여 ESA의 반사계수를 측정하였다. 그림 6 및 그림 7은 다이오드가 OFF 상태일 때와 ON상태 일 때의 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로 비교적 유사한 결과를 얻는 것을 확인할 수 있다.

III. 결 론

저전력 전자 장치와 시스템의 발전에 따라 고출력 전자 기파로부터의 보호는 필수적인 과제가 됨에 따라 본 연구에서는 배열 설계에 적합한 새로운 유형의 ESA를 제안하였다. 제안된 안테나는 패치 상단 표면에 4개의 PIN 다이

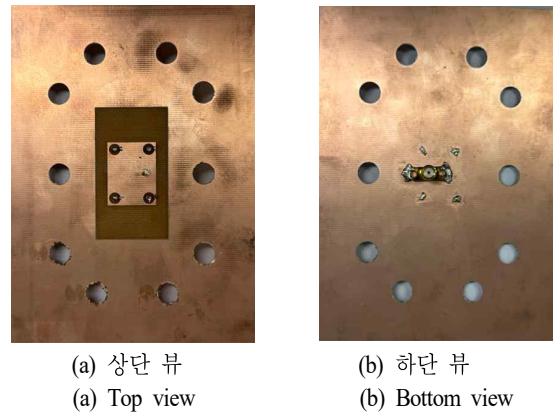


그림 5. 제작된 ESA
 Fig. 5. Fabricated ESA.

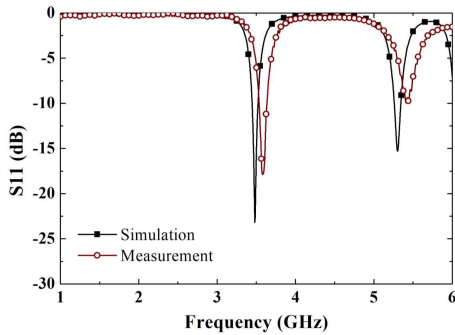


그림 6. OFF 상태일 때 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 6. Simulation and measurement results of OFF state.

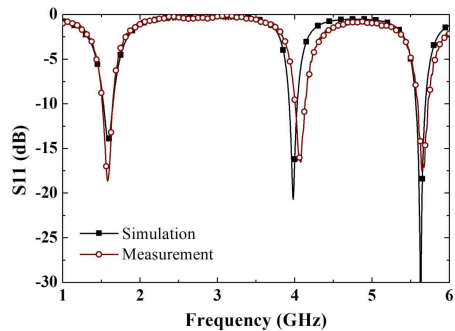


그림 7. ON 상태일 때 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 7. Simulation and measurement results of ON state.

오드만 배치되어 있으며, 동축 급전 방식이 사용되어 구조가 매우 단순하며 제작이 용이하다는 특징을 가지고 있다.

References

- [1] D. Bhattacharya, N. K. Jha, "FinFETs: From devices to architectures," *Advances in Electronics*, vol. 2014, no. 1, p. 365689, Sep. 2014.
- [2] A. Dasgupta, C. Hu, "Gate-all-around FET design rule for suppression of excess non-linearity," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 41, no. 12, pp. 1750-1753, Dec. 2020.
- [3] D. V. Giri, F. M. Tesche, "Classification of intentional electromagnetic environments(IEME)," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no. 3, pp. 322-328, Aug. 2004.
- [4] C. Yang, P. G. Liu, and X. J. Huang, "A novel method of energy selective surface for adaptive HPM/EMP protection," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 112-115, Jan. 2013.
- [5] Z. Wu, Y. Xu, P. Liu, T. Tian, and M. Lin, "An ultra-broadband energy selective surface design method: From filter circuits to metamaterials," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 7, pp. 5865-5873, Jul. 2023.
- [6] N. Hu, C. Liu, T. Tian, Y. Xu, and P. Liu, "Design and analysis of response threshold of energy selective surface based on diode grids," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 65, no. 2, pp. 386-394, Apr. 2023.
- [7] 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, Dec. 2023.
- [8] 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, Apr. 2023.
- [9] J. Fang, Q. Wu, "A non-reciprocal, ultrawideband energy selective antenna based on conductivity modulation effect," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 66, no. 6, pp. 1836-1847, Dec. 2024.