

논문 2008-45TC-1-17

나선형 구조의 PBG를 적용한 도허티 전력증폭기의 선형성 개선

(Design of a Doherty Power Amplifier Using the Spiral PBG Structure
for Linearity Improvement)

김 선 영*, 서 철 현**

(Sunyoung Kim and Chulhun Seo)

요 약

본 논문에서는 도허티 전력증폭기의 출력 정합단에 새로운 광전자밴드갭 (PBG) 구조를 적용하여 높은 효율을 유지하면서 선형성을 개선시키도록 하였다. 제안된 나선형 PBG 구조는 비평면 제조 공정을 요구하지 않는 유전체 판 위에 패턴을 뜬 2차원의 규칙적인 격자이다. 실험결과를 통해서 보면, 이 구조는 접지 평면에 세 개의 셀을 식각시킨 기본적인 PBG 구조보다 더 넓은 저지대역과 더 높은 저지 특성을 갖는다. 또한 더욱 가파른 스킨트 특성을 갖는다. 이 새로운 PBG 구조는 선형성 개선을 위하여 도허티 전력증폭기에 적용되어 질 수 있다. 나선형 PBG 구조를 적용한 도허티 전력증폭기의 3차 혼변조 왜곡 (IMD3)은 코드분할 다중접속 (CDMA) 응용에서 -33dBc이다. 제안된 PBG 구조가 없는 도허티 전력증폭기와 비교했을 때, PAE는 유지하면서 IMD3은 -8dBc 개선되었다. 더욱이 나선형 PBG 구조는 기본적인 PBG 구조보다 물리적인 크기가 줄어서 전력증폭기의 전체 크기를 줄일 수 있었다.

Abstract

In this paper, the linearity of Doherty power amplifier has been improved by applying a new Photonic Bandgap (PBG) structure on the output of amplifier. The proposed spiral PBG structure is a two-dimensional (2-D) periodic lattice patterned on a dielectric slab that does not require nonplanar fabrication process. This structure has more broad stopband and high suppression performance than the conventional three cell PBG. Also, It has a sharp skirt property. We obtained the 3rd-order intermodulation distortion (IMD3) of -33dBc for CDMA applications with that of maintaining the constant power added efficiency (PAE), the IMD3 performance is improved as much as -8 dB compared with a Doherty power amplifier without PBG structure. Moreover, the physical length of PBG is shortened, therefore the whole amplifier circuit size is considerably reduced.

Keywords : Doherty Amplifier, Photonic Bandgap(PBG), Linearity

I. 서 론

도허티 전력증폭기는 넓은 출력범위에서 고효율 특성을 얻기 위한 가장 대표적인 방법 중에 하나이며, 부가적인 회로 없이 간단하게 구현할 수 있기 때문에 상

용화를 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다^[1]. 또한 도허티 기법을 사용할 경우 높은 효율 개선과 동시에 요구되는 선형성을 만족시킬 수 있다. 하지만 단일한 도허티 전력증폭기에서 최적의 효율과 높은 선형 특성을 얻기에는 여전히 어려움이 있다. 한 편, 접지 평면에 식각된 주기적인 격자를 갖는 마이크로스트립 라인은 전자기적 전파에 대한 저지대역을 갖는 Photonic Bandgap (PBG) 구조와 같이 동작한다. 이러한 형태의 PBG 구조는 광대역 전력증폭기에서 고조파 조절을 위하여 적용되어 질 수 있다^[2~3]. 본 논문에서는 선형성을 개선시

* 학생회원, ** 정회원, 송실대학교 정보통신전자공학부 (Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

※ 이 연구는 2007학년도 송실대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음

접수일자:2007년12월12일, 수정완료일:2008년1월15일

키고 크기를 줄이기 위한 새로운 PBG 구조를 제시하였다. 이 새로운 PBG 구조는 내부에 삽입된 얇은 선과 네 개의 개방형 루프 내부에 나선형 공진기를 적용한 단위 셀을 이용하여 설계되었다. 최근에 보고된 다른 PBG 구조들과 비교했을 때, 제안된 나선형 PBG 구조는 동일한 저지 특성에서 작은 크기를 갖는다. 또한, 이 구조는 현재까지 보고된 다른 PBG 구조들 보다 동일한 크기에서 더 높은 저지 특성과 가파른 스킵트 특성을 갖는다. 제안된 나선형 PBG 구조를 도허티 전력 증폭기의 출력 정합회로에 구현함으로써 높은 효율을 유지 하면서 동시에 높은 선형성을 만족하도록 하였다.

II. 본 론

1. 나선형 구조의 PBG 설계

그림 1-(a)와 같은 나선형 마이크로스트립 라인은 필터링 특성을 가지며, 이는 LC 등가 회로 모델로 분석할 수 있다. 나선형 마이크로스트립 라인의 중심축에 평행한 방향으로 시간에 따라 변하는 자기장 (Time-varying magnetic field)이 가해지면 마이크로스트립 라인에 전류가 유기된다. 이 전류 루프가 흐르는 선로의 길이만큼 분산 인덕턴스(Distributed inductance)

가 발생하며 선로들 사이에 상호 인덕턴스(Mutual inductance)가 발생한다. 또한 나선형 마이크로스트립 라인의 안쪽과 바깥쪽 선로 사이에 분산 캐패시턴스(Distributed capacitance)와 양 끝 단에서 가장자리 캐패시턴스(Fringing capacitance)가 발생한다. 이 두 캐패시턴스는 등가 회로적으로 직렬로 연결되어 있다고 할 수 있다. 결과적으로 나선형 마이크로스트립 라인은 일반적인 대역저지 필터의 LC공진회로와 같으며 등가 회로에 대한 공진 주파수 ω_0 는 $1/\sqrt{LC}$ 의 값을 갖는다. 그림 1-(b), (c)는 제안된 나선형 PBG 구조의 단위 셀 형태를 보여준다. 나선형 마이크로스트립 라인 형태를 나란히 연결할 경우, 마이크로스트립 라인 사이에서 커플링이 발생한다. 나선형 구조의 커플링은 개방형 루프 구조보다 더욱 크기를 줄이고 성능을 향상 시킬 수 있다^[4]. 개방형 루프 형태 내부에 나선형 구조를 적용함으로써 개방형 루프의 필터 특성을 극대화 할 수 있다. 결합된 PBG 구조들은 나선형 루프간의 간격 s만큼 분리되어지고, 선 두께 w, 길이 l, 개방형 루프의 개방된 공간의 폭 g에 의해 구현된 한 쌍의 동일한 개방형 루프에 의해 구현된다. 각각의 나선형 PBG 구조들은 개방된 공간 부분에서 최고치의 전계 강도를 갖고, 반대 부분에서 최고치의 자계 강도를 갖는 것으로 설명될 수 있다. 그림 1-(b)는 개방형 루프들 사이에서 발생하는 전계를 이용하기 위한 단위 셀이다. 그림 1-(c)는 개방형 루프들 사이에서 발생하는 자계를 이용하기 위한 단위 셀을 보여준다. 이 커플링 구조에서 두 개의 결합된 개방형 루프들의 결합 부분에서의 전계와 자계의 분포가 동시에 존재하기 때문에, 전계와 자계 모두 발생되고 강화될 수 있다. 이러한 커플링을 혼합 결합이라고 한다. 이 원리 때문에, 혼합 결합은 매우 높은 결합 효과를 얻을 수 있고, 그래서 등가 캐패시턴스 C 또한 매우 크다. 이러한 높은 캐패시턴스 때문에, 이 구조는 낮은 주파수 대역에서 크기를 줄이는데 이용될 수 있다. 제안된 나선형 PBG 구조는 주기성을 갖도록 두 가지 형태의 단위 셀을 2 × 6 격자로 번갈아 배치하였다. 새로운 PBG 구조의 특성을 확인하기 위해 Ansoft사의 상용 시뮬레이션 툴인 HFSS를 이용하여 설계 하였으며, 나선형 PBG 구조와의 비교를 위해 접지 평면에 세 개의 셀을 식각시킨 기본적인 PBG 구조가 함께 설계되었다. 시뮬레이션에 이용한 매개변수들은 다음과 같다.

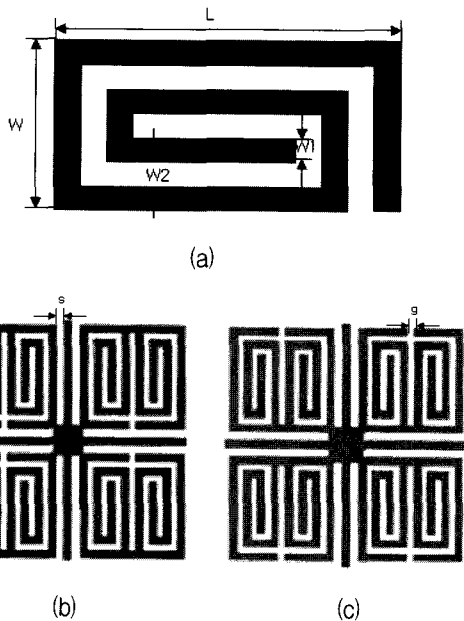


그림 1. (a) 나선형 마이크로스트립 라인, (b) 제안한 나선형 PBG 구조의 단위 셀 타입 I, (c) 단위 셀 타입 II

Fig. 1. (a) Spiral microstrip line, (b) unit cell type I, (c) unit cell type II.

(1) 기본적인 PBG 구조:

사각 셀 크기 = 13 × 16;

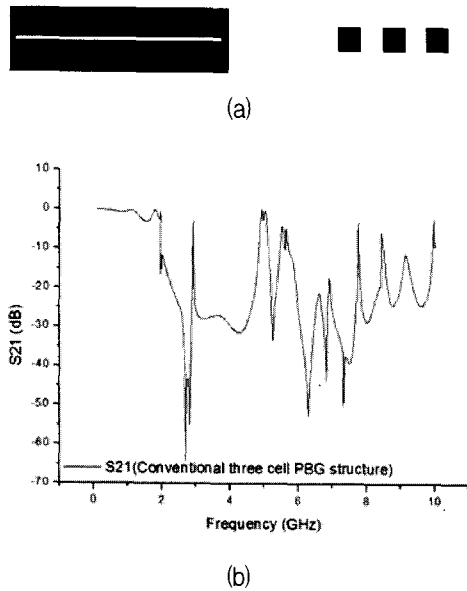


그림 2. (a) 접지 판에 세 개의 셀을 식각시킨 일반적인 PBG 구조의 시뮬레이션 모델, (b) 시뮬레이션 결과
 Fig. 2. (a) Simulation model of the conventional three cell PBG structure, (b) simulated S21 parameter result.

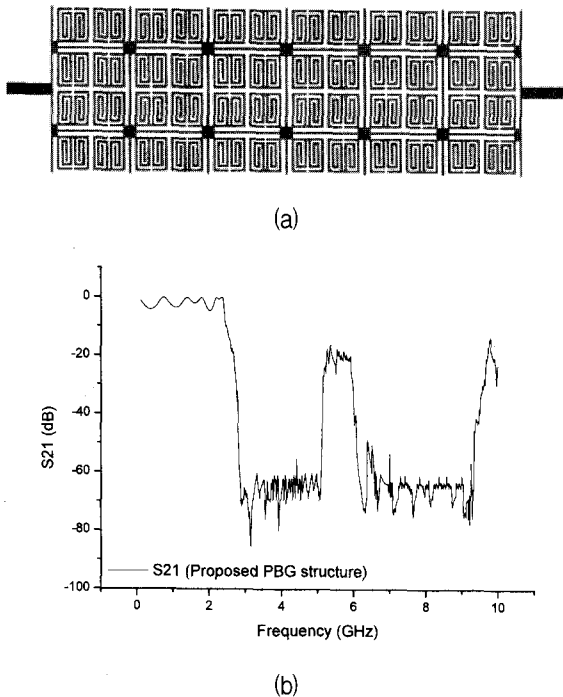


그림 3. (a) 제안된 나선형 PBG 구조의 시뮬레이션 모델, (b) 시뮬레이션 결과 S21
 Fig. 3. (a) Simulation model of the proposed spiral PBG structure, (b) simulated S21 parameter result.

(2) 나선형 PBG 구조:

$$s = 0.3 \text{ mm}, w = 0.2 \text{ mm}, g = 0.2 \text{ mm}.$$

그림 2와 3은 각각의 PBG 구조의 시뮬레이션 모델과 결과를 보여준다. 그림에서 보는 것처럼, 두 가지 모델 모두 2 GHz 이상의 주파수에서 저지대역 특성을 나타내는 것이 관찰되었다. 기본적인 PBG 구조의 길이는 120 mm이고, 제안된 PBG 구조는 기본적인 PBG 모델의 35%에 불과한 44.6 mm의 길이를 갖는다. 나선형 PBG 구조의 저지 특성은 -70 dB 이하이며 저지 대역의 대역폭은 2.8 ~ 4.8 GHz로 2 GHz 이다. 또한, 6 GHz 이상의 주파수에서, -70 dB 이하의 저지 특성을 갖는 저지 대역을 갖는다. 기존에 발표된 다른 구조의 PBG들과 비교했을 때, 제안된 PBG 구조는 높은 저지 특성, 가파른 스킵 특성, 넓은 저지 대역폭의 개선된 특성들을 나타낸다. 그러므로 제안된 PBG 구조는 예상대로 동일한 특성에서 크기를 더 줄일 수 있다. 본 논문에서는 선형성 개선과 다른 선형화 기법을 사용했을 때보다 크기를 줄이기 위하여 도허티 전력증폭기의 출력 정합회로에 제안된 PBG 구조를 적용했다.

2. 나선형 PBG 구조의 제작

그림 4는 기본적인 PBG 구조의 제작된 기판 모습과 측정된 S-parameter 결과를 보여준다. 이 PBG 구조의 삽입 손실은 1.8 GHz의 통과 대역에서 -0.5 dB이다. 저지 특성은 3.6 GHz의 저지 대역에서 -30.6 dB 이하이다. 그림 5은 제안된 나선형 PBG 구조의 제작된 기판 모습과 측정된 S-parameter 결과를 보여준다. 이 PBG 구조의 삽입 손실은 1.8 GHz의 통과 대역에서 -1.17 dB이다. 저지 특성은 3.6 GHz의 저지 대역에서 -74dB 이하이다. 또한 제안된 PBG 구조의 저지 대역폭은 2.8 ~ 4.8 GHz로 2 GHz이다. 기본적인 PBG 구조와 비교했을 때 제안된 PBG 구조의 저지특성은 약 -43 dB 개선되었다. 크기 면에서는 기본적인 PBG 구조가 128mm, 나선형 PBG 구조는 44.6 mm로 약 35%로 줄었을 뿐만 아니라, 스킵 특성과 저지 대역폭 등의 면에서도 크게 개선된 것을 볼 수 있다. 또한, 이 구조는 6 GHz 이상의 주파수에서도 -70 dB 이하의 저지 특성을 갖는 저지 대역을 갖는다.

3. 도허티 전력증폭기의 제작

나선형 PBG 구조를 적용한 도허티 증폭기의 성능향상을 비교하기 위하여 그림 6의 일반적인 구조의 도허티 전력증폭기를 설계하였다^[5-6]. LDMOS 소자인

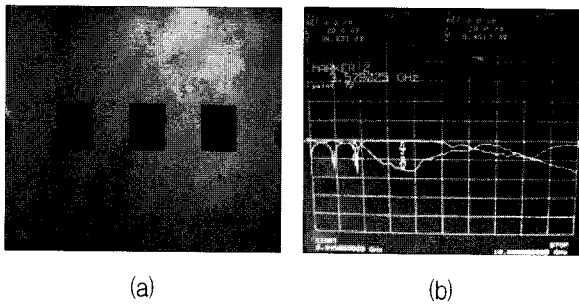


그림 4. (a) 기본적인 PBG 구조의 접지 평면 제작 모습, (b) 측정결과 S21, S11
 Fig. 4. (a) Fabricated photograph of the conventional three cell PBG structure, (b) measured S21, S11 parameter results.

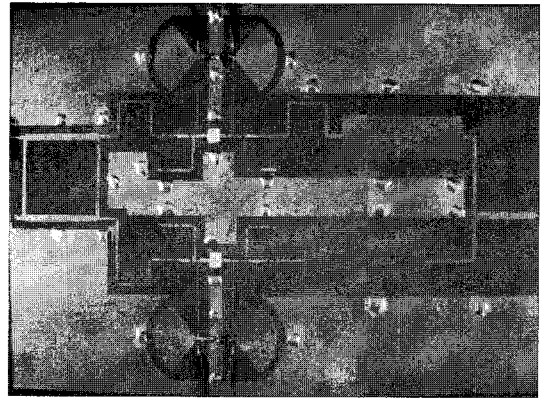


그림 7. 출력 정합단에 나선형 PBG를 적용한 도허티 전력증폭기의 구조
 Fig. 7. Fabricated photograph of the Doherty power amplifier using the spiral PBG structure.

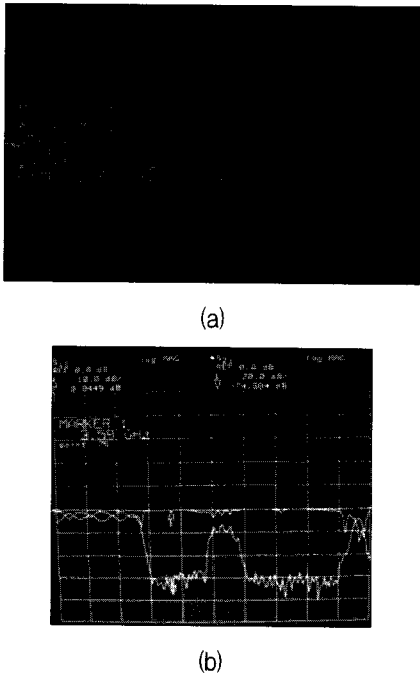


그림 5. (a) 제안된 나선형 PBG 구조 제작 모습, (b) 측정결과 S21, S11
 Fig. 5. (a) Fabricated photograph of the spiral PBG structure, (b) measured S21, S11 parameter results.

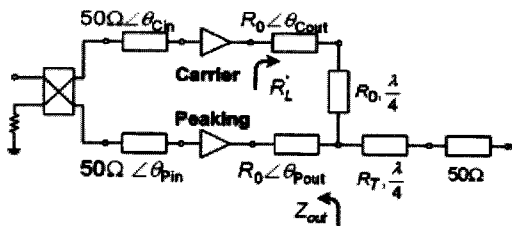
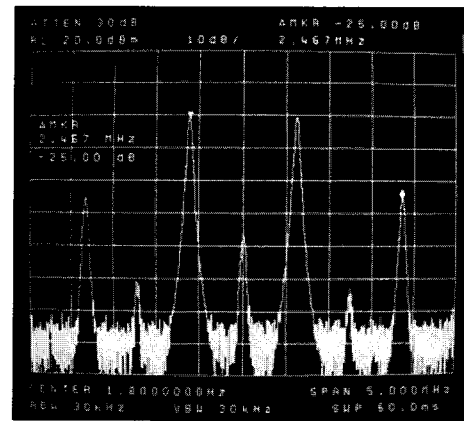
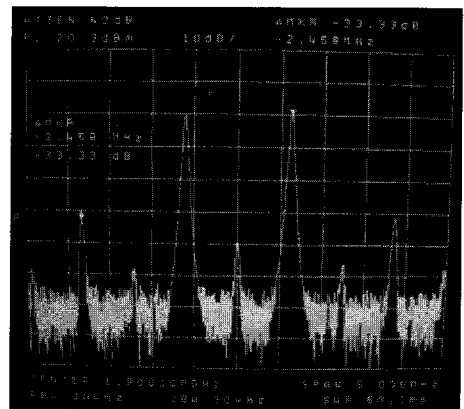


그림 6. 일반적인 도허티 전력증폭기의 구조
 Fig. 6. Conventional Doherty power amplifier.

Motorola사의 MRF281SR1을 사용하였고, 주 증폭기는 class AB, 보조 증폭기는 게이트 전압을 낮추어 class



(a)



(b)

그림 8. IMD3 측정치 (a) PBG 구조가 없는 도허티 전력증폭기, (b) 제안된 PBG 구조를 적용한 도허티 전력증폭기
 Fig. 8. Measured IMD3 results (a) Doherty power amplifier without the PBG structure (b) Doherty power amplifier with the proposed PBG structure.

C로 동작하도록 설계하였다. 제작에 사용된 기판은 유전율을 3.2와 두께 31 mils를 갖는 Taconic TLC이다.

CDMA 응용 대역 (1.8GHz)에서 구현된 일반적인 도허티 전력증폭기는 P1dB점에서 37.83 dBm의 출력 전력, 11.83 dB의 전력 이득, 39.08 %의 power added efficiency (PAE), -25 dBc의 IMD3를 갖는다. 그림 8-(a)는 일반적인 도허티 전력증폭기의 IMD3 측정결과를 보여준다. 제안된 나선형 PBG 구조를 이용한 도허티 전력증폭기는 P1dB점에서 37.78 dBm의 출력 전력, 12.5 dB의 전력 이득, 38.97 %의 PAE, -33 dBc의 IMD3를 갖는다. PBG를 적용하지 않은 도허티 전력증폭기와 비교했을 때, 제안된 PBG 구조를 이용한 도허티 전력증폭기의 IMD3는 출력 전력이 변하지 않은 상태에서 -8 dBc 개선되었다. 제안된 PBG 구조의 3.6 GHz의 2차 고조파 주파수에서의 높은 저지 특성 때문에 전력증폭기의 선형성은 예상대로 크게 개선되었다.

III. 결 론

본 논문에서는 도허티 전력증폭기의 효율과 선형성을 동시에 개선하기 위한 소형이면서 새로운 구조의 PBG를 제시하였다. 제안된 구조는 비평면 제조 공정을 요구하지 않는 두 가지 형태의 단위 셀에 의해 번갈아 배열된 2 × 6 격자로 구성되었다. 측정 결과를 통하여, 새로운 PBG 구조는 기본적인 PBG 구조보다 2.8 ~ 4.8 GHz의 더 넓은 저지 대역, 더 가파른 스킨트 특성, -70 dB 이하의 더 높은 저지 특성을 갖는 것을 확인하였다. 또한 크기 면에서는 일반적인 구조의 35%에 지나지 않아 전력증폭기의 소형화에 기여할 수 있는 가능성을 보였다. 여기서는 광대역 저지대역 여파기의 역할을 하는 나선형 PBG 구조를 도허티 전력증폭기의 출력 정합회로에 적용하였다. 기본적인 도허티 전력증폭기와 비교했을 때, IMD3는 CDMA 응용에서 출력 전력이 변하지 않은 상태에서 -8 dBc 개선되었다. 제안된 PBG 구조의 3.6 GHz의 2차 고조파 주파수에서의 높은 저지 특성 때문에, 도허티 전력증폭기의 선형성은 예상대로 크게 개선되었다.

참 고 문 헌

[1] W. H. Doherty, "A new high efficiency power amplifier for modulated waves," Proc. IRE, vol. 24, no. 9, pp. 1163-1182, Sep. 1936.
 [2] Bao-qin Lin, Qiu-rong Zheng, and Nai-chang Yuan, "A Novel Planar PBG Structure for Size Reduction," IEEE Microwave and Wireless Com-

ponents Letters, vol. 16, no. 5, pp. 269-271, May 2006.

[3] Taesun Kim and Chulhun Seo, "A Novel Photonic Bandgap Structure for Low-Pass Filter of Wide Stopband," IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 10, no. 1, pp. 13-15, January 2000.
 [4] J. Joubert, "Spiral microstrip resonators for narrow-stopband filters", IEE Proc.-Microw. Antennas Propag., vol. 150, No. 6, December 2003.
 [5] Yu Zhao, Andre G. Metzger, Peter J. Zampardi, Masaya Iwamoto, and Peter M. Asbeck, "Linearity Improvement of HBT-Based Doherty Power Amplifiers Based on a Simple Analytical Model", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, VOL. 54, NO. 12, December 2006.
 [6] Heung-Jae Choi, Jong-Sik Lim, Young-Chae Jeoung, and Chul-Dong Kim, "Doherty Amplifier Using Load Modulation and Phase Compensation DGS Microstrip Line", Proceedings of the 36th European Microwave Conference, September 2006.

저 자 소 개



김 선 영(학생회원)
 2006년 2월 숭실대학교 정보통신
 전자공학부 (공학사)
 2007년 3월~현재 숭실대학교
 정보통신공학과 석사과정
 <주관심분야 : 초고주파 회로 설
 계, RF Power Amplifier, RFIC,
 Digital RF 등>

서 철 헌(정회원)

대한전자공학회논문지 vol. 31, no. 6 참조