Microstrip Square Open Loop와 Tunable Negative Resistance를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기

Low Phase Noise VCO Using Microstrip Square Open Loop Resonator and Tunable Negative Resistance

최 재 원 · 이 종 민 · 서 철 헌

Jaewon Choi · Chongmin Lee · Chulhun Seo

요 약

마이크로스트립 개방형 루프 공진기는 발진기의 위상 잡음을 줄이기 위해서 적용되었다. 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 공진기는 큰 결합 계수 값을 가지고, 이로 인해 높은 Q 값을 가지며 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 감소시킨다. 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위를 증가시키기 위하여 버랙터 다이오드가 전압 제어 발진기의 조절 가능한 부성 저항에 연결되어졌다. 전압 제어 발진기의 출력 파워와 하모닉 특성은 각각 4.83 dBm과 −28.83 dBc이다. 위상 잡음 특성은 주파수 조절 범위 5.735~5.845 GHz에서 −112.33~−116.16 dBc/Hz @ 100 kHz이다.

Abstract

The microstrip square open loop resonator has been employed to reduce the phase noise in VCO. The microstrip square open loop resonator has the large coupling coefficient value, which makes a high Q value, and has reduced the phase noise of VCO. To increase the tuning range of VCO, varactor diode has been connected at the tunable negative resistance in VCO. The output power and harmonic characteristics of VCO has been obtained 4.83 dBm and −28.83 dBc, respectively. The phase noise of VCO has been −112.33~−116.16 dBc/Hz @ 100 kHz in the tuning range, 5.735~5.845 GHz.

Key words : Tunable Negative Resistance, Phase Noise, Square Open Loop Resonator

Ⅰ. 서 론

많은 응용 분야에서는 전기적으로 조절할 수 있는 발진기를 요구한다. 예를 들면, 헤테로다인 수신기에서, 국부 발진기는 혼합기가 들어오는 RF 신호를 같은 중간 주파수와 함께 IF 신호로 내려갈 수 있도록 다른 주파수로 변환할 수 있게 하기 위하여 적절한 주파수 범위 이상으로 조절되어질 수 있어야 한다. 다이렉트 FM 혹은 위상 고정 루프와 같은 많은 응용 분야에서, 발진기의 주파수 조절은 자동적으로 일어날 수 있어야 한다. 자동적으로 주파수를 조절할 수 있는 한 가지 방법은 전압 제어 발진기를 이용하는 것이다. 전압 제어 발진기에 이용되어질 수 있는 소자는 버랙터 다이오드이다[1].

최근에는 다이렉트 컨버전에 대한 많은 연구 또한 무선 통신 분야에서 활발히 이루어지고 있다. 전압 제어 발진기에서 위상 잡음의 억제는 일반적인 헤테로다인 시스템에서 보다 다이렉트 컨버전에서

「이 연구는 2006학년도 숭실대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음.」

숭실대학교 정보통신전자공학부(Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

· 논 문 번 호 : 20060704-071

· 수정완료일자 : 2006년 11월 27일

더욱 더 강조되어지고 있다. 위상 잡음은 전체 시스템에서 성능과 안정성에 영향을 주고 시스템 크기를 줄이는 것에 관여한다[2]. 특히, 전압 제어 발진기의 동작은 주파수 조절 범위와 위상 잡음을 동시에 개선시키는데 많은 문제가 있다.

반도체에서의 플리커 잡음과 공진기의 성능은 발진기의 위상 잡음 특성에 영향을 준다. 많은 종류의 위상 잡음을 줄이는 방법이 있는데, 적절한 바이어스 혹은 피드포워드 구조를 이용하여 공진기의 Q 값을 증가시키는 것이 그 방법들 중의 하나이다[3]~[5].

전압 제어 발진기의 위상 잡음은 공진기의 Q 값에 영향을 받는다고 알려져 있다. 하지만 마이크로스트립 라인을 이용한 공진기는 낮은 Q 값 때문에 위상 잡음을 줄이는데 제한을 갖는다. 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 구조를 이용한 필터의 주요 이점은 좁은 대역 대역 여파 특성, 손쉬운 제작, 낮은 발산 손실, 그리고 예리한 선택도이다. 이 구조는 무선 통신 시스템에 이용하기에 매우 유용하다[6],[7].

마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 공진기 구조는 Q 값을 증가시키기 위하여 적용되어진다. 하지만 증가된 Q 값은 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위를 감소시킨다. 본 논문에서, 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 공진기는 위상 잡음을 줄이기 위하여 전압 제어 발진에 적용되어진다. 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위를 증가시키기 위하여, 버랙터 다이오드는 제안된 전압 제어 발진기의 조절 가능한 부성 저항에 연결되어진다. 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 공진기와 조절 가능한 부성 저항을 이용한 전압 제어 발진기는 저위상 잡음과 적당한 주파수 조절 범위를 동시에 얻을 수 있도록 해준다.

Ⅱ. 본 론

2-1 개방형 루프 공진기

개방형 루프 공진기는 세 가지 기본적인 결합 구조인 전계, 자계, 혼합 결합을 갖는다. 각각의 개방형 루프 공진기는 공진 주파수에서 개방 폭에 따라 측면에 최대 전계 밀도와 그 반대 방향으로 최대 자계 밀도가 나타난다. 본 논문에서는 이를 혼합한 구조인 혼합 결합을 이용하였다.

2-1-1 혼합 결합

그림 1의 결합 구조에서 보듯이 두 공진기의 결합된 암에서 전계와 자계 분산은 전계 결합과 자계 결합 둘 중에 하나도 무시할 수 없을 정도로 상대적이

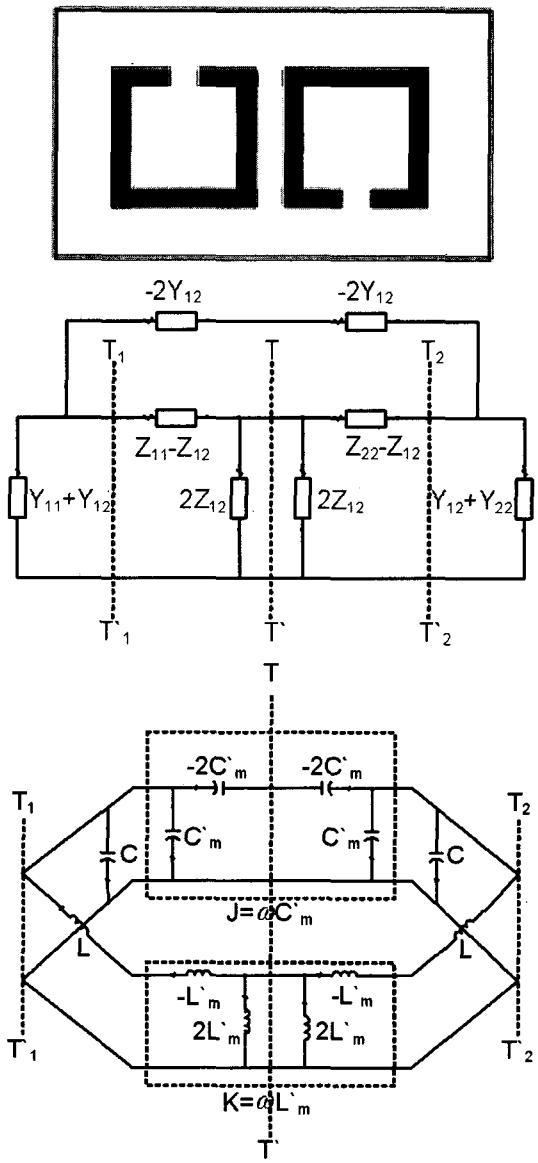


그림 1. 혼합 결합 구조, 혼합 결합이 존재하는 결합된 개방형 루프 공진기의 회로망 그림과 이와 관련된 등가 회로[8]

Fig. 1. Mixed coupling structure, network representation of the coupled open-loop resonators exhibiting the mixed coupling and an associated equivalent circuit[8].

다. 그러므로, 이 같은 경우에 결합은 혼합 결합으로 볼 수 있다. 그림 1은 일반적인 형태의 혼합 결합 구조와 lumped 소자로 이루어진 등가 회로를 보여준다.

식 (1)과 (2)는 혼합 결합에서의 두 공진 주파수 (f_e, f_m)을 보여준다[8].

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L-L_m')(C-C_m')}} \tag{1}$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_m')(C+C_m')}} \tag{2}$$

C, L 그리고 C_m은 각각 자기 커패시턴스, 자기 인덕턴스, 그리고 상호 커패시턴스를 나타낸다.

식 (1)과 (2)로부터 자계 결합 계수 (k_B)는 알 수 있다.

$$k_B = \frac{CL_m' + LC_m'}{LC + L_m'C_m'} \tag{3}$$

$L_m'C_m' \ll LC$ 라고 가정할 수 있고, 그래서 식 (4)가 다음과 같이 된다.

$$k_B \approx \frac{L_m'}{L} + \frac{C_m'}{C} = k_M' + k_E' \tag{4}$$

식 (4)로부터 혼합 결합이 전계 결합과 자계 결합의 중첩으로부터 발생한다는 것을 알 수 있다.

2-1-2 전압 제어 발진기의 Q 값

$$Q = w\frac{average_energy_stored}{energy_loss/\sec} \tag{5}$$

식 (5)는 공진기의 Q 값을 보여주는데, 저장된 에너지와 손실 에너지의 비로 정의되어진다.

스퀘어 개방형 루프 구조의 선로들이 서로 가까워짐에 따라 상호 커패시턴스와 상호 인덕턴스가 증가되어지면서, 이 구조의 결합 계수는 커질 수 있다. 커패시턴스와 인덕턴스는 에너지를 저장할 수 있기 때문에, 식 (5)의 분자는 Q 값을 증가시키기 위해서 증가시킨다.

1966년에 D. B Lesson에 의해서 제안된 간략한 식은 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 표현하기에 매우 유용하다. 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 참고문헌 [9]에 의해서 주어진다.

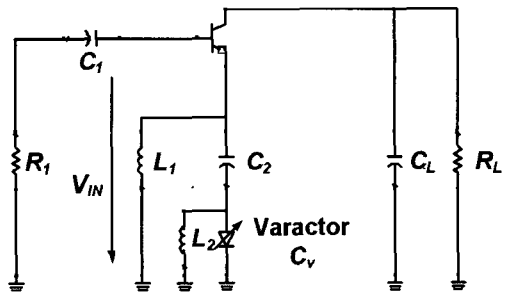
$$L(f_m) = \frac{FKT}{2P}\left[1+\left(\frac{1}{2Q_L}\right)^2\left(\frac{f_o}{f_m}\right)^2\right] \tag{6}$$

F는 정귀환이 제거된 능동 소자의 잡음 지수, K는 Boltzman 상수, T는 Kelvin 온도, P는 전압 제어 발진기의 출력, Q_L은 공진기의 부하 Q, f_0는 발진 주파수, 그리고 f_m은 잡음 전력 스펙트럴 밀도가 측정되어진 반송파로부터의 오프셋 주파수이다. 식 (6)에서, 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 Q_L 값이 클수록 줄어든다.

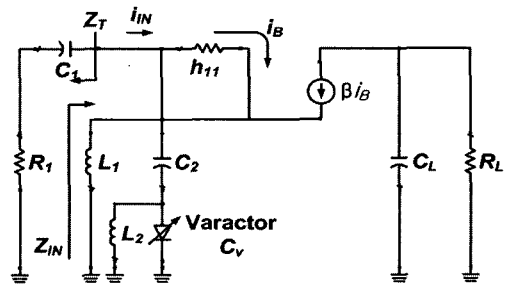
2-2 버랙터 다이오드를 이용한 조절 가능한 부성 저항

버랙터 다이오드는 바이어스 전압에 따라서 커패시턴스의 큰 변화가 나타난다. 전압 제어 발진기는 원하는 주파수 조절을 얻기 위하여 버랙터 다이오드를 이용한다. 버랙터 다이오드는 다이오드 특성의 적절한 선택에 의해서 두드러지게 된 역 바이어스 아래에서 pn 접합 커패시턴스의 전압 민감성을 이용한 두 개의 단자를 갖은 반도체 소자이다[10].

그림 2에서, L_1은 그림 4에 나와 있는 것처럼 병렬



(a) 제안된 전압 제어 발진기의 등가 회로
(a) Equivalent circuit of proposed VCO



(b) 회로 분석
(b) Circuit analysis

그림 2. 조절 가능한 부성 저항을 이용한 전압 제어 발진기의 회로 분석

Fig. 2. Circuit analysis of voltage-controlled oscillator using the tunable negative resistance.

로 연결되어져 있는 두 개의 인덕터의 값을 나타낸다. 그 때, 만약 조절 가능한 부성 저항의 버랙터 다이오드, 인덕터, 커패시터가 연결되어지지 않는다면, 입력 임피던스 Z_{IN}은 두 개의 루프 식을 통해서 계산되어질 수 있다. 입력 임피던스와 공진기의 리액턴스를 이용하여, 공진 주파수는 입증되어질 수 있다.

$$\left[\left\{\left(j\omega_0 L_2 \| \frac{1}{j\omega_0 C_v}\right)+\frac{1}{j\omega_0 C_2}\right\}\| j\omega_0 L_1\right]-\frac{1}{j\omega_0 C_1}=0 \tag{7}$$

식 (7)을 계산하여, 다음과 같은 공진 주파수를 얻을 수 있다.

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_2(C_2+C_v)+L_1(C_2-C_1)}{L_1L_2(C_2C_v-C_1C_2-C_1C_v)}} \tag{8}$$

이 식에서, 공진 주파수는 조절 가능한 부성 저항에 연결되어져 있는 버랙터 다이오드의 접합 부분에 인가되는 바이어스 전압을 증가시킴으로써 변화되어진다[11].

전압 제어 발진기를 설계하는 가장 일반적인 방법은 트랜지스터를 이용하는 것이다. 트랜지스터는 증폭을 하고 귀환 회로를 이용하여 부성 저항을 만들며 발진을 유지시킨다. 만약 공진 조건이 만족되어지면, 발진 파워는 출력에 전달된다. 트랜지스터가 불안정 영역에서 동작될 때 발진은 발생한다. BJT는 제안된 전압 제어 발진기에 이용되어졌고, 부성 저항을 만들기 위하여 인덕터와 마이크로스트립 선로를 연결하였다.

제안된 전압 제어 발진기의 부성 저항은 전압 제어 발진기의 발진 주파수를 조절하기 위하여 버랙터 다이오드를 연결하였다. 버랙터 다이오드가 부성 저항에 연결되어졌을 때, 일반적인 전압 제어 발진기의 부성 저항 구조는 발진을 일으키기 어렵다. 그림 4는 제안된 전압 제어 발진기의 부성 저항의 구조를 보여준다. 부성 저항은 대칭적으로 설계되어졌다. 제안된 전압 제어 발진기의 부성 저항은 대역 통과 정합 구조와 세 개의 인덕터를 이용하여 설계하였다. 조절 전압이 버랙터 다이오드에 인가되어질 때, 트랜지스터에 직류 성분이 인가되어지는 것을 막기 위하여 부성 저항에 작은 값의 커패시터를 연결하였다. 출력은 공진 조건을 만족하기 위하여 설계되어졌고 손실을 줄이기 위하여 전송 선로의 길이는 줄였다. 공진기는 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 구조로 설계되어졌다. 그림 3은 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 공진기와 조절 가능한 부성 저항을 이용하여 설계된 전압 제어 발진기의 구조를 보여준다.

결합 계수는 전압 제어 발진기의 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 사이의 결합 간격을 줄이면 증가한다. 증가된 결합 계수는 저위상 잡음을 얻게 하지만 좁은 주파수 조절 범위를 갖게 한다. 그러므로, IEEE 802.11a 무선 랜 요구 사항의 위상 잡음과 튜닝 범위를 얻기 위하여 전압 제어 발진기의 마이크로스

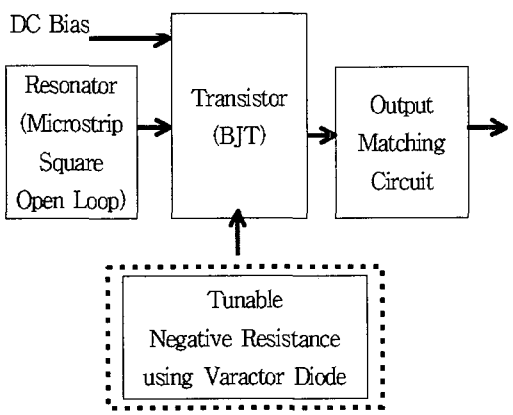


그림 3. 제안된 전압 제어 발진기의 구조
Fig. 3. Configuration of the proposed VCO.

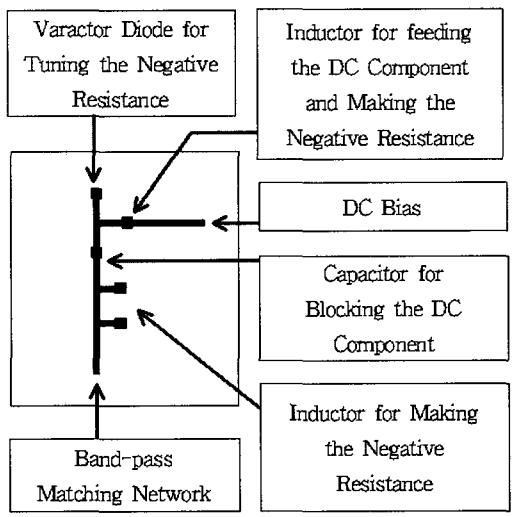


그림 4. 제안된 전압 제어 발진기의 부성 저항의 구조
Fig. 4. The configuration of the proposed VCO's negative resistance.

트립 스퀘어 개방형 루프 사이의 결합 간격은 적절히 조절되어져야 한다.

Ⅲ. 실 험

전압 제어 발진기는 NEC의 NE661M04의 BJT와 M/A-COM의 MA46H202의 버랙터 다이오드를 이용하여 제작되어졌다. 기판은 ε_r이 3.2인 테프론을 이용하였다. 그림 5는 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 구조를 나타낸다.

그림 6은 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 공진기와 조절 가능한 부성 저항을 이용한 제안된 전압 제어 발진기의 제작된 기판을 보여준다. 정류기는 신호가 흔들리는 것을 방지하기 위하여 사용되어졌다. 그림 6의 왼쪽 부분이 정류기가 제작된 모습을 보여준다. 제작된 기판의 크기는 정류기를 포함할 경우 61×39이고 정류기를 제외한 순수한 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 공진기를 이용한 전압

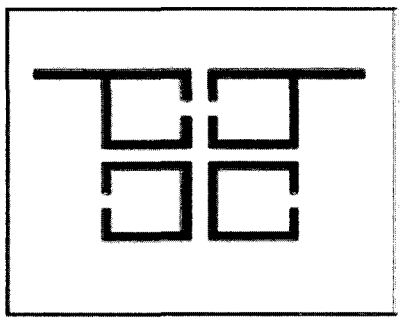


그림 5. 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프 구조
Fig. 5. Microstrip square open loop structure.

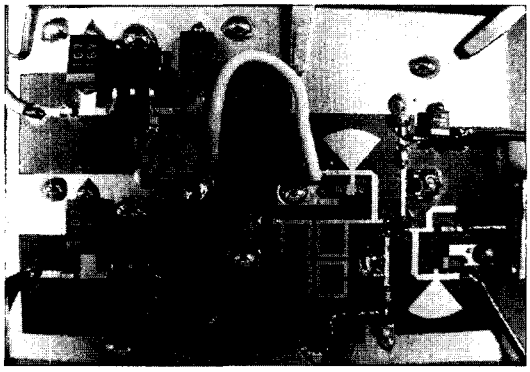


그림 6. 제안된 전압 제어 발진기의 제작 기판
Fig. 6. The fabrication of the proposed VCO.

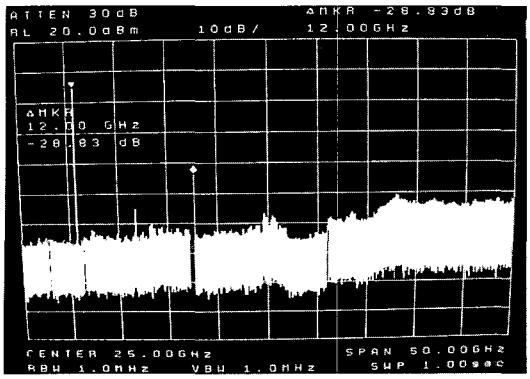
제어 발진기는 30×29이다. 개방형 루프 공진기를 사용하였기 때문에 기판의 크기가 클 것으로 예상할 수 있지만 동작 주파수가 5.8 GHz로 고주파이고 공진기를 전압 제어 발진기의 특성에 영향을 주지 않는 범위에서 최대한 작게 설계하였기에 크지 않았다. 그렇기 때문에 본 논문에서 제안한 전압 제어 발진기의 응용성은 공진기의 크기에 영향을 받지 않는다. 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위는 5.735 ~5.845 GHz, 위상 잡음은 −116.16~−112.33 dBc/Hz @ 100 kHz로 측정되어졌다. 전압 제어 발진기의 출력 파워와 고조파 특성은 각각 4.83 dBm과 −28.83 dBc이다. 소비 전력은 V_c=1.7 V, I_c=12 mA일 때 전압 제어 발진기가 동작하였기 때문에 20.4 mW이다. 제안한 전압 제어 발진기의 실험적인 Q 값은 Q라는 것이 주파수의 선택도를 의미하기 때문에 중심 주파수와 그 주파수로부터 3 dB 떨어진 지점의 대역폭을 측정하여 1,300,000이라는 값을 얻었다. 그림 7은 5.735 GHz에서 제안된 전압 제어 발진기의 출력 파워, 하모닉 특성, 위상 잡음을 측정한 결과 사진을 보여준다.

위상 잡음의 감소를 입증하기 위하여 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 그림 8의 일반적인 전압 제어 발진기의 위상 잡음과 비교했다. 오프셋 주파수가 100 kHz일 때, 일반적인 전압 제어 발진기와 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 버택터 다이오드에 인가된 조절 전압이 0 V일 때 각각 −98.84 dBc/Hz와 −116.16 dBc/Hz의 결과를 얻었다.

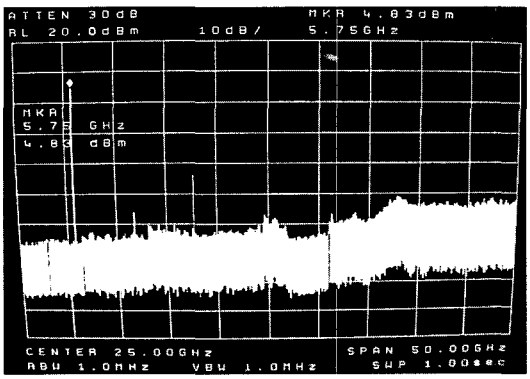
일반적인 전압 제어 발진기와 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 조절 전압이 0~26 V일 때 그림 8(a)에 그 결과가 그래프로 나타나 있다. 그림 8(b)는 같은 조절 전압 범위에서 제안된 전압 제어 발진기의 출력 파워를 보여준다. 위상 잡음과 출력 파워는 조절 전압 범위 내에서 적은 변화를 보였다.

Ⅳ. 결 론

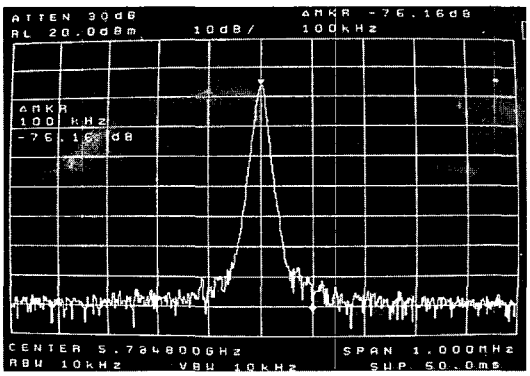
본 논문에, 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프구조는 위상 잡음을 줄이기 위하여 전압 제어 발진기에 적용되어졌다. 마이크로스트립 스퀘어 개방형 루프를 이용한 전압 제어 발진기의 좁은 주파수 조절 범위를 증가시키기 위하여, 버랙터 다이오드는 제안된 전압 제어 발진기의 부성 저항에 연결되어



(a)



(b)



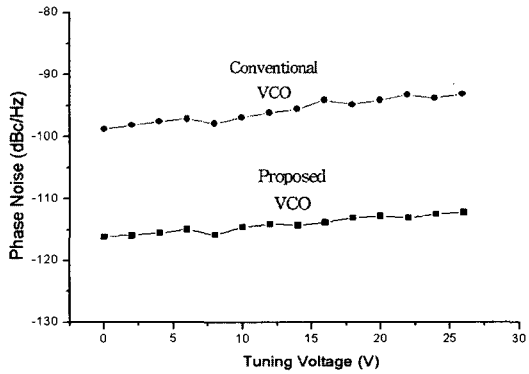
(c)

그림 7. (a) 출력 파워 (b) 하모닉 특성 (c) 5.735 GHz에서의 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음

Fig. 7. (a) Output power (b) Harmonic characteristics (c) Phase noise of the proposed VCO at 5.735 GHz.

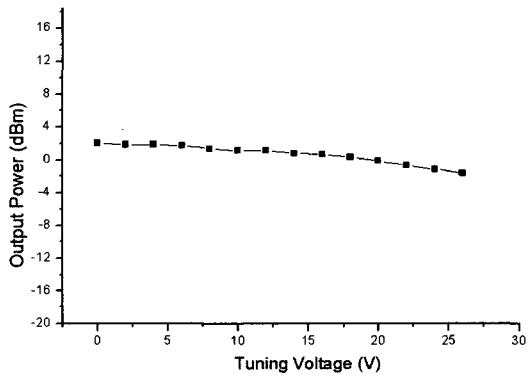
졌다.

조절 가능한 부성 저항을 이용한 제안된 전압 제어 발진기의 발진 주파수, 고조파 특성 그리고 출력 파워는 각각 5.80 GHz, −28.83 dBc 그리고 4.83 dBm



(a) 위상 잡음

(a) Phase noise



(b) 출력 파워

(b) Output power

그림 8. 일반적인 전압 제어 발진기와 제안된 전압 제어 발진기의 측정 결과

Fig. 8. Design results of the conventional VCO and the proposed VCO.

의 결과를 얻었다. 주파수 조절 범위는 조절 가능한 부성 저항을 통하여 5.735~5.845 GHz의 결과를 얻었다. 이 주파수 조절 범위에서 위상 잡음은 스퀘어 개방형 루프 구조를 통하여 −116.16~−112.33 dBc/Hz @ 100 kHz의 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

[1] Kai Chang, *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, Wiley-Interscience, 2005.

[2] Eunyoung Park, Chulhun Seo, "Low phase noise oscillator using microstrip square open loop resonator", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Jun. 2006.

[3] C. D. Broomfield, J. K. A. Everard, "Flicker noise reduction using GaAs microwave feedforward amplifiers", *Frequency Control Symposium and Exhibition, Proceedings of the 2000 IEEE/EIA International*, pp. 525-530, 2000.

[4] C. D. Broomfield, J. K. A. Everard, "Flickernoise reduction using GaAs microwave feedforward amplifier", *2000 IEEE International Frequency Control Symposium*, City, Jun. 2000.

[5] Young-Taek Lee, Jong-Sik Lim, Jun-Seok Park, Ahn, D., and Sangwook Nam, "A novel phase noise reduction technique In oscillators using defected ground structure", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 12, no. 2, pp. 39-41, Feb. 2002.

[6] Serksoon Im, Chulhun Seo, Jaehoon Kim, Youngwan Kim, and Naesoo Kim, "Improvement of microstrip open loop resonator filter using aperture", *IEEE MTT-S International*, vol. 3, pp. 1801-1804, Jun. 2002.

[7] Sarawuth Chaimool, Sithiporn Kerdsumang, and Prayoot Akkaraekthalin, "A novel microstrip band- pass filter using triangular open-loop resonators", *Communications, APCC, The 9th Asia-Pacific Conference on*, vol. 2, pp. 21-24, pp. 788-791, Sep. 2003.

[8] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Coupling of microstrip square open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters", *IEEE Trans. MTT*, vol. 44, no. 12, pp. 2099-2109, Nov. 1996.

[9] D. B. Leeson, "A simple model of feedback oscil lator noise spectrum", in *Pro. IEEE*, vol. 54, no. 2, pp. 426-434, Feb. 1966.

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

[11] Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko, *RF Circuit Design Theory and Applications*, Prentice-Hall, 2000.

최 재 원

2006년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
2006년 3월~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, RF Power Amplifier, VCO, RFIC, RFID 등

이 종 민

2005년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
2005년 3월~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, RF Power Amplifier, VCO, RFIC, RFID 등

서 철 헌

1983년 3월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 3월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1993년 3월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
1993년~1995년: MIT 연구원
1993년~1997년: 숭실대학교 정보통신학과 조교수
1999년 8월~2001년 1월: MIT 방문교수
1997년~2004년: 숭실대학교 정보통신 전자공학부 부교수
2005년~현재: 숭실대학교 정보통신 전자공학부 교수
[주 관심분야] 이동 및 위성통신 Microwave 부품 및 시스템, PBG를 이용한 RF 부품