

마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 가변 부성 저항을 이용한 저위상 잡음 Push-Push 전압 제어 발진기

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

최 재 원 · 서 철 현

Jaewon Choi · Chulhun Seo

요 약

본 논문에서는 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 가변 부성 저항을 이용한 향상된 push-push 전압 제어 발진기를 제시하였다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기는 큰 결합 계수 값을 갖는데, 이는 Q 값을 크게 만들고, 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄인다. 1.8 V의 공급 전압을 사용한 전압 제어 발진기는 5.744 ~ 5.859 GHz의 주파수 조절 범위에서 $-124.67 \sim -122.67$ dBc/Hz @ 100 kHz의 위상 잡음 특성을 갖는다. 이 전압 제어 발진기의 FOM은 같은 주파수 조절 범위에서 $-202.83 \sim -201$ dBc/Hz @ 100 kHz의 값을 갖는다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용한 단일 종단 전압 제어 발진기와 마이크로스트립 공진기를 이용한 push-push 발진기와 비교했을 때 개선된 위상 잡음 특성은 각각 -8.51 dB와 -33.67 dB이다.

Abstract

In this paper, a novel push-push voltage-controlled oscillator(VCO) using microstrip square open loop resonator and tunable negative resistance is presented. The microstrip square open loop resonator has the large coupling coefficient value, which makes a high Q value, and has reduced phase noise of VCO. The VCO with 1.8 V power supply has phase noise of $-124.67 \sim -122.67$ dBc/Hz @ 100 kHz in the tuning range, 5.744~5.859 GHz. The FOM of this VCO is $-202.83 \sim -201$ dBc/Hz @ 100 kHz in the same tuning range. When it has been compared with single-ended VCO using microstrip square open loop resonator, and push-push oscillator using microstrip line resonator, the reduced phase noise has been -8.51 dB, and -33.67 dB, respectively.

Key words : Push-Push VCO, Microstrip Square Open Loop Resonator, Tunable Negative Resistance, Phase Noise

I. 서 론

최근 무선 통신의 기하급수적인 성장은 이동 통신 응용 분야에서 이용할 수 있는 더 많은 채널들에 대한 요구를 증가하게 만들었다. 이에 따라, 이러한 요구는 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성에 대해 더욱 더 엄격한 요구 조건을 부여하게 만들었다^[1].

다른 전압 제어 발진기들과 마찬가지로, push-push 전압 제어 발진기의 가장 중요한 성능 지표 중의 하나는 위상 잡음 특성이다. Push-push 전압 제어 발진기는 균형을 맞추어 동작하는 두 개의 전압 제어 발진기를 이용하고 출력 단에서 오직 2차 고조파 성분만이 결합된다. Push-push 전압 제어 발진기에서 공진기의 설계는 동작 주파수의 절반의 주파수로 이

「이 연구는 2007학년도 숭실대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음.」

숭실대학교 정보통신전자공학부(School of Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

· 논문 번호 : 20070518-01S

· 수정완료일자 : 2007년 8월 14일

루어지고, 이로 인해 공진기의 Q 는 더 높은 값을 얻을 수 있다. 또한, 동작 주파수의 절반의 주파수에서 설계하는 것을 통하여 고주파 전압 제어 발진기에서 증가된 소자 이득을 얻을 수 있다. 이러한 장점들 때문에, push-push 원리를 이용한 설계 접근 방법은 저위상 잡음 전압 제어 발진기 설계에 있어서 매우 유용한 방법으로 사용되어지고 있다^{[2],[3]}.

저주파 $1/f$ 잡음은 전압 제어 발진기에서 캐리어 주파수에 근접한 위상 잡음 특성을 결정하는 결정적인 역할을 한다. $1/f$ 잡음은 캐리어 주파수로 상향 변환되어지고, 이로 인해 캐리어 주파수에 근접한 $1/f^3$ 영역에 나타나는 것으로 잘 알려져 있다. 캐리어 주파수에 근접한 $1/f^3$ 영역에서 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 공진기의 Q 값에 영향을 받는다. 하지만 마이크로스트립 공진기는 작은 Q 값 때문에 위상 잡음을 줄이는데 제한이 있다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기는 큰 결합 계수 값을 갖고, 이로 인해 큰 Q 값을 갖기 때문에, 이 공진기를 이용한 공진기의 주요 장점들은 좁은 대역 대역 여파 특성, 손쉬운 제작, 낮은 발산 손실, 그리고 예리한 선택도이다. 이 공진기는 무선 통신 시스템에서 사용되어지는 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄이는 매우 유용한 방법이다^{[4],[5]}.

본 논문에서는 매우 낮은 위상 잡음 특성을 얻기 위하여 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 가변 부성 저항을 이용한 향상된 push-push 전압 제어 발진기를 제시하였다.

II. 설계 원리

Push-push 전압 제어 발진기는 서로 위상이 반대로 동작하는 대칭인 두 개의 전압 제어 발진기와 공진기, 그리고 출력 결합 회로로 구성된 주파수 체배 전압 제어 발진기이다. 그림 1은 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용하여 제안한 push-push 전압 제어 발진기의 설계 원리를 보여준다. 각각의 전압 제어 발진기는 하나의 공통 공진기를 이용하여 동작 주파수의 절반의 주파수에서 발진하도록 설계되어졌다. 180° 의 위상차를 얻기 위하여 본 신호(f_0)와 모든 홀수 고조파 신호($3f_0, 5f_0, 7f_0 \dots$)는 제거되고, 모든 짝수 고조파 신호($2f_0, 4f_0, 6f_0 \dots$)는 출력 회

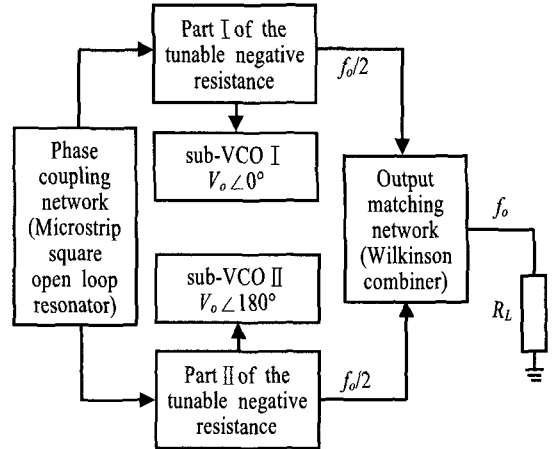


그림 1. 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 가변 부성 저항을 이용한 push-push 전압 제어 발진기의 구성 형태

Fig. 1. Configuration of a novel push-push VCO using microstrip square open loop resonator and tunable negative resistance.

로에서 합쳐지고, 2차 고조파 신호는 출력 단으로 전달된다. 각각의 전압 제어 발진기의 두 신호는 π 의 위상차를 갖는 아래의 식들에 의하여 나타내어진다.

$$s_1(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (1)$$

$$s_2(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \sin(\omega_n t + \phi_n + n \cdot \pi) \quad (2)$$

모든 주파수 신호들은 같은 크기를 갖고 오직 $n \cdot \pi$ 만큼의 위상만 다르다. n 은 고조파 지수를 나타낸다. 두 신호들의 합은 push-push 전압 제어 발진기의 출력 신호 $s(t)$ 가 된다.

$$s(t) = 2a_0 + \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} 2a_n \cdot \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (3)$$

본 신호와 홀수 고조파 신호들의 위상차 때문에, 이 주파수 신호들은 제거되고, 반면에 짝수 고조파 신호들은 동위상으로 합해진다.

Push-push 전압 제어 발진기의 공진기는 동작 주파수의 절반의 주파수로 설계되기 때문에 큰 Q 값을 얻을 수 있고, 이로 인하여 위상 잡음이 줄어든다. 두 개의 전압 제어 발진기가 결합된 형태로 이루어진 push-push 전압 제어 발진기의 커플링 효과 때문에 위상 잡음이 3-dB 개선되는 효과를 얻을 수 있는

또 다른 장점이 있다^[2].

본 논문에서 제안한 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기의 혼합 결합은 그림 2의 결합 구조에서 보듯이, 두 개의 공진기가 결합된 공통 부분에서 전계와 자계 분산은 상대적이고, 이 때문에 전계 결합과 자계 결합 중 어느 것도 무시할 수 없다. 그리하여, 이와 같은 경우의 결합을 혼합 결합이라고 한다. 그림 2는 혼합 결합의 일반적인 형태와 이와 관련된 등가 회로를 나타낸다.

식 (4)와 (5)는 혼합 결합에서 두 개의 공진 주파수 (f_c, f_m)을 보여준다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L-L'_m)(C-C'_m)}} \quad (4)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L'_m)(C+C'_m)}} \quad (5)$$

여기서 C, L, C'_m, L'_m 은 각각 자기 캐패시턴스, 자기 인덕턴스, 상호 캐패시턴스, 상호 인덕턴스이다.

식 (4)와 (5)로부터 혼합 결합 계수(k_B)를 아래의

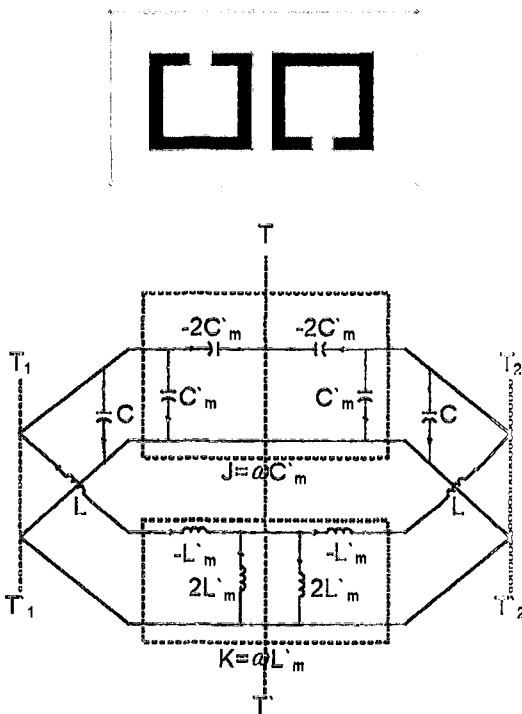


그림 2. 혼합 결합 구조와 이와 관련된 등가 회로
Fig. 2. Mixed coupling structure, and an associated equivalent circuit.

같이 얻을 수 있다.

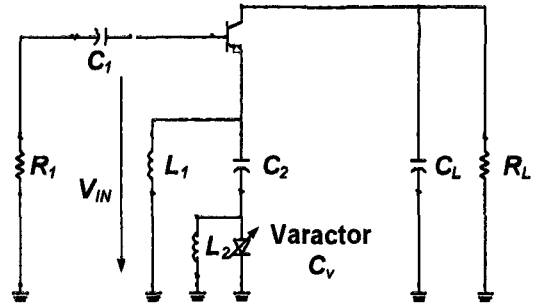
$$k_B = \frac{C L'_m + L C'_m}{L(C+L'_m C'_m)} \quad (6)$$

$L'_m C'_m \ll LC$ 라고 가정하면, 식 (6)은 아래와 같다.

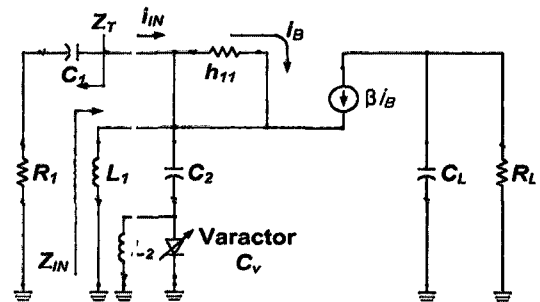
$$k_B \approx \frac{L'_m}{L} + \frac{C'_m}{C} = k'_M + k'_E \quad (7)$$

여기서 혼합 결합이 자계 결합과 전계 결합의 중첩으로부터 만들어졌다는 것을 명확히 나타내고 있다^[6].

버랙터 다이오드를 이용한 가변 부성 저항의 설계는 그림 3에 나와 있다. L_1 은 부성 저항 부분과 병렬로 연결된 인덕터이다. 이때 그림 3에서, 만약 가변 부성 저항의 버랙터 다이오드(C_V), 인덕터(L_1, L_2), 캐패시터(C_2)가 연결되어 있지 않는다면, 입력 임피던스(Z_{IN})은 두 개의 루프 식으로부터 계산되어질 수 있다. 입력 임피던스와 공진기의 리액턴스를 이용



(a) 전압 제어 발진기의 등가회로
(a) Equivalent circuit of VCO



(b) 회로 분석
(b) Circuit analysis

그림 3. 가변 부성 저항을 이용한 전압 제어 발진기의 회로 분석

Fig. 3. Circuit analysis of VCO using tunable negative resistance.

하여 공진 주파수를 얻을 수 있다.

$$\left[\left\{ \left(j\omega_0 L_2 \parallel \frac{1}{j\omega_0 C_v} \right) + \frac{1}{j\omega_0 C_2} \right\} \parallel j\omega_0 L_1 \right] - \frac{1}{j\omega_0 C_1} = 0 \quad (8)$$

식 (8)을 계산하면, 다음과 같은 공진 주파수를 얻을 수 있다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_2(C_2 + C_v) + L_1(C_2 - C_1)}{L_1 L_2 (C_2 C_v - C_1 C_2 - C_1 C_v)}} \quad (9)$$

식 (9)에서, 공진 주파수는 가변 부성 저항 부분에 연결된 버랙터 다이오드에 인가되는 바이어스 전압이 증가함에 따라 조절되어진다^{[7],[8]}.

III. 제안된 전압 제어 발진기 설계

제안된 push-push 전압 제어 발진기의 회로 구성 형태는 그림 1에 나와 있다. NEC's NE661M04 BJT 소자와 M/A-COM's MA46H202 버랙터 다이오드를 전압 제어 발진기 설계를 위하여 사용하였다. 두 개의 전압 제어 발진기는 동작 주파수(5.8 GHz)의 절반의 주파수에서 발진하도록 설계되었고, 하나의 공통 공진기를 이용하여 에미터에서 대칭적인 파형을 갖도록 하였다.

결합 회로는 180°의 위상차를 갖는 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 통하여 설계되었다. 결합 계수는 전압 제어 발진기의 마이크로스트립 사각 개방 루프 사이의 결합 공간이 좁아질수록 증가된다. 증가된 결합 계수는 저위상 잡음을 얻을 수 있게 하지만, 주파수 조절 범위가 좁아지는 문제점이 있다. IEEE 802.11a의 위상 잡음과 주파수 조절 범위 규격을 만족하기 위하여, 전압 제어 발진기의 마이크로스트립 사각 개방 루프 사이의 결합 공간을 적절히 조절하였다.

버랙터 다이오드는 전압 제어 발진기의 발진 주파수를 조절하기 위하여 제안된 push-push 전압 제어 발진기의 가변 부성 저항 부분에 연결하였다. 이는 버랙터 다이오드를 공진기에 연결하여 주파수를 조절하는 방법을 사용할 경우 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기의 높은 Q값 때문에 주파수 조절 범위가 제한된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 버랙터 다이오드를 부성 저항에 연결하여 캐패시턴스

값을 변화시켜서 부성 저항을 조절하고, 이를 통하여 높은 Q값을 갖는 공진기를 이용할 경우 발생하는 전압 제어 발진기의 제한적인 발진 주파수 조절 범위 문제를 해결하였다. 제안된 push-push 전압 제어 발진기의 가변 부성 저항 부분은 대역 통과 정합 회로와 두 개의 인덕터를 이용하여 설계되었다. 조절 전압이 버랙터 다이오드에 인가될 때 DC 성분이 트랜지스터로 흘러 들어가는 것을 막기 위하여 가변 부성 저항 부분에 작은 값의 캐패시터를 연결하였다.

Wilkinson 결합기의 두 개 입력은 두 개의 전압 제어 발진기로부터 나온 2차 고조파 신호를 결합하기 위하여 두 개의 트랜지스터의 에미터 단에 연결되었다.

IV. 실험 결과

마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 가변 부성 저항을 이용하여 제안한 push-push 전압 제어 발진기는 2.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Rogers 기판을 사용하여 제작되었다. 그림 4는 제안한 push-push 전압 제어 발진기의 제작된 기판이다. 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위는 5.744~5.859 GHz이고 위상 잡음 특성은 이 주파수 조절 범위에서 -124.67~-122.67 dBc/Hz @ 100 kHz이다. 출력 전력과 고조파 특성은 각각 8.67 dBm과 -15

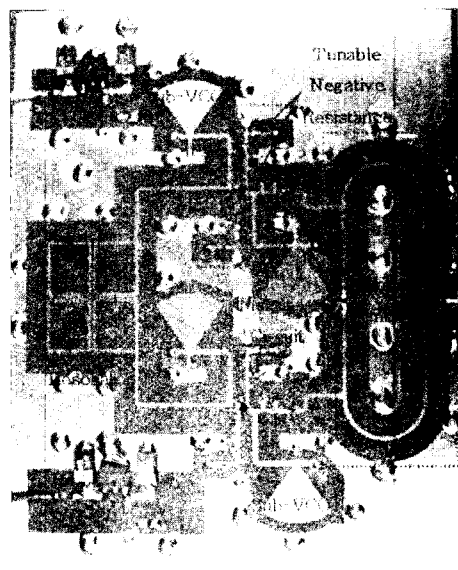
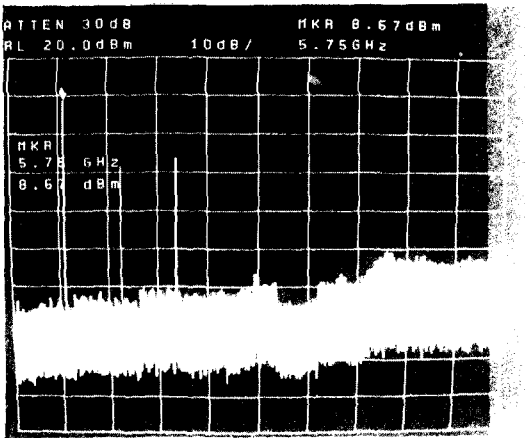
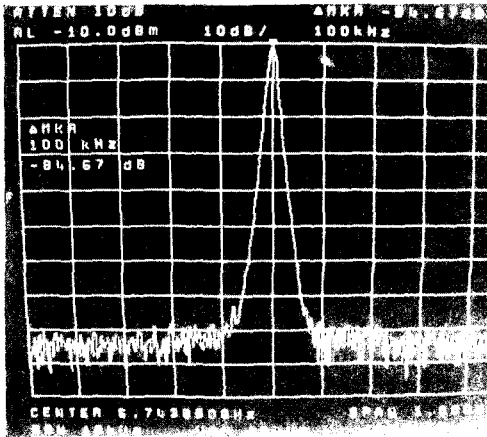


그림 4. 제안된 push-push 전압 제어 발진기의 제작
Fig. 4. Fabrication of the proposed push-push VCO.



(a)



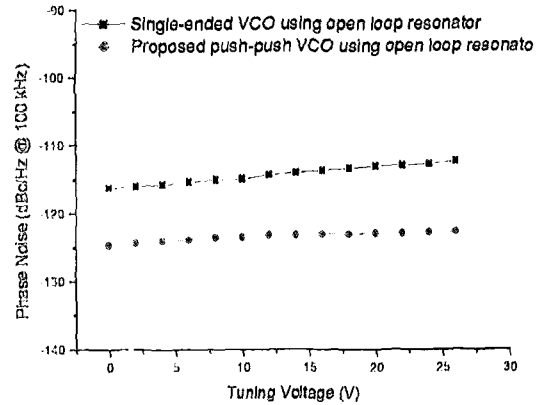
(b)

그림 5. 제안된 push-push 전압 제어 발진기의 동작 특성, (a) 출력 전력, (b) 위상 잡음(5.744 GHz)

Fig. 5. (a) Output power, (b) Phase noise(5.744 GHz) of the proposed push-push VCO.

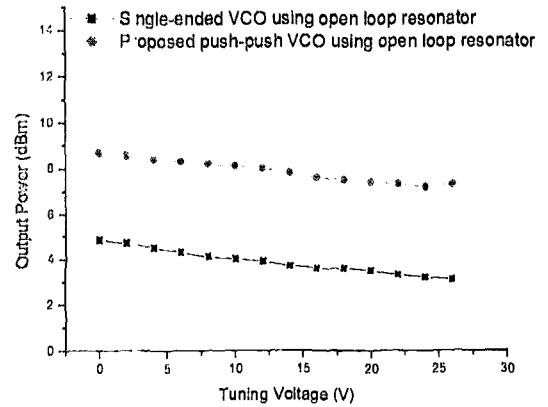
dBc이다. 컬렉터 전압과 전류는 각각 1.8 V와 28 mA이며, 이때 전력 소모는 50.4 mW이다. 그림 5는 제안된 push-push 전압 제어 발진기의 동작 특성을 보여준다. 이 그림에서 보면 기본 주파수인 2.9 GHz와 그에 상응하는 홀수 고조파 신호가 확실하게 억제된 것을 알 수 있다. Push-push 구조에 의해 발생되어지는 주요 문제점인 기본 주파수와 홀수 고조파 신호의 발생을 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용하여 확실히 제거할 수 있다.

위상 잡음 개선 효과를 증명하기 위하여, 제안된 push-push 전압 제어 발진기의 동작 특성을 마이크로



(a) 위상 잡음

(a) Phase noise



(b) 출력 전력

(b) Output power

그림 6. 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용한 단일 종단 전압 제어 발진기와 제안된 push-push 전압 제어 발진기의 동작 특성 비교 결과

Fig. 6. Design results of the single-ended VCO using microstrip square open loop resonator and the proposed push-push VCO.

스트립 공진기를 이용한 push-push 발진기와 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 가변 부성 저항을 이용한 단일 종단 전압 제어 발진기의 동작 특성과 비교하였다. 단일 종단 전압 제어 발진기는 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 taconic 기판을 이용하여 제작하였다. 오프셋 주파수가 100 kHz일 때, 마이크로스트립 공진기를 이용한 push-push 발진기, 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 가변 부성 저항을 이용한 단일 종단 전압 제어 발진기와 제안

표 1. 다른 발진기, 전압 제어 발진기와의 특성 비교
Table 1. VCO performance comparison.

	단위	[4]	[8]	This work
발진 주파수	GHz	5.62	5.735	5.744
출력 전력	dBm	2.9	4.83	8.67
고조파 특성	dBc	-20	-28.83	-15
위상 잡음	dBc/Hz @ 100 kHz	-91	-116.16	-124.67
주파수 조절 범위	GHz	NA	5.735 ~ 5.845	5.744 ~ 5.859
전력 소모	mW	NA (3 V)	20.4 (1.7 V× 12 mA)	50.4 (1.8 V× 28 mA)
FOM	dBc/Hz @ 100 kHz	NA	-198.33	-202.83

된 push-push 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 버랙터 다이오드에 인가되는 조절 전압이 0 V일 때, 각각 -91 dBc/Hz, -116.16 dBc/Hz, -124.67 dBc/Hz이다. 다른 발진기, 전압 제어 발진기와 비교했을 때 개선된 위상 잡음 특성은 오프셋 주파수 100 kHz에서 각각 -33.67 dB, -8.51 dB이다^{[4],[8]}.

버랙터 다이오드에 인가된 조절 전압 범위 0~26 V에서, 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용한 단일 종단 전압 제어 발진기와 제안된 push-push 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성과 출력 전력은 그림 6에 나와 있다. 출력 전력은 3 dB 증가되었다.

다른 전압 제어 발진기들과의 특성 비교를 위하여 가장 널리 사용되는 FOM(Figure Of Merit)은 다음과 같이 정의한다.

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

여기서 $L(\Delta f)$ 는 f_o 의 캐리어 주파수로부터 Δf 의 오프셋 주파수에서의 위상 잡음이고, P 는 전압 제어 발진기 코어의 전력 소모이다. 1.8 V의 공급 전압을 갖는 이 전압 제어 발진기의 FOM은 5.744 GHz에서 -202.83 dBc/Hz @ 100 kHz이다. 제안된 push-push 전압 제어 발진기의 FOM은 1.7 V의 공급 전압을 갖는 단일 종단 전압 제어 발진기의 FOM보다 오프셋 주파수 100 kHz에서 4.5 dB 개선되었다. 표 1은 다른 발진기와 전압 제어 발진기와의 특성 비교를 나타낸다.

V. 결 론

본 논문에서는 위상 잡음 특성을 개선시키기 위하여 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 가변 부성 저항을 이용한 향상된 push-push 전압 제어 발진기를 설계 제작하였다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용한 push-push 전압 제어 발진기의 발진 주파수를 조절하기 위하여 버랙터 다이오드를 전압 제어 발진기의 부성 저항 부분에 연결하였다. 발진 주파수, 고조파 특성, 출력 전력은 각각 5.744 GHz, -15 dBc, 8.67 dBm이다. 제안된 push-push 전압 제어 발진기는 가변 부성 저항에 의하여 5.744~5.859 GHz의 주파수 조절 범위를 갖는다. 이 주파수 조절 범위에서 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 push-push 구조에 의하여 -124.67~ -122.67 dBc/Hz @ 100 kHz의 위상 잡음 특성을 갖는다.

참 고 문 헌

- [1] A. Hajimiri, 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, Feb. 1998.
- [2] Jonghoon Choi, Amir Mortazawi, "Design of push-push oscillators for reducing 1/f noise upconversion", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 1531-1534, Jun. 2005.
- [3] Yu-Lung Tang, Huei Wang, "Triple-push oscillator approach: theory and experiments", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 36, no. 10, pp. 1472-1479, Oct. 2001.
- [4] Jonghoon Choi, Amir Mortazawi, "Design of push-push and triple-push oscillators for reducing 1/f noise upconversion", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 11, pp. 3407-3414, Nov. 2005.
- [5] Eunyong Park, Chulhun Seo, "Low phase noise oscillator using microstrip square open loop resonator", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Jun. 2006.
- [6] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Couplings of micro-

마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 가변 부성 저항을 이용한 저위상 잡음 Push-Push 전압 제어 발진기

strip square open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 12, pp. 2099-2109, Dec. 1996.

[7] Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko, *RF Circuit De-*

sign Theory and Applications, Prentice-Hall, 2000.

[8] 최재원, 이종민, 서철현, "Microstrip square open loop와 tunable negative resistance를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기", *한국전자파학회논문지*, 17(12), pp. 1143-1149, 2006년 12월.

최 재 원



2006년 2월: 숭실대학교 정보통신
전자공학부 (공학사)

2006년 3월~현재: 숭실대학교 정
보통신공학과 석사과정

[주 관심분야] 초고주파 회로 설계,
RF Power Amplifier, VCO, RFIC,
RFID 등

서 철 현

한국전자파학회논문지, 17(12) 참조