

Q값과 2차 고조파 하모닉 억압 특성을 개선한 마이크로스트립 공진기

Microstrip Resonator with Q Factor and High Second Harmonic Suppression

고 민 호 · 박 효 달 · 김 천 석*

Min-Ho Go · Hyo-Dal Park · Chun-Suk Kim*

요 약

본 논문에서는 기본 공진 주파수(f_0)에서 단락 부하를 갖는 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기의 Q값과 2차 직렬 공진 주파수($2f_0$)가 천이되는 문제를 해결하여 2차 고조파 제거 특성을 개선한 새로운 구조의 마이크로스트립 공진기를 제안하였으며 제안된 마이크로스트립 공진기는 마이크로웨이브 및 밀리미터 대역에서 비선형 회로들의 고조파 제거 특성을 개선하는데 적용할 수 있을 것이다.

Abstract

This paper describes that the Q factor of a conventional $\lambda/4$ -microstrip resonator with short load can be improved and also the problem that the serial-resonant frequency($2f_0$) should be deviated from can be settled by the proposed $\lambda/4$ -microstrip resonator, which is used to suppress the harmonics of a nonlinear circuit.

Key words : Resonator, Suppression, Microstrip

I. 서 론

최근에 마이크로웨이브 및 밀리미터 대역의 초고속 무선 통신 시스템에 관한 연구의 필요성이 증가 되면서 송수신기를 구성하는 회로에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1].

전력 증폭기(power amplifier), 혼합기(mixer), 국부 발진기(local oscillator) 그리고 체배기(multiplier)와 같은 비선형 회로에서는 원하지 않는 고조파 신호는 억압시키고 원하는 신호는 손실 없이 통과시켜 주는 필터 및 공진기 회로가 필요하다.

마이크로웨이브 및 밀리미터 대역에서 사용되는 공진기로는 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기, 유전체 공진기 같은 평면 또는 3차원 구조가 일반적으로 사용

되고 있다. 유전체 공진기는 높은 Q값을 가지며 공진 대역폭이 좁고 고가이며 회로의 크기가 커지는 단점이 있다. 반면에 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기는 공진 대역폭이 넓고 저가이며 소형으로 구현할 수 있지만 유전체 공진기보다 Q값이 낮은 단점이 있다. 또한 이상적인 단락 부하를 갖는 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기는 기본 공진 주파수(f_0)에서는 병렬 공진 특성을 나타내고, 2차 공진 주파수($2f_0$)에서 직렬 공진 특성을 나타내지만 실제로는 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기의 직렬 공진 특성이 2차 공진 주파수($2f_0$)에서 천이된 주파수에서 나타나므로 2차 고조파 억압 성능의 한계를 나타낸다.

기존에는 마이크로스트립 공진기의 Q값을 개선

인하대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, InHa University)

*국립여수대학교 전자통신공학과(Department of Electronic Communication Engineering, YoSu National University)

· 논문 번호 : 20050602-061

· 수정완료일자 : 2005년 9월 7일

하기 위해서 두 개의 공진기를 사용하는 방법^{[2],[3]}과 CMR(Coupled Microstrip Resonator) 구조를 사용하는 방법^{[4],[5]}, 그리고 인덕턴스 성분은 줄이고 캐패시턴스 성분을 증가시켜서 공진기의 Q값을 개선하는 방법^[6] 등이 제안되었지만 2차 공진 주파수가 천이되는 문제에 대한 접근은 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 기본 공진 주파수(f_0)에서 단락 부하를 갖는 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기의 Q값을 개선하고 동시에 2차 직렬 공진 주파수($2f_0$)가 천이되는 문제를 개선할 수 있는 마이크로스트립 공진기를 제안하였다.

본 논문의 구성은 II장에서는 기존 마이크로스트립 공진기의 이론과 특성에 대해서 설명하고 III장에서는 제안된 마이크로스트립 공진기의 이론과 특성에 언급하며 IV장에서는 측정 결과에 대해서 설명하고 V장에서 결론을 내린다.

II. 기존 $\lambda/4$ 마이크로스트립 공진기

2-1 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기 이론

단락 부하($Z_L=0$) 또는 개방 부하($Z_L=\infty$)를 갖는 전송 선로 입력 임피던스는 식 (1)과 식 (2)처럼 전송 선로 길이에 따라서 병렬 공진과 직렬 공진 현상이 주기적으로 반복되는 특성을 갖는다^[7].

$$Z_{in} = Z_{sc} = jZ_0 \tan \beta \ell \quad (1)$$

$$Z_{in} = Z_{oc} = -jZ_0 \cot \beta \ell \quad (2)$$

전송 선로의 길이를 $\lambda_0/4$ 로 고정시키고 동작 주파수에 따라 전송 선로의 반복성(repetition) 특성을 살펴보기 위해서 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 식 (1)과 식 (2)를 재정리하면

$$\lambda = \frac{V_P}{f} \quad (3)$$

여기서 V_P = 전송 속도

$$\frac{2\pi \ell}{\lambda} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (4)$$

여기서 $\ell = \frac{\lambda_0}{4}$, $\lambda_0 = \frac{V_P}{f_0}$

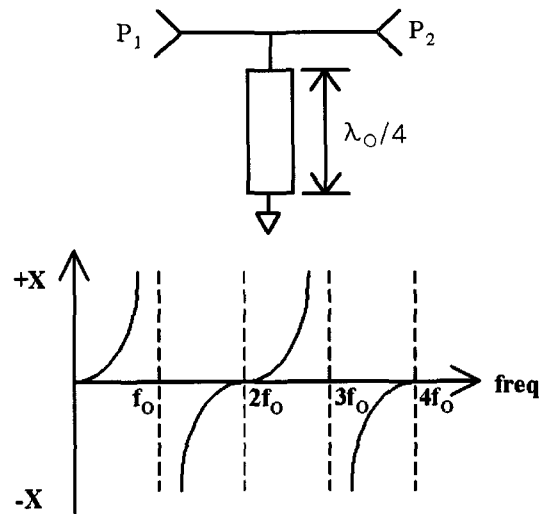
f_0 = 공진 주파수

주파수에 대해서 전송 선로 임피던스를 살펴볼 수 있는 식 (5)와 식 (6)으로 표현할 수 있다.

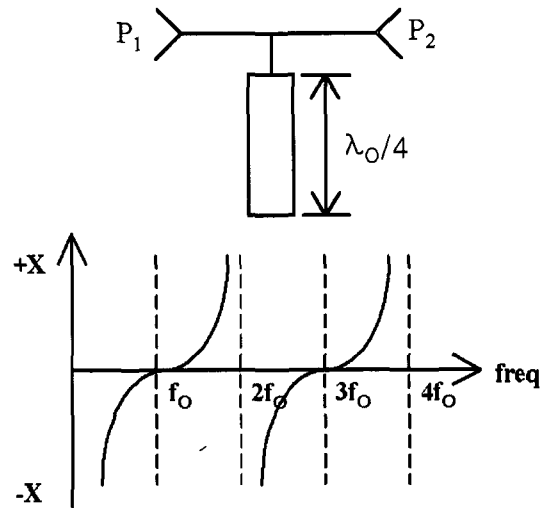
$$Z_{sc} = jZ_0 \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_0}\right) \quad (5)$$

$$Z_{oc} = -jZ_0 \cot\left(\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_0}\right) \quad (6)$$

그림 1은 선로 길이를 $\lambda_0/4$ 로 고정했을 때 동작



(a) 단락 부하($Z_L=0$)인 경우
(a) Short load ($Z_L=0$)



(b) 개방 부하($Z_L=\infty$)인 경우
(b) Open load ($Z_L=\infty$)

그림 1. 전송 선로 임피던스
Fig. 1. Transmission line impedance.

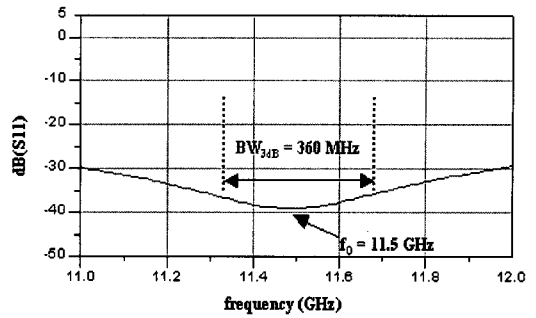
주파수에 대한 전송 선로 임피던스의 변화를 나타낸 것으로 그림 1(a)는 단락 부하($Z_L=0$)를 갖는 전송 선로의 임피던스 특성을 나타내었고 그림 1(b)는 개방 부하($Z_L=\infty$)를 갖는 전송 선로의 임피던스 특성을 나타내었다.

2-2 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기 특성

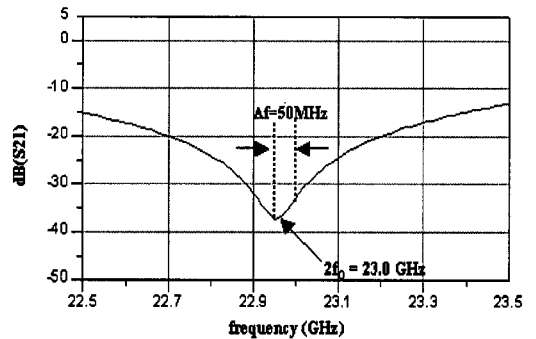
그림 2는 기존의 단락 부하를 갖는 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기의 Q 특성과 2차 고조파 제거 특성을 살펴보기 위해서 모의실험을 수행하였다. 11.5 GHz 기본 공진 주파수(f_0)에서 전송선 길이를 $\lambda/4$ 로 고정시켰을 때 그림 2(a)는 기본 공진 주파수에서의 dB (S_{11}) 특성으로 Q값 특성을 살펴보았으며 그림 2(b)는 2차 공진 주파수($2f_0$)에서 dB(S_{21}) 특성으로 2차 고조파 제거 특성을 살펴보았다.

그림 2(a)처럼 단락 부하를 갖는 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기는 기본 공진 주파수(f_0)에서 병렬 공진 회로로 동작하며, 3 dB-대역폭(BW_{3dB})은 360 MHz 정도이다. 그림 2(b)에서 보듯이 23.0 GHz 2차 공진 주파수($2f_0$)에서 직렬 공진이 발생하지 않고 50 MHz 천이된 22.95 GHz에서 최대 직렬 공진이 발생한다. 그림 3은 동작 주파수에 따른 실효 유전율을 나타낸 것으로 주파수가 증가함에 따라 마이크로스트립 라인의 실효 유전율이 증가한다. 실효 유전율의 증가는 유전체 내에서 진행되는 전자기파의 파장이 실효 유전율의 제곱근 값으로 나누어지므로 실효 파장이 줄어든다^[7].

동작 주파수를 고정했을 때 전송 선로 길이가 $\lambda/2$ 가 되면 직렬 공진 특성을 나타내지만 파장이 짧아지므로 2차 공진 주파수($2f_0$)보다 낮은 주파수에서 직렬 공진 특성이 발생한다. 또한 접지 연결을 위해서 사용하는 불연속 특성과 비아(via) 구조로 인해서 발생하는 기생 성분 및 분산 특성^[8]으로 2차 직렬 공진 주파수($2f_0$)의 천이 특성이 영향을 받는다. 기존의 단락부하를 갖는 $\lambda/4$ 마이크로스트립 공진기는 그림 2(a)와 그림 2(b)에서 보듯이 제한된 Q값과 2차 공진 주파수($2f_0$)에서 최대 직렬 공진 특성을 나타내지 못하며 또한 공진기의 불연속과 비아 구조에 따라서 천이되는 특성이 영향을 받기 때문에 기본 병렬 공진 특성(f_0)과 2차 직렬 공진($2f_0$) 특성을



(a) 기본 공진 주파수(f_0)에서 반사계수
(a) The reflection coefficient at f_0



(b) 2차 공진 주파수($2f_0$)에서 고조파 제거 특성
(b) The harmonic suppression around $2f_0$

그림 2. 단락 부하를 갖는 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기
Fig. 2. Conventional configuration $\lambda/4$ -microstrip resonator with short load.

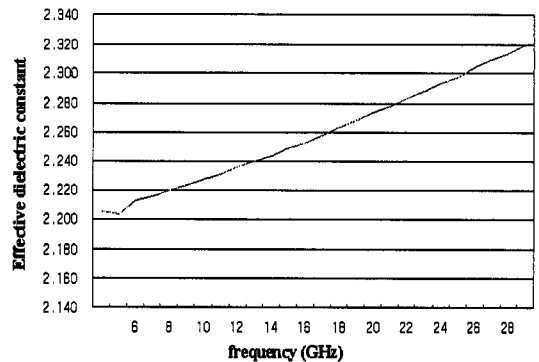


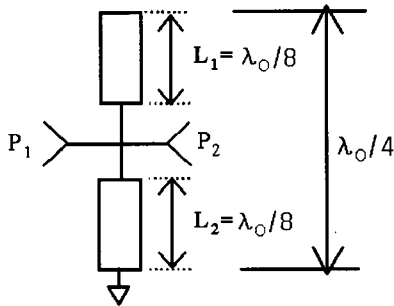
그림 3. 주파수에 따른 실효 유전율
Fig. 3. Effective dielectric constant with respect to frequency.

동시에 만족시킬 수 없는 단점을 갖는다.

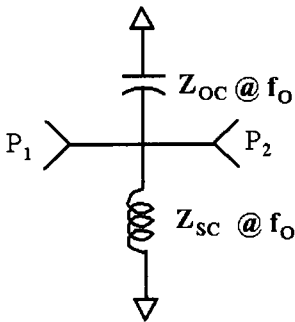
Ⅲ. 제안된 마이크로스트립 공진기 설계

3-1 제안된 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기 이론

논문에서 제안하는 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기는 그림 4(a)와 같다. 제안된 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기는 기본 공진 주파수(f_0)에서 개방 부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로와 단락 부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로를 병렬로 구성하여 전체적으로 마이크로스트립 선로의 길이가 기본 공진 주파수(f_0)에서 $\lambda_0/4$ 길이를 갖도록 구성하였다. 그림 1에서 보듯이 개방 부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로는 기본 공진 주파수(f_0)에서 $\lambda_0/4$ 보다 짧기 때문에 용량성(capacitive) 성분을 나타내는 반면, 단락부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로는 유도성(inductive) 성분을 갖기 때문에 그림 4(b)처럼 등가 회로를 구성할 수 있으며 식 (1)과 (2)로부터 식 (7)과 식 (8)로 표현할 수 있다.



(a) 구성도
(a) The configuration of the proposed $\lambda/4$ -microstrip resonator



(b) 등가회로
(b) The equivalent circuit of the proposed $\lambda/4$ -microstrip resonator

그림 4. 제안된 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기
Fig. 4. The proposed $\lambda/4$ -microstrip resonator.

두 마이크로스트립 선로의 전체 길이(L_1+L_2)가 $\lambda_0/4$ 이므로 두 마이크로스트립 선로 성분이 합쳐져서 나타나는 리액턴스(reactance) 또는 서셉턴스(susceptance)의 크기는 같지만 허수가 반대 부호를 갖게 된다.

$$Z_{sc} = jZ_0 \tag{7}$$

$$Z_{oc} = -jZ_0 \tag{8}$$

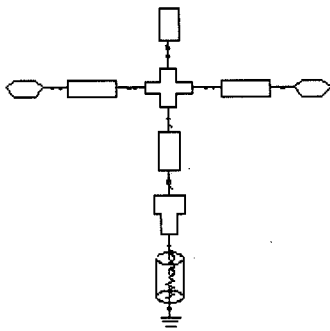
즉, 기본 공진 주파수(f_0)에서는 두 마이크로스트립 선로의 전체 길이가 $\lambda_0/4$ 이므로 병렬 공진(parallel resonance) 특성을 나타내며 2차 공진 주파수($2f_0$)에서는 개방 부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로가 $\lambda_0/4$ 로서 동작하기 때문에 직렬 공진(serial resonance) 특성을 나타낸다.

3-2 제안된 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기 특성

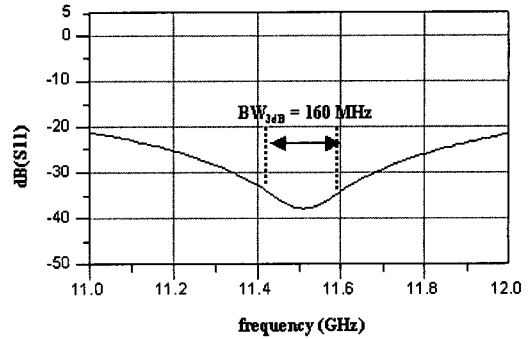
제안된 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기의 동작 특성을 살펴보기 위해서 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기의 특성 분석에서 사용했던 동일한 환경에서 모의 실험을 실시하였다.

그림 5(a)는 모의 실험에 사용된 회로를 나타낸 것으로 접합 불연속과 비아홀(via) 및 측정을 위한 입출력 마이크로스트립 선로로 구성되어 있다. 그림 5(b)처럼 기본 공진 주파수(f_0)에서는 병렬 공진 회로로 동작하고 있으며, 3 dB-대역폭(BW_{3dB})은 160 MHz로 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기보다 개선된 특성을 나타내고 있다. 그림 5(c)에서 보듯이 2차 공진 주파수($2f_0$)에서는 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기에서 나타나는 주파수 천이 변화폭(Δf)을 최소화할 수 있음을 알 수 있다. 이런 특성은 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기보다 -15 dB 정도 우수한 고조파 억압 특성을 있으며 그림 5(d)는 전체 동작 대역에서 반사 계수 및 고조파 억압 특성을 나타내었다. 또한 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기는 선로 길이를 변화시키면 기본 공진 주파수(f_0)와 2차 공진 주파수($2f_0$)의 공진 특성이 동시에 변하기 때문에 고조파 억압 특성을 개선하는 한계점을 갖는다.

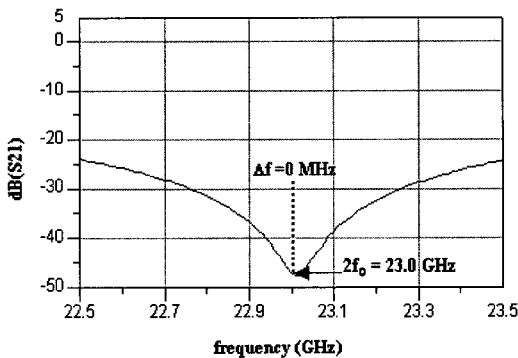
하지만 제안된 공진기는 개방 부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로 길이(L_1)와 단락 부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로 길이(L_2)의 합을 $\lambda/4$ 로



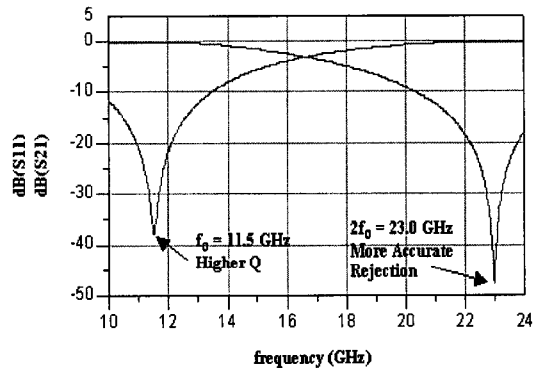
(a) 회로도
(a) Circuit



(b) 기본 공진 주파수(f_0)에서 반사 계수
(b) The magnitude of reflection coefficient at f_0



(c) 2차 공진 주파수($2f_0$)에서 고조파 억압 특성
(c) The harmonic suppression around $2f_0$



(d) 동작 대역에서 Q-factor 및 고조파 억압 특성
(d) The magnitude of reflection coefficient and spurious resonance response over a operating range

그림 5. 제안된 $\lambda/4$ 마이크로스트립 공진기
Fig. 5. The proposed $\lambda/4$ -microstrip resonator.

유지시키면서 개방 부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로 길이(L_1)를 조정할 수 있기 때문에 기본 공진 주파수(f_0)의 천이없이 2차 공진 주파수($2f_0$)의 주파수 천이 변화폭(Δf)을 최소화할 수 있다.

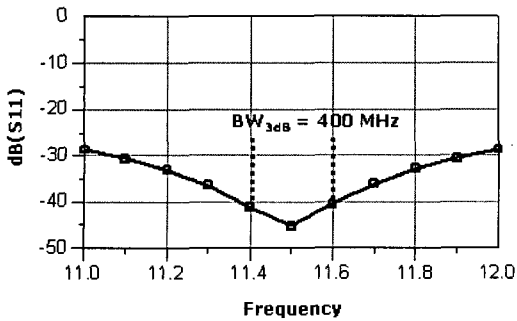
IV. 설계 및 측정 결과

제안된 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기 제작에 사용된 PCB 기판은 유전율 2.17, 기판 높이가 0.5 mm이고 도체 두께가 0.35 μm 인 테프론 기판을 사용하였으며 모멘텀 해석을 통하여 불연속 특성을 고려하였으며 참고문헌 [8]과 동일한 단일 비아(via) 구조를 사용하였다.

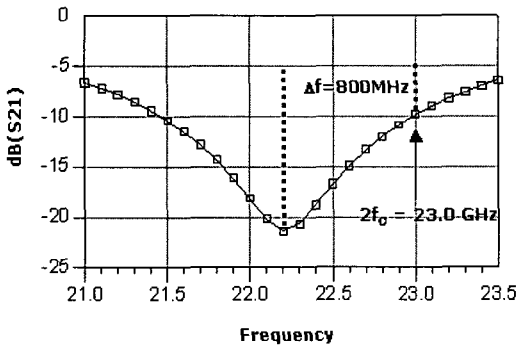
그림 6은 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기의 Q 특

성과 2차 고조파 제거 특성을 나타낸 것으로 그림 6(a)처럼 기본 공진 주파수(f_0)에서 3 dB-대역폭 (BW_{3dB})은 400 MHz 정도이고 그림 6(b)에서 보듯이 2차 공진 주파수($2f_0$)에서 직렬 공진이 발생하지 않고 800 MHz 천이된 주파수에서 최대 직렬 공진 특성이 발생하고 있으며 이는 모의 실험 결과값보다 주파수 천이가 더 많이 발생함을 알 수 있다. 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기는 선로 길이를 변화시키면 기본 공진 주파수(f_0)와 2차 공진 주파수($2f_0$)가 동시에 변하기 때문에 고조파 억압 특성을 개선하는 한계점을 나타내었다.

그림 7(a)는 제작된 마이크로스트립 공진기의 실물도이고 콘넥터 연결시 추가되는 납에 의한 특성



(a) 기본 공진 주파수(f_0)에서 반사 계수
(a) The reflection coefficient at f_0



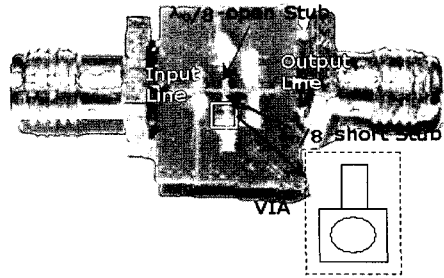
(b) 2차 공진 주파수($2f_0$)에서 고조파 제거 특성
(b) The harmonic suppression around $2f_0$

그림 6. 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기
Fig. 6. Conventional configuration $\lambda/4$ -microstrip resonator.

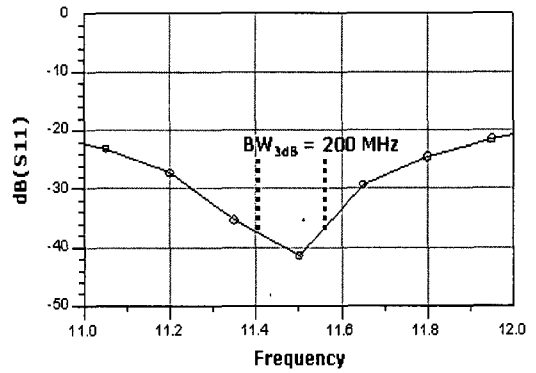
변화를 최소화 하기 위해서 녹색 코팅을 제거하지 않았다. 그림 7(b)는 기본 공진 주파수(f_0)에서는 3 dB-대역폭(BW_{3dB})이 200 MHz로 병렬 공진으로 동작하고 있으며 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기보다 개선된 특성을 나타내고 있다.

그림 7(c)는 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기에서 나타나는 주파수 천이 변화폭(Δf)을 최소화하여 직렬 공진 특성이 2차 공진 주파수($2f_0$)에서 발생되고 있음을 나타내고 있으며 기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기보다 -15 dB 정도 우수한 고조파 억압 특성을 나타내고 있다.

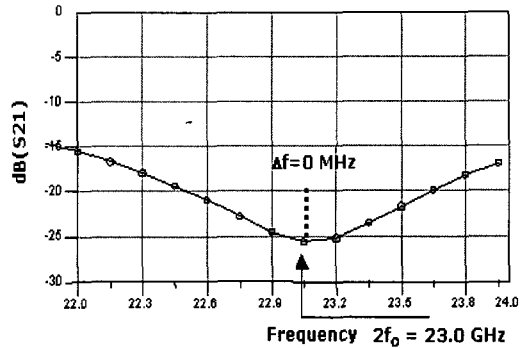
제안된 공진기는 개방 부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로 길이와 단락 부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로 길이의 합을 $\lambda/4$ 로 유지시키면서 개방 부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로 길이



(a) 실물도
(a) Fabrication photo



(b) 기본 공진 주파수(f_0)에서 반사 계수
(b) The magnitude of reflection coefficient at f_0



(c) 2차 공진 주파수($2f_0$)에서 고조파 억압 특성
(c) The harmonic suppression around $2f_0$

그림 7. 제안된 $\lambda/4$ 마이크로스트립 공진기
Fig. 7. The proposed $\lambda/4$ -microstrip resonator.

를 조정할 수 있기 때문에 튜닝 작업을 통하여 기본 공진 주파수(f_0)와 2차 공진 주파수($2f_0$)의 공진 특성을 독립적으로 동시에 만족시킬 수 있었다.

V. 결론

표 1. 제안된 공진기의 특성 요약
Table 1. Summary of the proposed resonator.

항목	기존 $\lambda/4$ -마이크로스트립 라인 공진기	제안된 마이크로스트립 공진기
3 dB-대역폭 (BW_{3dB})	400 MHz	200 MHz
2차 공진 주파수 천이(Δf)	800 MHz	0 MHz
2차 고조파 억압	-10 dB	-25 dB
공진기 길이 (불연속/비아)	6.6 mm	5.8 mm

제안된 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기는 기본 공진 주파수(f_0)에서 $\lambda_0/8$ -길이의 개방 부하를 갖는 마이크로스트립 선로와 $\lambda_0/8$ -길이의 단락 부하를 갖는 마이크로스트립 선로를 병렬로 구성하여 전체 마이크로스트립 선로의 길이를 $\lambda/4$ 로 유지시키면서 개방 부하를 갖는 $\lambda_0/8$ -마이크로스트립 선로 길이를 튜닝 작업을 통하여 기본 공진 주파수(f_0)와 2차 공진 주파수($2f_0$)의 공진 특성을 독립적으로 동시에 만족시킬 수 있도록 함으로서 기존의 단락 부하를 갖는 $\lambda/4$ -마이크로스트립 공진기보다 Q값 특성과 주파수 천이 특성을 개선하였다. 표 1은 제안된 공진기의 장점을 비교하여 나타내었다.

본 논문에서 제안된 마이크로스트립 공진기는 비선형 특성을 갖는 회로의 고조파 제거 특성을 위해서 유용하게 적용될 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

[1] Y. Takimoto, T. Ihara, "Research activities on mi-

lilimeter wave indoor communication systems in Japan", *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 673-676, Jun. 1993.

[2] Satoshi Hamano, Kenji Kawakmi, and Tadashi Takagi, "A low phase noise 19 GHz-band VCO using two different frequency resonators", *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 2189-2192, 2003.

[3] Hiroshi Ikematsu, Kenji Kawakami, Takayuki Katoh, and Kenji Itohi, "A 40 GHz-band fully monolithic VCO with a one-wave length microstrip resonator for an accurate oscillation frequency", *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 843-846, 2002.

[4] Volker Gungerich, Franz Zinkler, Werner Anzill, and Peter Russer, "Noise calculations and experimental results of varactor tunable oscillators with significantly reduced phase noise", *IEEE Trans. MTT*, vol. 43, no. 2, pp. 278-285, Feb. 1995.

[5] V. Gungerich, M. Schwab, and P. Russer, "Non-linear design and experimental results of a low-noise varactor tunable oscillator using a coupled microstrip resonator", *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 549-552, 1992.

[6] 고민호, 박효달, "이동통신단말기용 전압제어발진기의 Q값 개선에 관한 연구", 한국통신학회 추계종합학술발표, pp. 1198-1201, 1996년.

[7] Matthew M. Radmanesh, *Radio Frequency and Microwave Electronics*, Prentice Hall, 2001.

[8] Daniel G. Swanson, Jr, "Grounding microstrip lines with via holes", *IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, no. 8, Aug. 1992.

고 민 호



1995년 2월: 여수대학교 전자통신 공학과 (공학사)
1997년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 3월~현재: 인하대학교 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로설계,

무선통신 시스템

김 천 석



1980년 2월: 광운대학교 응용전자 공학과 (공학사)
1981년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월: 경남대학교 전자공학과 (공학박사)
1981년~현재: 국립여수대학교 전자통신공학과 교수

[주 관심분야] 전파통신 및 수중통신

박 효 달



1978년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
1987년: (불)국립항공우주대학 전자공학과 (공학박사)
1992년~현재: 인하대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 항공통신시스템 설계, 초고주파 회로 설계, 전자장 및 안테나 설계