

전자기장 분포 기반 Mosaic 패턴 최적화를 이용한 Class-F PA OMN 설계

EM Field Distribution-Based Mosaic Pattern Optimization for Class-F PA OMN

서한동¹ · 권성욱² · 양혜민³ · 이채진⁴ · 박영철⁵

Han-Dong Seo¹ · Seong-Uk Kwon² · Hye-Min Yang³ · Chae-Jin Lee⁴ · Young-Cheol Park⁵

요약

본 논문에서는 Class-F와 같은 고조파 제어 전력 증폭기를 위한 OMN(output matching network) 설계에서 전자기(EM) 기반 multi-region mosaic 구조 최적화 기법을 제안한다. 전통적 방법으로 설계된 OMN을 출발점으로, 3, 6, 9 GHz에서의 임피던스 목표를 개선하기 위해 전자기장 분포 분석을 통해 E-field 및 H-field 집중 영역 인근에 49-bit multi-region mosaic 패턴을 정의하였다. 약 2,000개 패턴의 CST 3D EM 시뮬레이션 데이터로 random forest 모델을 학습하고, 약 200만 개 후보 패턴을 평가하여 최적 패턴을 도출하였다. 각 고조파 대역(± 0.2 GHz)에서 임피던스 응답이 목표 근처로 응집되도록 최적화하여 광대역 특성을 추구하였다. 시뮬레이션 결과 기존 대비 약 2%의 성능 개선을 확인하였으며, AWR 시뮬레이션을 통해 2.829~3.084 GHz 범위에서 드레인 효율 개선을 검증하였다.

Abstract

This paper proposes an electromagnetic (EM)-based multiregion mosaic structure optimization framework for designing output matching networks (OMNs) in harmonic-controlled power amplifiers such as Class-F. Starting from an OMN designed using traditional methods, a 49-bit multiregion mosaic pattern was defined near the E-field and H-field concentration regions through electromagnetic field distribution analysis to improve the impedance targets at 3, 6, and 9 GHz. A random forest model was trained using CST 3D EM simulation data from approximately 2000 patterns, and the optimal pattern was derived by evaluating approximately 2 million candidate patterns. Optimization ensured that the impedance response clustered near the target across each harmonic band (± 0.2 GHz), pursuing broadband characteristics. Simulation results confirmed a performance improvement of approximately 2% compared to the existing design. The drain efficiency improvement was verified across the 2.829~3.084 GHz range using AWR simulations.

Key words: Power Amplifier, Class-F, Output Matching Network, Mosaic Pattern, EM Optimization, Random Forest

I. 서론

현대 무선 통신 시스템에서 전력 증폭기는 송신단의

핵심 구성요소로서, 높은 전력 부가 효율과 선형성을 동시에 달성해야 하는 까다로운 설계 과제를 안고 있다. 이러한 요구사항을 충족하기 위해 Class-F, Class-F⁻¹, Class-J

「이 논문은 한국의국외대학교 교내 연구비와 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원(KRIT-CT- 23-005)과 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2024-00340504)을 받아 수행된 연구임.」

한국의국외대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Hankuk University of Foreign Studies)

1: 대학원생(<https://orcid.org/0009-0009-0212-8044>), 2: 대학원생(<https://orcid.org/0009-0001-1282-5873>), 3: 대학원생(<https://orcid.org/0009-0004-2492-5582>),

4: 대학원생(<https://orcid.org/0009-0004-7197-2752>), 5: 교수(<https://orcid.org/0000-0001-6275-4957>)

· Manuscript received January 7, 2026 ; Revised April 20, 2026 ; Accepted April 29, 2026. (ID No. 20260107-18S)

· Corresponding Author: Young-Cheol Park (e-mail: ycpark@hufs.ac.kr)

와 같은 고조파 제어(harmonic control) 구조가 널리 활용되고 있다. 이러한 증폭기의 동작 원리는 능동 소자의 드레인 단에서 기본 주파수(fundamental frequency) 성분과 고조파 성분의 전압 및 전류 파형을 적절히 조절함으로써 전력 손실을 최소화하고 효율을 극대화하는 데 있다.

이러한 이론적 목표를 실제 회로로 구현하기 위해서는 OMN(output matching network)의 역할이 결정적이다. 본 연구는 전통적 방법으로 설계가 완료된 class-F OMN을 출발점으로 삼아, 3, 6, 9 GHz에서의 임피던스 목표를 더욱 개선하고자 한다. 최근 전자기(EM) 시뮬레이션 기술의 고도화로 OMN의 물리적 형상을 직접 최적화하는 접근이 주목받고 있으며, deep learning 기반 역설계 기법이 RF 설계에서 활발히 연구되고 있다^{[1]-[3]}. 이러한 기존 연구들이 매칭 네트워크를 처음부터 설계하는 데 초점을 맞추는 것과 달리, 제안하는 방법론은 검증된 OMN 토폴로지를 출발점으로 삼아 EM 기반 mosaic 최적화를 통한 성능 개선(fine-tuning)의 가능성을 제시하는 것을 목적으로 한다.

본 연구에서는 마이크로스트립 구조에서 금속 분포를 이산적으로 조절하는 mosaic 패턴을 채택한다. Mosaic 패턴은 임피던스 응답을 미세하게 제어할 수 있는 높은 자유도를 제공하지만, 49-bit 패턴 공간은 약 2^{49} 개의 조합을 가지므로 전수 탐색은 현실적으로 불가능하다. 이에 본 연구에서는 EM 시뮬레이션으로 구축한 데이터셋을 기반으로 random forest를 활용해 약 200만 개의 후보 패턴을 효율적으로 평가하고, EM 시뮬레이션을 통한 재검증을 통해 최적 패턴을 도출하는 프레임워크를 제안한다.

또한 단일 주파수 최적화와 달리, 각 고조파 중심 주파수 주변 대역 내에서 임피던스 응답이 목표 근처로 응집되도록 하여 광대역 특성을 추구한다.

II. 본 론

Class-F 전력 증폭기는 드레인 단에서 구형파 전압과 반정현파 전류 파형을 구현하여 효율을 극대화한다. 이를 위해 기본 주파수에서는 트랜지스터에서 요구하는 최적 부하 임피던스를, 짝수 차 고조파에서는 단락 조건을, 홀수 차 고조파에서는 개방 조건을 제공해야 한다^[4]. 이론적으로 이상적인 조건이 만족되면 전압과 전류의 중첩이



그림 1. 최적화 대상 class-F OMN

Fig. 1. Optimization target class-F OMN.

최소화되어 전력 손실이 줄어들고 효율이 이론적 최댓값에 근접할 수 있다.

그림 1은 전통적인 방법으로 설계 완료된 class-F OMN을 보여주며, 이를 최적화 대상으로 삼는다. 이는 전송선 및 개방 스텐브(open stub), 단락 스텐브(short stub) 구조로 3, 6, 9 GHz에서의 임피던스 목표를 달성하도록 설계되었다. 구체적 목표는 3 GHz에서 $12+j10 \text{ Ohm}$, 6 GHz에서 단락, 9 GHz에서 개방 조건이다.

OMN의 주파수에 따른 임피던스를 효과적으로 조절하기 위해 특정 위치에 mosaic 패턴을 배치하였다. 이때, mosaic 패턴의 배치 위치는 EM 시뮬레이션을 통한 전계 및 자계 분포 분석을 통해 결정하였다. 전계 집중 영역에서 도체 패턴의 변화는 커패시턴스에, 자계 집중 영역에서는 인덕턴스에 영향을 미치므로^[5], 이 두 종류의 영역이 임피던스 응답 조절에 가장 민감한 위치임을 근거로 패턴 최적화가 수행될 후보 영역을 선정하였다. 그림 2 및 그림 3은 OMN에 대한 전자기장 시뮬레이션을 수행하고, 3, 6, 9 GHz에서 E/H-field의 세기를 등고선으로 나타낸다. 이를 바탕으로 목표 주파수에서 가장 세기가 높은 총 4개의 영역을 정의하고, 각 영역은 정사각형 셀로 구성되어 총 49-bit 이진 패턴 공간을 형성하여 최적화 결과가 선정된 영역 내 일부 셀의 선택적 변화로 나타날 수 있도록 하였다.

입력은 각 패턴에 해당하는 49-bit 이진 벡터이며, 출력은 주파수 sweep 지점들에서의 반사계수 실수부 및 허수부로 구성하였다. 이를 이용해 random forest 모델을 학습하였으며, 이후 최적화 단계에서는 3, 6, 9 GHz 각 중심 주파수에 대해 $\pm 0.2 \text{ GHz}$ 범위의 5개 주파수 지점을 사용하여 대역 기반 점수를 계산하였다. 본 모델은 전체 49-bit

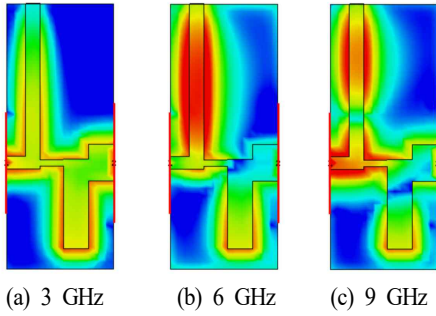


그림 2. 기본 주파수, 2차, 3차 고조파에서의 E-field
Fig. 2. E-field at fundamental frequency, 2nd and 3rd harmonic.

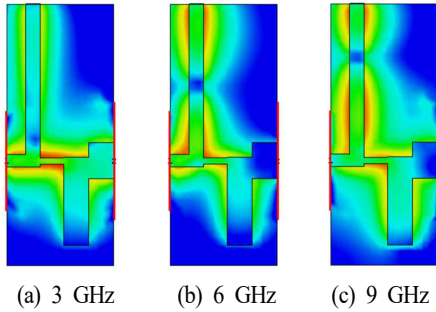


그림 3. 기본 주파수, 2차, 3차 고조파에서의 H-field
Fig. 3. H-field at fundamental frequency, 2nd and 3rd harmonic.

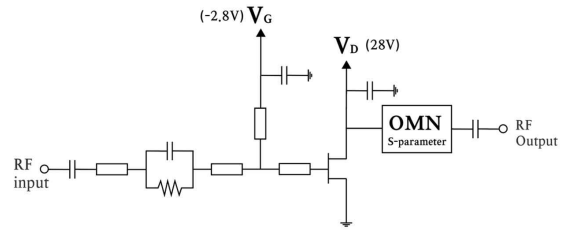
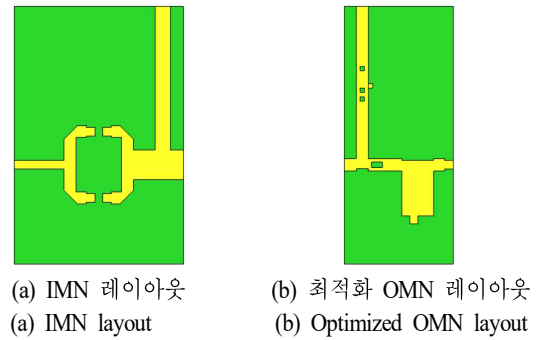
공간에 대한 절대 성능을 직접 결정하기보다는 대규모 후보군 중 유망한 패턴을 효율적으로 선별하기 위한 surrogate model로 사용하였다.

최적화는 기본파 및 각 고조파 중심 주파수 주변 대역 내에서 임피던스 응답이 목표 근처로 응집되도록 하는 접근을 채택하였다. 3, 6, 9 GHz 각각에 대해 ± 0.2 GHz 대역을 정의하고 0.1 GHz 간격의 5개 주파수 지점을 샘플링하여, 각 지점에서 반사계수와 목표 간의 거리를 계산하였다. 최적화 점수는 대역 내 최대 거리로 정의하여 대역 전체의 균일한 성능을 유도하였으며, 최종 점수는 세대역의 가중 합이다.

학습된 random forest 모델은 49-bit 패턴 공간을 무작위 샘플링으로 탐색하는데 사용되었다. 약 200만 개의 후보 패턴을 평가하여 최종 점수가 낮은 상위 후보 200개를 선별하고, 해당 패턴을 EM 시뮬레이션을 통하여 재검증하

였다. 재검증 과정에서 random forest 예측 점수와 시뮬레이션 결과 간의 Spearman 상관계수는 약 0.62로 나타나 모델이 패턴의 상대적 우수성을 어느 정도 구분할 수 있음을 확인하였다.

그림 4(a)는 시뮬레이션에 사용된 IMN(input matching network)을, 그림 4(b)는 재검증을 거쳐 선별된 최적 패턴이 적용된 OMN을, 그림 4(c)는 트랜지스터를 포함한 완성된 Class-F PA 회로 구성을 나타낸다. 기존 OMN과 mosaic 최적화를 적용한 OMN의 S-parameter를 추출한 뒤, 각각 Cadence AWR를 사용하여 IMN과 트랜지스터를 포함한 Class-F 전력 증폭기의 회로 시뮬레이션을 진행하였으며, 이때의 S-parameter는 그림 5에서 확인할 수 있다. 그림 6은 해당 시뮬레이션에서의 최적화 이전과 이후 주파수 대비 드레인 효율의 개선을 보여준다. 3 GHz 중심 주파수에서는 기존의 66.48%에서 최적화 후 68.41%로 약 2% 증가하였다. 또한, 최적화 이후 드레인 효율이 개선된 구역은 2.829 GHz에서 3.084 GHz까지로 약 255 MHz에 걸쳐 기존 대비 유의미한 효율 개선이 관찰되었다.



(c) 전체 class-F PA 회로도
(c) Complete class-F PA circuit schematic

그림 4. IMN, 최적화가 완료된 OMN의 레이아웃과 전체 class-F PA 회로도

Fig. 4. Layout of IMN, optimized OMN and complete class-F PA circuit schematic.

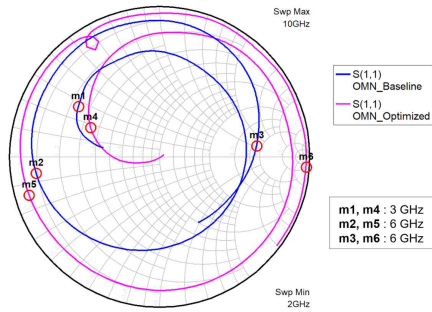


그림 5. 최적화 이전과 이후 OMN의 S11(2~10 GHz)
 Fig. 5. S11 of OMN before and after optimization target (2~10 GHz).

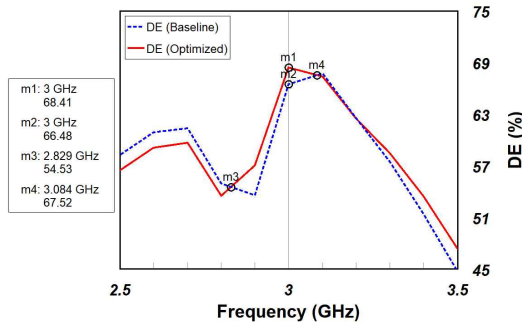


그림 6. 최적화 이전과 이후의 주파수에 따른 드레인 효율
 Fig. 6. Drain efficiency by frequency before and after optimization.

III. 결 론

본 논문에서는 고조파 제어 전력 증폭기를 위한 OMN 설계에서 EM 기반 multi-region mosaic 구조 최적화와 random forest 기반 탐색을 결합한 프레임워크를 제안하였다. 전자기장 분포 분석을 통해 49-bit multi-region mosaic 패턴을 정의하고 약 2,000개 pattern의 CST 시뮬레이션 데이터로 random forest 모델을 학습하였으며, 약

200만 개 패턴 평가를 통해 최적 패턴을 도출해 내었다.

회로 시뮬레이션 결과 3 GHz에서 기존 대비 약 2%의 드레인 효율 개선을 확인하였으며, 2.829~3.084 GHz의 약 255 MHz 범위에 걸쳐 유의미한 효율 개선을 달성하였다. 이는 출발점이 이미 수렴된 설계임에도 EM 기반 mosaic 최적화가 광대역 성능 향상 여지를 발굴할 수 있음을 시사하며, 해당 최적화 접근 방법론의 실용적 가치를 검증하였다. 향후 실제 제작 및 측정을 통한 성능 검증과 더불어 OMN 토폴로지 다변화 등의 후속 연구를 기대한다.

References

- [1] K. Sengupta, J. Zhou, Z. Liu, and E. A. Karahan, "AI enabling discovery and design of radio and high-frequency wireless chips beyond human intuition," *Computer*, vol. 58, no. 8, pp. 117-122, Aug. 2025.
- [2] H. Zhou, H. Chang, and C. Fager, "Deep learning driven design of highly efficient harmonic-tuned class F¹ power amplifiers," in *2025 55th European Microwave Conference (EuMC)*, Utrecht, Sep. 2025. pp. 208-210.
- [3] T. Wang, L. Gao, S. Yang, and X. Zhang, "Deep learning-assisted inverse design of pixelated two-port RF matching networks," in *2025 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*, Hong Kong, Aug. 2025, pp. 408-410.
- [4] Y. Y. Woo, Y. Yang, and B. Kim, "Analysis and experiments for high-efficiency class-F and inverse class-F power amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 5, pp. 1969-1974, May 2006.
- [5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2011.