

논문 2008-45TC-2-19

고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기

(Low Phase Noise VCO using Output Matching Network Based on
Harmonic Control Circuit)

최 재 원*, 서 철 현**

(Jaewon Choi and Chulhun Seo)

요 약

본 논문에서는 위상 잡음 특성을 개선하기 위하여 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로를 이용한 전압 제어 발진기를 제안하였다. 위상 잡음은 2차, 3차 고조파 모두에서 단락 임피던스를 갖는 고조파 조절 회로를 통하여 억제되었으며, 출력 정합 회로에 연결되었다. 또한 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 더욱 더 개선하기 위하여 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용하였다. 위상 잡음 특성 개선을 위하여 높은 Q값을 갖는 공진기 대신에 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로를 이용하였기 때문에 낮은 Q값을 갖는 공진기를 통하여 넓은 주파수 조절 범위를 얻을 수 있다. 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로와 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용한 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 주파수 조절 범위, 5.744 ~ 5.839 GHz에서 -127.5 ~ -126.33 dBc/Hz @ 100 kHz이다. 고조파 조절 회로가 없는 출력 정합 회로와 마이크로스트립 선로 공진기를 이용한 전압 제어 발진기와 비교했을 경우, 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 26.66 dB 개선되었다.

Abstract

In this paper, a novel voltage-controlled oscillator (VCO) using the output matching network based on the harmonic control circuit is presented for improving the phase noise property. The phase noise suppression is achieved through the harmonic control circuit having the short impedances for both second-harmonic and third-harmonic components, which has been connected at the output matching network. Also, we have used the microstrip square open loop multiple split-ring resonator (OLMSRR) having the high-Q property to further reduce the phase noise of VCO. Because the output matching network based on the harmonic control circuit has been used for reducing the phase noise property instead of the High-Q resonator, we can obtain the broad tuning range by the low-Q resonator. The phase noise of the proposed VCO using the output matching network based on the harmonic control circuit and the microstrip square OLMSRR has been -127.5 ~ -126.33 dBc/Hz @ 100 kHz in the tuning range, 5.744 ~ 5.839 GHz. Compared with the reference VCO using the output matching network without the harmonic control circuit and the microstrip line resonator, the phase noise property of the proposed VCO has been improved in 26.66 dB.

Keywords : VCO, Phase Noise, Tuning Range, Harmonic Control Circuit, Output Matching Network

I. 서 론

최근 무선 통신 분야의 급속한 성장으로 이동 통신

응용 분야에 더 많은 이용 가능한 채널에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 요구는 전압 제어 발진기의 위상 잡음에 대한 더욱 더 엄격한 요구 조건을 부과한다. 또한 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성이 정보 전달 서비스의 품질을 결정하는 중요한 요소 중에 하나이기 때문에 이를 개선하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 공진기의 Q값에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이로 인하여 최

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

※ 이 연구는 2007학년도 송실대학교 대학 연구비의
지원으로 연구되었음

접수일자: 2008년1월25일, 수정완료일: 2008년2월18일

근에는 협대역의 대역 통과 여파 특성, 용이한 제작, 낮은 방사 손실, 그리고 높은 주파수 선택도의 특성을 갖는 높은 Q값의 공진기를 얻기 위하여 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조를 이용한 공진기와 SRR형태 또는 CSRR형태의 metamaterial 특성을 갖는 구조들에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 이러한 높은 Q값을 갖는 공진기들은 좋은 위상 잡음 특성을 얻을 수 있는 반면, 전압 제어 발진기의 또 다른 중요한 요소 중에 하나인 주파수 조절 범위가 감소하는 단점을 갖고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 공진기의 특성 개선을 통하여 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 개선하는 것이 아니라, 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로를 통한 고조파 성분의 제거를 통하여 주파수 조절 범위의 손실 없이 위상 잡음 특성을 개선시킬 수 있다. 또한 높은 Q값을 갖는 공진기의 추가적인 구성을 통하여 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 더욱 더 개선시킬 수 있다^[1~6].

CMOS 전압 제어 발진기에 이용되는 고조파 조절 회로는 2차 고조파를 단락시키고 3차 고조파를 개방시키는 class-F 전력증폭기와 동일한 동작 특성을 갖으며 LC 공진부에 연결되는 반면, 본 논문에서 제안된 고조파 조절 회로는 2차, 3차 고조파를 모두 단락되도록 동작하게 하여 본 신호를 제외한 모든 고조파 성분이 노이즈 플로어 밑으로 가도록 설계하고 이를 출력 정합 회로에 연결하여 동작하도록 한다^[7~8].

본 논문에서는 전압 제어 발진기의 동작 특성 비교를 위한 고조파 조절 회로가 없는 출력 정합 회로와 마이크로스트립 선로 공진기를 이용한 전압 제어 발진기, 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로와 마이크로스트립 선로 공진기를 이용한 전압 제어 발진기, 제안된 구조의 전압 제어 발진기에 높은 Q값 특성을 갖는 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 추가적으로 이용한 전압 제어 발진기를 구현하여 위상 잡음과 주파수 조절 범위 특성을 비교·분석하였다.

II. 설계 원리

1. 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로

제안된 전압 제어 발진기 구현에 이용된 고조파 조절 회로는 두 개의 고조파 성분을 조절하기 위하여 그림 1 처럼 출력 정합 회로를 구성하였다. 고조파 조절 회로는 더 좋은 고조파 제거를 위하여 두 개의 교차 점 모두 이중의 병렬 스텐브로 구성되었고 소자의 기생 성분

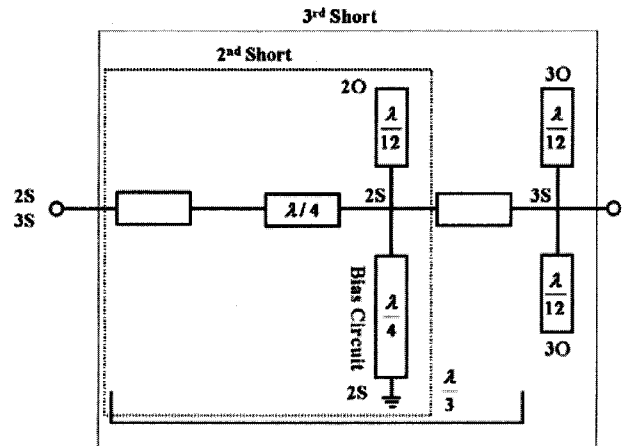


그림 1. 2차, 3차 고조파 성분에 대하여 단락 임피던스를 얻기 위한 고조파 조절 회로

Fig. 1. Harmonic control circuit for obtaining short impedances for both second-harmonic and third-harmonic components.

으로 인한 2차, 3차 고조파에 대한 단락 임피던스 점이 틀어지는 현상을 보상하고 레이아웃 상에서 스텐브끼리 겹쳐지는 것을 막기 위하여 추가적인 마이크로스트립 선로를 포함시켰다. 그림에서 보듯이, 제안된 고조파 조절 회로는 2차, 3차 고조파에 대하여 단락 임피던스가 되도록 하여 모두 제거될 수 있도록 설계하였다. 또한 본 신호에 대해서는 추가적인 정합 회로를 통하여 정합이 되도록 설계하였다. 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로는 최종적으로 2차, 3차 고조파는 제거가 되고 본 신호는 손실 없이 전달되도록 최적화시켰다^[7~8].

2. 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR

그림 2는 Pendry에 의해서 최초로 제안된 기본적인 SRR 구조와 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR 구조를 보여준다. 기본적인 SRR의 주파수 선택 동작은 공진이 발생될 때 원형의 마이크로스트립 부분에 유발된 전류 루프들에 의해서 설명되어질 수 있다. 이 전류 루프들은 동심의 마이크로스트립 원 사이에서 발생된 캐패시턴스를 통하여 근접해진다. SRR들은 자계에 의해 외부적으로 구동될 수 있는 LC 공진부로서 모델링될 수 있다. 만약 이것들의 방향이 적절하게 조절되어지면 특정한 협대역에서 신호 전달을 저지할 수 있다. 등가 캐패시턴스 C 가 동심의 마이크로스트립 원 사이의 끝단 캐패시턴스에 의해 주어지기 때문에, 공진 주파수는 두 원 사이의 간격 (s)이 작아질수록 매우 작아질 수 있다.

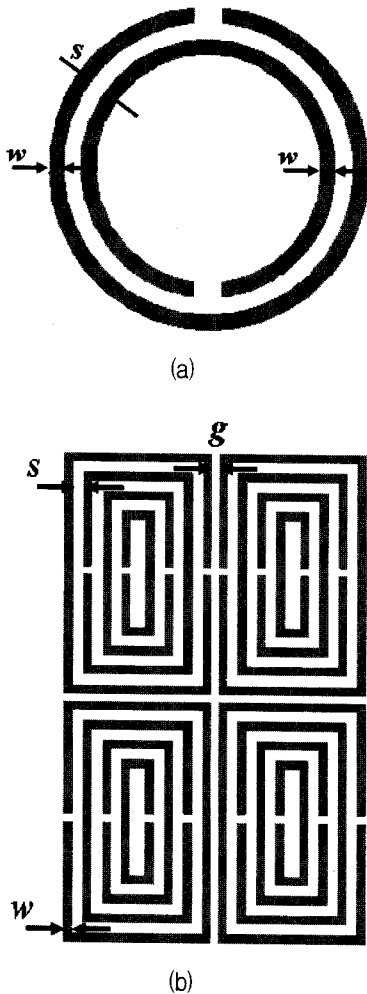


그림 2. (a) Pendry에 의해 제안된 기본적인 SRR구조, (b) 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR 구조

Fig. 2. (a)Conventional SRR proposed by Pendry, (b) Microstrip square OLMSRR.

그림 2 (b)에서 보는 것처럼, 다중 SRR는 일반적으로 이용되는 기본적인 SRR 구조와 나선형 공진기 구조를 직접적으로 확장한 것이다. 다중 SRR는 N 개의 동심원을 갖는 분리된 원형 선로가 서로 반대의 면을 연속적으로 번갈아 갖는 형태로 구성된다. 동일한 크기에서 더 낮은 공진 주파수를 얻기 위하여 동일한 크기에서 더 긴 선로를 갖을 수 있는 사각 형태를 원형 대신에 사용하였다. 다중 SRR의 경우에 인접한 사각 형태의 선로 사이에서 발생하는 $N-1$ 개의 분산 캐패시턴스가 고려되었다. 최외각과 최내각 사이의 선로들에 대하여 번호를 부여하여 분산 캐패시턴스를 C_{12} , C_{23} , C_{34} 로 나타낼 수 있다. 여기서 사각 형태의 선로의 수 N 을 증가시킬 때, 내부 선로와 관련된 분산 캐패시턴스의 영향은 점진적으로 작아진다. 즉, 공진기를 구성하는 사각

형태의 선로의 수를 계속 늘린다고 하더라도 공진 주파수가 계속 낮아지는 것은 아니다. 이와 같은 공진기 형태에서 발생하는 분산 인덕턴스 또한 유사한 특성을 갖는다. 그러므로 공진 주파수와 공진기의 크기 등을 고려하여 불필요한 사각 형태의 외각 선로가 없도록 공진기를 구성하는 선로의 수를 적절하게 선택하여야 한다. 또한, 이러한 캐패시턴스의 증가로 인하여 일반적인 SRR 보다 더 높은 결합 계수를 갖을 수 있으며, 결국 더 높은 Q값을 얻을 수 있다^[9~10].

위에서 언급한 기본적인 SRR의 주파수 선택 특성과 다중 SRR의 특성을 기반으로 높은 결합 계수에 의해 발생하는 높은 Q값으로 인해 얻을 수 있는 공진 시 높은 제거 특성과 좋은 스킨트 특성을 갖는 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 설계할 수 있다^[2].

이 결합 구조를 이용하여 발생된 결합은 근접한 지점에서 가장자리 부분에서 발생하는 계를 통하여 이루어진다는 것이 명백하다. 가장자리 계의 특성과 강도는 결합 특성과 강도를 결정한다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR가 개방 갭을 갖는 부분에서 최대의 전계 강도를 갖고, 반대쪽에서 최대의 자계 강도를 갖는다는 사실을 알 수 있다. 또한, 각각의 개방 루프 구조들이 사각 형태의 다중 SRR의 형태를 갖는 구조로 설계되어지는 것을 통하여, 전계와 자계가 더 증가된다. 가장자리 계가 영역의 바깥쪽에서 급속히 감소하는 특성을 갖기 때문에, 가장자리 전계는 최대 전계 분산을 갖는 부분 근처에서 더욱 강하고, 반면에 가장자리 자계는 최대 자계 분산을 갖는 부분 근처에서 더욱 강하다^[9].

이 구조는 각각의 개방 루프를 구성하는 내부 원과 외부 원사이의 높은 자계와 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조를 이용하여 높은 전계와 자계를 얻기 위하여 최적화되고, 그러므로 공진 주파수에서 높은 저지 특성을 갖도록 된다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 구성하는 원들은 결합 계수를 강화하기 위하여 사각 형태의 구조로 설계된다.

III. 제작 및 실험 결과

1. 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로

그림 3은 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로의 측정 결과를 보여준다. 본 회로는 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic TLC 기판으로 제작되었으며, Agilent사의 8510C Network Analyzer를 이

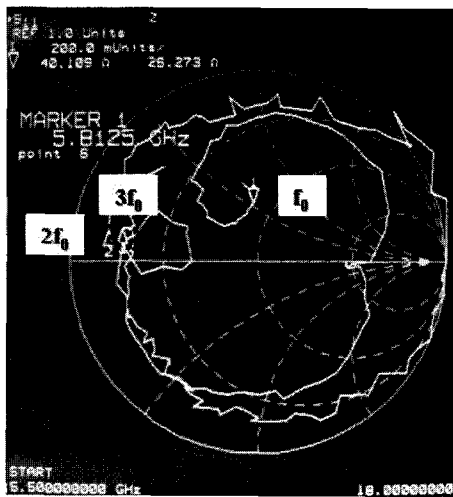


그림 3. 2차, 3차 고조파 성분에 대한 임피던스를 보여주는 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로의 측정 결과

Fig. 3. Measured result of the output matching network based on the harmonic control circuit showing impedances for second-harmonic and third-harmonic components.

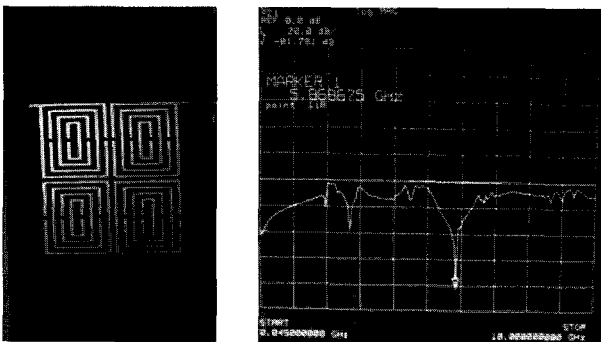


그림 4. 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR의 제작된 기판 사진과 공진 특성 측정 사진

Fig. 4. Fabrication and measured resonant property of the microstrip square open loop multiple SRR.

용하여 측정하였다. 그림에서 보듯이 2차, 3차 고조파 성분인 11.6 GHz와 17.4 GHz에 대해서 단락 임피던스인 것을 확인할 수 있다. 완벽한 단락 임피던스가 되지 않은 것은 기판 제작 시에 발생하는 오차와 바이어스 회로에 포함된 단락 스텐드의 영향으로 볼 수 있다. 또한 본 신호인 5.8 GHz에 대한 정합 특성은 추가적인 정합 회로가 없는 상태이므로 50 Ω으로부터 약간 트러진 것을 확인할 수 있다.

2. 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR

마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR 또한 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic TLC 기판으로 제작되었다. 그림 4은 마이크로스트립 사각 개방

루프 다중 SRR의 제작된 기판 사진과 측정된 공진 특성들을 보여준다. 실험 결과에서처럼 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR의 저지 특성은 공진 주파수 5.8 GHz에서 -81.78 dB이다. 또한 공진기의 공진 주파수에서의 공진 특성이 높은 스커트 특성을 통하여 매우 우수하다는 것을 알 수 있다. 이는 사각 형태의 다중 SRR와 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기사이의 결합이 상호 보완적으로 이루어졌기 때문이고, 그러므로 본 공진기는 높은 결합 계수에 의하여 높은 Q값을 얻을 수 있다. 또한, 사각 형태의 다중 SRR의 동심원 사이의 끝단 캐패시턴스에 의해 주어진 등가 캐패시턴스 C가 전체적인 등가 캐패시턴스에 더 많이 추가되기 때문에, 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR의 크기가 더욱 더 줄어들며 특성 또한 향상된다. 이러한 공진 특성을 통하여 일반적인 마이크로스트립 선로 공진기뿐만 아니라 최근에 보고되고 있는 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기, SRR/CSRR, Hair-pin 공진기 등과 같은 높은 Q값을 갖는 공진기들 보다 더 좋은 공진기 특성을 갖는다는 것을 알 수 있으며, 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 개선시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

3. 저위상 잡음 전압 제어 발진기 설계

고조파 조절 회로가 없는 출력 정합 회로와 마이크로스트립 선로 공진기를 이용한 비교를 위한 기본적인 전압 제어 발진기, 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로와 마이크로스트립 선로 공진기를 이용하여 제안한 전압 제어 발진기, 제안된 전압 제어 발진기의 공진기를 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR로

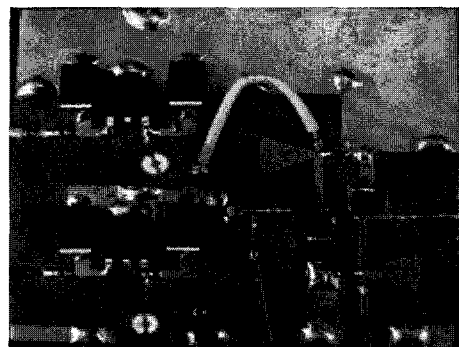
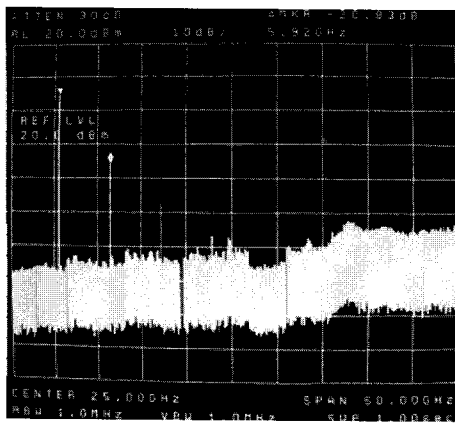
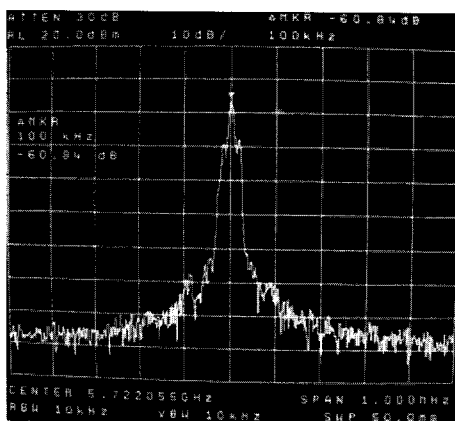


그림 5. 고조파 조절 회로가 없는 출력 정합 회로와 마이크로스트립 선로 공진기를 이용한 전압 제어 발진기의 제작 모습

Fig. 5. Fabrications of the reference VCO using the output matching network without the harmonic control circuit and the microstrip line resonator.



(a)



(b)

그림 6. 비교용 전압 제어 발진기의 측정 결과
(a) 고조파 특성, (b) 위상 잡음

Fig. 6. Measured results of the reference VCO.

(a) Harmonic characteristics, (b) Phase noise

대체하여 만든 전압 제어 발진기 세 가지 모두 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic TLC 기판으로 제작되었고, NEC사의 NE661M04 BJT 소자와 M/A-COM사의 MA46H202 벡터 다이오드를 이용하여 설계되었다. 그림 5는 고조파 조절 회로가 없는 출력 정합 회로와 마이크로스트립 선로 공진기를 이용한 비교를 위한 기본적인 전압 제어 발진기의 제작된 기판 모습을 보여준다. 그림에서 점선으로 된 사각형 부분이 마이크로스트립 선로 공진기를 나타낸다. 그림 6은 이 전압 제어 발진기의 고조파 특성과 위상 잡음 특성의 측정 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 5 dBm의 출력 전력과 -20.83 dBc의 고조파 특성을 나타내며, 위상 잡음 특성은 주파수 조절 범위 5.722 ~ 5.867 GHz에서 -100.84 ~ -99.5 dBc/Hz @ 100 kHz이다. 그림 6 (a)에서 보듯이 고조파 조절 회로가 없는 일반적인 출력 정합 회로를 이용하였기 때문에 2차, 3차 고조파가 억제되지 않고 일반적인 형태의 고조파 특성이 나타나는 것

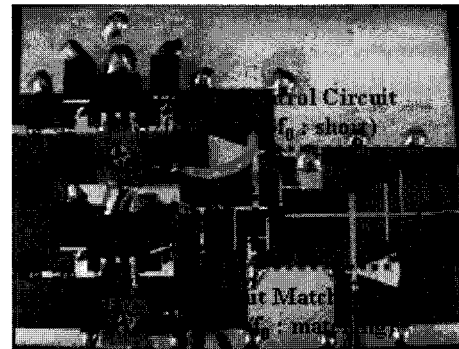
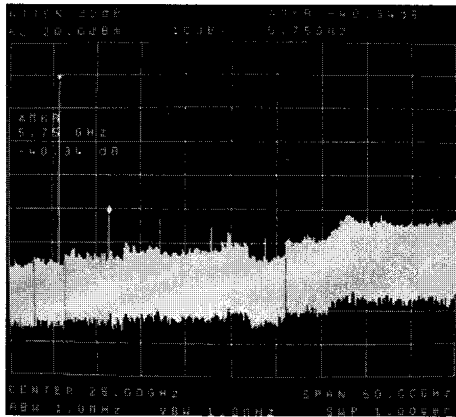


그림 7. 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로와 마이크로스트립 선로 공진기를 이용한 제안된 전압 제어 발진기의 제작 모습

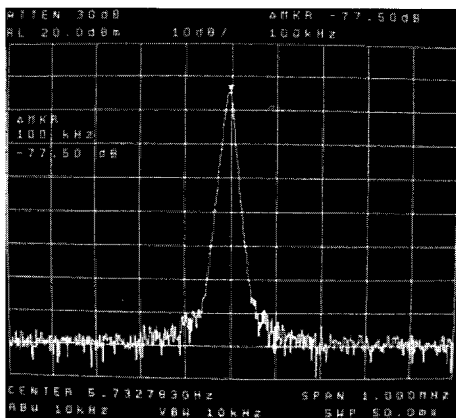
Fig. 7. Fabrications of the proposed VCO using the output matching network based on the harmonic control circuit and the microstrip line resonator.

을 확인할 수 있다. 위상 잡음 특성 또한 낮은 Q값을 갖는 기본적인 마이크로스트립 선로 공진기를 사용하였기 때문에 나쁜 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로와 마이크로스트립 선로 공진기를 이용하여 제안한 전압 제어 발진기의 제작된 기판 모습을 보여준다. 그림 5에 나와 있는 전압 제어 발진기와 다른 점은 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력정합 회로를 이용했다는 것이다. 우측의 점선으로 된 사각형이 이러한 출력 정합 회로를 나타낸다. 공진기는 동일한 마이크로스트립 선로 공진기를 이용하였다. 그림 8은 이 전압 제어 발진기의 고조파 특성과 위상 잡음 특성의 측정 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 8.17 dBm의 출력 전력과 -40.34 dBc의 고조파 특성을 나타내며, 위상 잡음 특성은 주파수 조절 범위 5.733 ~ 5.878 GHz에서 -117.5 ~ -116.17 dBc/Hz @ 100 kHz이다. 그림 8 (a)의 고조파 특성 측정 결과에서 보듯이 2차, 3차 고조파에 대하여 단락 임피던스를 갖도록 설계된 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로를 통하여 2차, 3차 고조파가 억제된 것을 확인할 수 있으며, 고조파 특성이 약 20 dB 정도 개선되었다. 이러한 고조파 조절 회로를 통하여 낮은 Q값을 갖는 마이크로스트립 선로 공진기를 사용했음에도 불구하고 개선된 위상 잡음 특성을 보인 것을 알 수 있다. 동일한 공진기를 사용하고 고조파 조절 회로의 존재 유무에 따라서 위상 잡음 특성이 약 17 dB 개선된 것을 측정 결과를 통하여 확인할 수 있다. 이를 통하여 출력 정합 회로에 구성된 고조파 조절 회로가 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄일 수 있다고 말할 수 있다. 또한 위상 잡음 특성이 개선되었음에도 불구하고



(a)



(b)

그림 8. 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로와 마이크로스트립 선로 공진기를 이용한 제안된 전압 제어 발전기의 측정 결과 (a) 고조파 특성, (b) 위상 잡음

Fig. 8. Measured results of the proposed VCO using the output matching network based on the harmonic control circuit and the microstrip line resonator (a) Harmonic characteristics, (b) Phase noise.

하고 동일한 공진기를 사용하였기 때문에 주파수 조절 범위에 변화가 없다는 것을 확인할 수 있다. 이는 높은 Q값을 갖는 공진기를 이용하여 위상 잡음을 개선하였을 때 생기는 좁은 주파수 조절 범위 문제를 해결할 수 있다는 것을 증명하였다. 즉, 낮은 Q값을 갖는 공진기를 이용하여 주파수 조절 범위가 줄어들지 않게 하면서 고조파 조절 회로를 통하여 전압 제어 발전기의 위상 잡음을 줄일 수 있다는 것이다.

그림 9는 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로와 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용한 제안된 전압 제어 발전기의 제작된 기판 모습을 보여준다. 그림 7에 나와 있는 전압 제어 발전기와 다른 점은 낮은 Q값을 갖는 마이크로스트립 선로 공진기

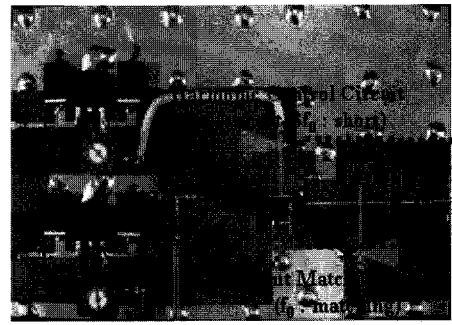
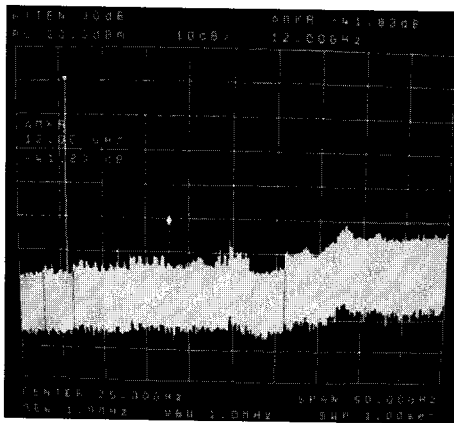


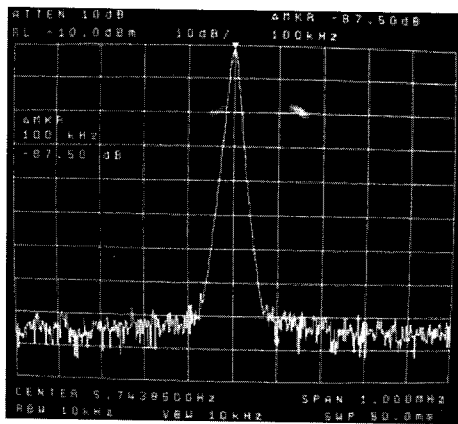
그림 9. 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로와 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용한 제안된 전압 제어 발전기의 제작 모습

Fig. 9. Fabrications of the proposed VCO using the output matching network based on the harmonic control circuit and the microstrip square OLMSRR.

대신에 높은 Q값을 갖는 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용했다는 것이다. 그림에서 좌측의 점선으로 된 사각형 부분이 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 나타낸다. 출력 정합 회로는 본 논문에서 제안한 동일한 정합 회로를 이용하였다. 그림 10은 이 전압 제어 발전기의 고조파 특성과 위상 잡음 특성의 측정 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 9.33 dBm의 출력 전력과 -41.83 dBc의 고조파 특성을 나타내며, 위상 잡음 특성은 주파수 조절 범위 5.744 ~ 5.839 GHz에서 -127.5 ~ -126.33 dBc/Hz @ 100 kHz이다. 그림 10 (a)의 측정결과에서 보듯이 2차, 3차 고조파에 대하여 단락 임피던스를 갖도록 설계된 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로를 통하여 2차, 3차 고조파가 억제된 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 7에 나와 있는 전압 제어 발전기와 비슷한 고조파 특성을 갖는다. 하지만 사용된 공진기가 높은 Q값을 갖는 공진기이며, 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조와 다중 SRR 구조가 결합된 구조이기 때문에 2차 고조파가 약 8 dB 정도 더 억제된 것을 확인할 수 있다. 그림 7의 전압 제어 발전기와 비교하였을 경우 고조파 특성은 비슷하고 위상 잡음 특성은 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR 때문에 약 10 dB 개선되었다. 그림 5에 나와 있는 전압 제어 발전기와 비교하였을 경우에는 약 20 dB 정도 개선된 고조파 특성과 약 27 dB 정도 개선된 위상 잡음 특성을 갖는다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR로 인하여 위상 잡음 특성이 더욱 더 개선되었지만 높은 Q값의 공진기로 인하여 주파수 조절 범위가 줄어들었다.



(a)



(b)

그림 10. 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로와 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용한 제안된 전압 제어 발진기의 측정 결과 (a) 고조파 특성, (b) 위상 잡음

Fig. 10. Measured results of the proposed VCO using the output matching network based on the harmonic control circuit and the microstrip square OLMSRR. (a) Harmonic characteristics, (b) Phase noise.

세 가지 서로 다른 형태의 전압 제어 발진기를 통하여 본 논문에서 제안된 고조파 조절 회로를 이용하였을 경우 주파수 조절 범위가 줄어들지 않고 위상 잡음 특성을 개선할 수 있다는 사실을 증명하였다. 또한 고조파 조절 회로와 함께 높은 Q값의 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용하여 위상 잡음 특성을 더욱 더 개선할 수 있다는 사실을 확인하였다. 그림 11은 위에서 언급한 세 가지 형태의 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 벡터 다이오드 조절 전압 범위 0 ~ 26 V에서 보여준다. 전압 제어 발진기 I은 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로와 마이크로스트립 선로 공진기를 이용하여 제안한 전압 제어 발진기이며, 전압 제어 발진기 II는 고조파 조절 회로를 기반으로 한

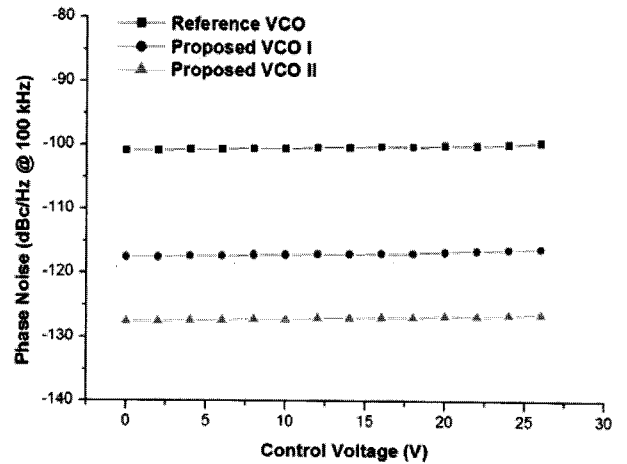


그림 11. 다른 구조를 갖는 전압 제어 발진기들의 위상 잡음 특성 비교

Fig. 11. Comparison of the phase noise property of VCOs having other structures.

표 1. 전압 제어 발진기 특성 비교

Table 1. VCO Performance Comparison.

	단위	Reference VCO	VCO I	VCO II
발진주파수	GHz	5.722	5.733	5.744
출력 전력	dBm	5.0	8.17	9.33
고조파 특성	dBc	-20.83	-40.34	-41.83
위상 잡음	dBc/Hz @ 100 kHz	-100.84	-117.5	-127.5
FOM	dBc/Hz @ 100 kHz	-180.46	-197.14	-207.16

출력 정합 회로와 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용한 제안된 전압 제어 발진기이다.

다른 전압 제어 발진기들 사이의 동작 특성을 비교하기 위하여 널리 사용되어지는 Figure Of Merit (FOM) 은 다음과 같이 정의한다.

$$FOM = L\{\Delta f\} - 20\log\left(\frac{f_o}{\Delta f}\right) + 10\log\left(\frac{P}{1mW}\right) \quad (1)$$

여기서 $L\{\Delta f\}$ 는 f_o 의 캐리어 주파수로부터 Δf 의 오프셋 주파수에서의 위상 잡음이고 P 는 전압 제어 발진기 코어의 소비 전력이다^[11]. 비교용 전압 제어 발진기, 전압 제어 발진기 I, II의 FOM은 각각 발진 주파수 5.722 GHz에서 -180.46 dBc/Hz @ 100 kHz, 발진 주파수 5.733 GHz에서 -197.14 dBc/Hz @ 100 kHz, 발진 주파수 5.744 GHz에서 -207.16 dBc/Hz @ 100 kHz이다. 표 1은 본 논문에서 실험한 세 가지 전압 제어 발진기의 특성을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는 위상 잡음 특성을 개선하기 위하여 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로를 이용한 전압 제어 발진기를 제안하였다. 위상 잡음은 2차, 3차 고조파 모두에서 단락 임피던스를 갖는 고조파 조절 회로를 통하여 억제되었으며, 출력 정합 회로에 연결되었다. 또한 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 더욱 더 개선하기 위하여 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용하였다. 높은 Q값을 갖는 공진기의 경우 위상 잡음 특성을 개선시킬 수 있지만 주파수 조절 범위가 작아지는 문제를 갖고 있다. 하지만 본 논문에서는 위상 잡음 특성 개선을 위하여 높은 Q값을 갖는 공진기 대신에 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로를 이용하였기 때문에 낮은 Q값을 갖는 공진기를 이용하면서도 낮은 위상 잡음 특성과 넓은 주파수 조절 범위를 동시에 얻을 수 있다. 또한 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로에 추가적으로 높은 Q값을 갖는 공진기를 이용하여 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 더욱 더 개선시킬 수 있다. 고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로와 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용한 제안된 전압 제어 발진기는 주파수 조절 범위 5.744 ~ 5.839 GHz에서 $-127.5 \sim -126.33$ dBc/Hz @ 100 kHz의 위상 잡음 특성을 갖으며, 기본적인 전압 제어 발진기와 비교하였을 경우 약 27 dB 개선되었다.

참 고 문 헌

- [1] A. Hajimiri and T. H. Lee, "A General Theory of Phase Noise in Electrical Oscillators," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 2, pp. 179-194, February 1998.
- [2] J. Choi, and C. Seo, "Broadband and Low Phase Noise VCO Using Tunable Metamaterial Transmission Line Based on Varactor-Loaded Split-Ring Resonator," *Korea-Japan MicroWave Conference*, pp. 145-148, November 2007.
- [3] S. Im, C. Seo, J. Kim, Y. Kim, N. Kim, "Improvement of microstrip open loop resonator filter using aperture," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, vol. 3, pp. 1801-1804, June 2002.
- [4] E. Park and C. Seo, "Low Phase Noise Oscillator Using Microstrip square Open Loop Resonator," *IEEE MTT-S International Micro-*

wave Symposium, June 2006.

- [5] F. Falcone, T. Lopetegi, J. D. Baena, R. Margues, F. Martin, and M. Sorolla, "Effective Negative- ϵ Stopband Microstrip Lines Based on Complementary Split Ring Resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 6, June 2004.
- [6] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, vol. 47, pp. 2075-2084, November 1999.
- [7] S. C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, 1999.
- [8] H. Kim, S. Ryu, Y. Chung, J. Choi, and B. Kim, "A Low Phase-Noise CMOS VCO With Harmonic Tuned LC Tank," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 7, July 2006.
- [9] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Couplings of Microstrip Square Open-Loop Resonators for Cross-Coupled Planar Microwave Filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 12, pp. 2099-2109, December 1996.
- [10] F. Bilotti, A. Toscano, and L. Vegni, "Design of Spiral and Multiple Split-Ring Resonators for the Realization of Miniaturized Metamaterial Samples," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 8, August 2007.
- [11] A. Wagemans, "A 3.5 mW 2.5 GHz diversity receiver and a 1.2 mW 3.6 GHz VCO in silicon-on-anything," in *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Tech. Dig.*, pp. 250-251, February 1998.

저 자 소 개



최 재 원(학생회원)

2006년 2월 숭실대학교 정보통신
전자공학부 (공학사)

2006년 3월~현재 숭실대학교

정보통신공학과 석사과정

<주관심분야 : 초고주파 회로 설계, RF Power Amplifier, VCO, RFIC, RFID, Digital RF 등>

서 철 현(정회원)

대한전자공학회논문지 vol. 31, no. 6 참조