

고조파 억압을 위한 병렬 궤환형 발진기와 주파수 체배기

정희원 이 건 준*, 고 정 필**, 김 영 식*

Parallel Feedback Oscillator for Strong Harmonics Suppression and Frequency Doubler

Kun-Joon Lee*, Jung-Pil Ko**, Young-Sik Kim* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 고조파 억압 특성 개선을 위한 저잡음 병렬 궤환형 발진기 (Parallel feedback oscillator)와 주파수 체배기 (Frequency doubler)를 설계 및 제작하였다. 주파수 체배를 위한 발진기의 기본 주파수를 유전체 공진기 (DR: Dielectric Resonator) 여파기와 능동소자 사이에서 얻음으로써 불요고조파를 현저히 억압하였다. 발진기의 기본 주파수 신호는 고조파 신호를 억압하기 위한 추가적인 대역 통과 여파기가 필요치 않으며 곧바로 주파수 체배기의 입력단으로 인가되어 주파수 체배기의 입력 정합 회로가 간단하다. 측정된 발진기의 고조파 억압 특성은 -47.7 dBc이고 주파수 체배기를 이용하였을 때 24.0 GHz 에서의 기본 주파수 억압 특성은 -37.5 dBc이다. 위상 잡음 특성은 중심 주파수에서 10 KHz와 100 KHz 떨어진 곳에서 각각 -80.3 dBc/Hz와 -93.5 dBc/Hz이다.

Key Words : Dielectric Resonator (DR), Frequency Doubler, Oscillator

ABSTRACT

In this paper, a low noise parallel feedback oscillator for harmonic suppression and a frequency doubler are designed and implemented. As the fundamental signal of the oscillator for frequency doubling is extracted between the dielectric resonator (DR) filter and the gate device of the active device, the undesired harmonics at the output of the oscillator is remarkably suppressed. The fundamental signal of the oscillator for frequency doubling directly feeds to the frequency doubler without an additional band pass filter for harmonic suppression. The second harmonic suppression of -47.7 dBc at the oscillator output is achieved, while the fundamental suppression of -37.5 dBc at the doubler output is obtained. The phase noise characteristics are -80.3 dBc/Hz and -93.5 dBc/Hz at the offset frequency of 10 KHz and 100 KHz from the carrier, respectively.

I. 서 론

통신 시스템에서는 국부 발진기(LO: Local Oscillator)의 위상잡음이 전체 시스템의 질적 용량을 결정하므로 주파수에 대하여 보다 안정적이고 위상 잡음이 낮은 신호원이 필요하다. 특히, 초고주

파 대역 (Microwave band)이나 밀리미터파 대역 (Millimeter-wave band)에서는 기술이 많이 발전하였지만 주파수에 대한 반도체 물성의 한계 때문에 단일 소자를 이용한 신호원을 얻기가 매우 어렵다. 그러므로, 저위상 잡음의 신호원을 얻기 위하여 주로 주파수 다체배기 (Frequency multiplier)를 많이

* 고려대학교 전파공학과 전파기술 연구실(ikunj21@korea.ac.kr)

** SK Teletech

논문번호 : KICS2004-10-239, 접수일자 : 2004년 10월 19일

이용한다. 이러한 경우, 단일 소자를 이용하여 얻은 발진 신호원의 위상잡음 특성보다 동일한 주파수의 신호원에 대하여 발진기와 주파수 다체배기를 이용하여 얻는 것이 더 좋은 것으로 보고되고 있다¹⁴⁾.

일반적으로 주파수 체배기 (Frequency doubler)를 이용한 발진기의 설계에 있어서는 발진기의 출력인 기본 주파수에서는 낮은 위상 잡음을 갖으며 고조파 성분들을 충분히 제거되도록 발진기의 출력과 주파수 체배기 사이의 정합을 해야 하고 주파수 체배기의 출력에서는 출력인 2차 고조파를 제외한 모든 고조파 성분, 특히, 기본 주파수를 충분히 억압할 수 있도록 출력 정합을 해야 한다¹⁵⁾⁶⁾. 본 논문에서는 고조파 억압 특성과 저 위상 잡음 특성을 갖는 병렬 레환형 12.0 GHz 발진기를 설계 및 제작하였다. 발진기의 고조파 억압 특성을 개선하기 위해서 발진기의 출력을 유전체 공진기의 다음 단에서 얻도록 하였다. 발진기의 충분한 고조파 억압 특성으로 발진기와 주파수 체배기 사이에 고조파를 억압하기 위한 여파기가 필요치 않으며 둘 사이의 임피던스 정합을 보다 간단히 하였다

II. 병렬 레환형 발진기 설계

유전체 공진기를 이용한 병렬 레환형 발진기의 해석은 공진기 여파기를 통한 증폭기의 정제환 topology 이용한 것으로서 주파수의 동조 대역폭이 크지 않지만 DC 전원의 변동에 따른 주파수 변동 (Pushing figure)이나 부하의 변동에 따른 주파수 변동 (Pulling figure)의 특성이 우수한 장점이 있다. 본 논문에서 설계한 주파수 체배를 위한 병렬 레환형 발진기의 발진 주파수는 12.0 GHz이다. 발진기는 12.0 GHz 유전체 공진기, 능동 소자 MESFET, 그리고 출력을 얻기 위한 Branch-line 결합기로 이루어진다. 유전체 공진기는 주파수 안정도가 좋고 높은 Q(Quality factor)를 갖으며 온도에 대한 특성이 매우 우수하여 많은 발진기에서 사용된다. 그림 1(a)에서는 마이크로스트립 전송 선로와 유전체 공진기가 결합한 형태를 보이고 있다. d 와 d_1 은 유전체 공진기 평면이 단락 회로로 작용하도록 $\lambda/4$ 로 하여야 한다. 유전체 공진기는 R, L, C 병렬 회로로 나타낼 수 있으며 마이크로스트립 전송 선로와 결합한 등가 회로를 그림 1(b)에 보이고 있다. 마이크로스트립 전송 선로의 두 면이 서로 대칭인 경우의 유전체 공진기는 대역 통과 필터로 동작하게 된

다. 이 회로의 산란계수는 다음과 같이 식(1), (2)로 표현된다.

$$S_{21} = S_{12} = \frac{1}{\{[(1 + (1/a))] + j\sqrt{1}(\delta/a) + \cot\theta\}}P \quad (1)$$

$$S_{11} = S_{22} = (1/P) + S_{21} \quad (2)$$

여기서 $\delta = Q[(f^2/f_0^2) - 1]$, $a = 2\beta \sin^2\theta$, 그리고 $P = \cos 2\theta_1 + j\sin 2\theta_1$ 이다.

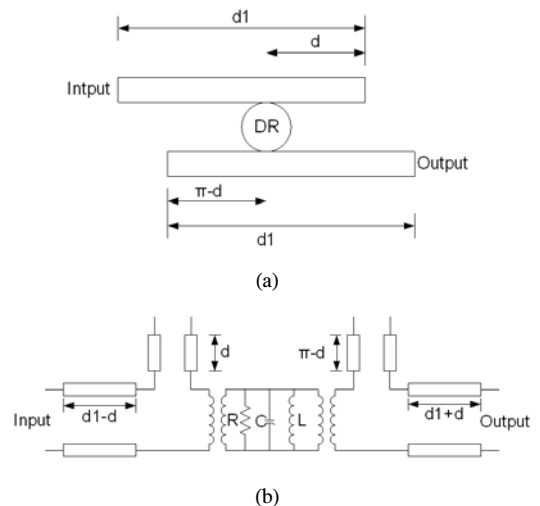


그림 1. 유전체 공진기 여파기
(a) DR과 마이크로스트립 전송선로의 결합형태(b)등가회로
Fig 1. Dielectric resonator filter
(a) Configuration for DR coupled between two microstrip lines (b) Equivalent circuit

대역 통과 유전체 공진기 여파기의 시뮬레이션은 3D EM 시뮬레이션 툴인 Ansoft사의 HFSS를 이용하였다. 유전체 공진기는 반지름이 4.65 mm 이고 높이는 2.06 mm이며 유전율은 38인 실리더형이다. 유전체 공진기는 마이크로스트립 전송 선로와 자기 결합 (Magnetic coupling)을 최대로 하기 위해 개방 스텐트로부터 12.0 GHz의 $\lambda/4$ 길이인 6.5 mm 떨어진 곳에 위치하였다. 유전체 공진기와 마이크로스트립 전송 선로 사이의 간격은 각각 0.2 mm로 하였으며 정확한 공진 주파수는 유전체 공진기의 위에 놓인 튜닝 평판의 높이를 조절하여 구현하였다. 그림 2는 대역 통과 특성을 갖는 유전체 공진기 여파기의 시뮬레이션한 결과와 측정 결과를 나타내고 있다.

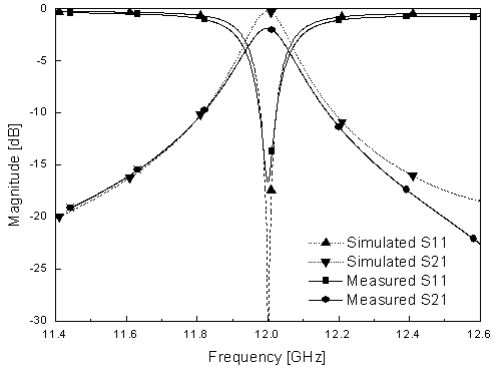


그림 2. 유전체 공진기 여파기의 주파수 응답
Fig 2. Simulated and measured frequency responses.

능동소자인 MESFET을 포함한 병렬 케환형 발진기는 정제환 회로를 이용하여 발진 신호를 해석할 수 있다. 이러한 병렬 케환형 발진기는 크게 발진 소스를 제공하는 능동소자와 특정 주파수를 선택해주는 대역통과 공진기 여파기 그리고 케환 루프로 구성된다. 그림 3은 발진을 위한 기본적인 정제환 회로를 나타내고 있다. 케환 회로의 폐루프 전압 이득은 식(3)으로 표현할 수 있으며 입력 신호가 없이 잡음 레벨의 공진 신호를 증폭시켜 발진을 하여야 하므로 식(3)으로부터 식(4), (5)를 얻을 수 있다.

$$A_{vf}(j\omega) = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A_v(j\omega)}{1 - \beta(j\omega)A_v(j\omega)} \quad (3)$$

$$1 - \beta(j\omega)A_v(j\omega) = 0 \quad (4)$$

$$\beta(j\omega)A_v(j\omega) = 1 \quad (5)$$

식(5)는 실수부와 허수부로 나누어 식(6)으로 다시 표현할 수 있으며 이 식을 실수부와 허수부로 각각 다시 정리하면 식(7), (8)식을 얻을 수 있다. 식(7)은 잡음 레벨에서의 공진 신호를 증폭하기 위한 이득을 표현한 식이고 식(8)은 발진 주파수를 결정하는 식이다. 발진이 시작된 신호는 증폭기 출력의 포화영역 근처까지 성장하게 된다

$$\beta_r(\omega)A_{vo} + j\beta_i(\omega)A_{vo} = 1 \quad (6)$$

$$A_{vo} = \frac{1}{\beta_r(\omega)} \quad (7)$$

$$\beta_i(\omega) = 0 \quad (8)$$

또한, 발진 신호가 $v_{in} = A \cos \omega t$ 이라면 발진 출

력은 비선형 증폭기의 특성에 따라 식(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_o(t) = a_1 v_{in}(t) + a_2 v_{in}^2(t) + a_3 v_{in}^3(t) + \dots \\ = A_1 \cos(\omega_o t) + A_2 \cos(2\omega_o t) + A_3 \cos(3\omega_o t) + \dots \quad (9)$$

기본 주파수와 그 기본 주파수의 고조파 성분으로 이루어져 있는 발진 신호에서 만약 2차 이상의 항을 모두 제거할 수 있다면 위상 잡음, 주파수 안정도와 더불어 고주파 발진기의 특성을 결정짓는 중요한 요소인 고주파 억압 특성을 개선할 수 있다

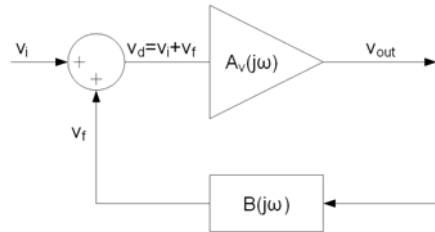


그림 3. 발진을 위한 정제환 회로
Fig 3. Positive feedback circuit for oscillation

전통적인 병렬 케환형 발진기는 그 출력을 능동소자의 출력단에서 결합기를 이용하여 얻는 방법을 택하고 있기 때문에 원하는 순수한 발진 주파수(기본 주파수)를 얻기 위하여 출력단에 $\lambda/4$ 트랩을 사용하거나 대역 통과 여파기 또는 저역 통과 여파기를 사용하여 고조파 성분을 억압한다. 본 논문에서는 정제환 방식을 이용한 발진 회로에서 유전체 공진기 회로가 대역 통과 특성을 나타내는 것에 착안하여 유전체 공진기 여파기를 고조파 억압을 위한 대역 통과 여파기로 재사용할 수 있도록 하였다. 즉, 출력을 얻기 위한 결합기를 유전체 공진기와 MESFET의 게이트 사이에 위치하여 능동소자의 비선형성에 의하여 생긴 2차 이상의 고조파 성분을 제거함으로써 최종 출력에서 증폭된 고조파 신호를 억압하도록 하였다. 그림 4는 병렬 케환형 유전체 공진기 발진기의 발진 출력을 시뮬레이션한 결과를 보이고 있으며 고주파 성분을 억압함으로써 기본 주파수의 출력을 최대가 되도록 하였다. 출력을 얻기 위한 결합기로는 Branch line 결합기를 이용하였으며 그림 5에서 설계한 발진기의 구성도를 보이고 있다. 이것은 고주파를 얻기 위하여 주파수 체배기를 이용하는 경우, 주파수 체배기의 공간 확보에 용이한 구성을 하고 있다. 즉, 일반적으로 발진기와

주파수 체배기가 일렬로 구성됨에 반하여 주파수 체배기의 능동소자는 발진기의 능동소자와 병렬 형태로 놓이게 된다. 그러므로 주파수 체배기를 포함한 발진기의 전체 회로의 크기를 함축적으로 구성할 수 있다.

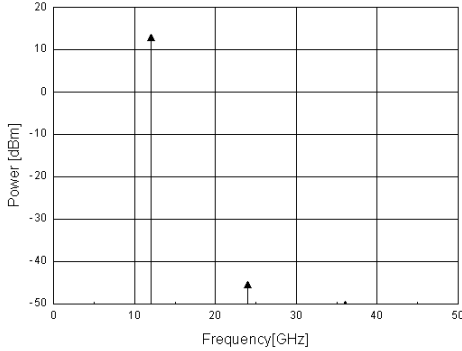


그림 4. 시뮬레이션한 병렬 궤환형 발진기의 출력 스펙트럼
Fig 4. Simulated output spectrum of parallel feedback oscillator

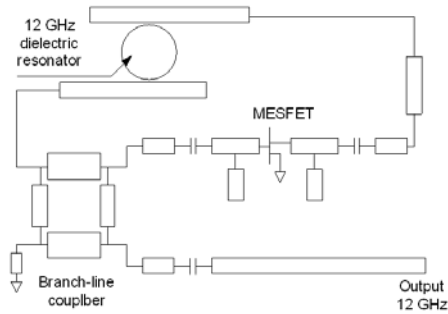


그림 5. 병렬 궤환형 발진기의 구성도
Fig 5. Block diagram of parallel feedback oscillator

III. 주파수 체배기 설계

주파수 체배를 위한 바이어스는 기본 주파수의 전력이 2차 고조파로의 변환 효율이 최대가 되도록 능동소자의 핀치오프 (Pinch off)점 근처에서 동작점을 잡아주어야 한다. 그림 6은 주파수 체배를 위한 바이어스 동작점과 입력 파형에 대한 응답 파형의 궤적을 도식화한 것이다. 입력 신호에 대하여 t_1 일 때, 게이트 전압은 V_p 이고 드레인 전압은 $2V_{DD} - V_K$ 이다. 게이트 전압이 t_1 에서 t_2 로 변하면 드레인 전류는 활성영역에서 최대에 이르게 되며 (I_K) t_2 에서 t_3 로 변할 때 다시 $2V_{DD} - V_K$ 로 되돌아오게 된다. t_3 에서 t_4 그리고 t_5 로 변할

때 게이트 전압은 핀치오프 점에서 그 이하로 인가되므로 드레인 전류는 흐리지 않게 된다. 이때의 드레인 전압은 역파기로서 동작하는 것이 아니므로 능동소자의 드레인단에서는 게이트에 입력된 전압 파형에 대하여 주파수가 체배된 전압 파형을 나타내게 된다.

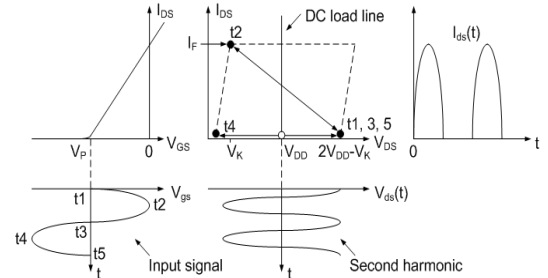


그림 6. 주파수 체배를 위한 파형의 궤적
Fig 6. Waveforms and signal trajectory for frequency doubling

일반적인 주파수 체배기는 비선형 능동소자와 입력 정합 회로와 출력 정합 회로로 구성된다. 입력 정합 회로는 발진기의 출력이 주파수 체배기에 최대한 입력되도록 설계하여야 하고 또한, 발진기의 고조파 성분이 충분히 억압되지 않으면 고조파에 의해 주파수 왜곡 특성이 나타나므로 이러한 고조파를 충분히 억압해 주어야 한다. 주파수 체배기의 입력에서 발진기의 2차 고조파가 가장 큰 영향을 미치므로 이 성분을 억압하기 위해서 대역 통과 역파기를 사용하거나 2차 고조파의 $\lambda/4$ 트랩(Trap)을 사용하여 억압하는 방법을 사용한다. 본 논문에서의 병렬 궤환형 발진기는 고조파 성분을 현격하게 억압하였기 때문에 대역 통과 역파기나 $\lambda/4$ 트랩과 같은 부가회로를 사용하지 않아도 된다. 따라서 발진기에 대한 간단한 정합 회로만으로 주파수 체배기의 입력 정합 회로를 대신할 수 있다. 주파수 체배기의 출력 정합 회로는 입력 정합 회로와 반대로 발진기의 기본 주파수를 최대한 억압해야 하고 출력인 2차 고조파 성분을 최대화 하여야 한다. 그렇지 않으면 주파수 체배기의 주파수에 따른 변환 이득과 위상 잡음이 나빠진다. 또한, 주파수 체배기의 입력측은 발진기의 기본 주파수를 위한 정합이 필요하므로 12.0 GHz 바이어스 회로를 출력측은 2차 고조파를 출력으로 사용되므로 24.0 GHz의 바이어스 회로를 이용하여 DC 전류를 인가한다.

그림 7과 8은 주파수 체배기를 이용하여 얻은 24.0 GHz 발진기의 출력 스펙트럼과 출력 파형을

시뮬레이션한 결과를 보이고 있다 주파수 체배기의 출력에서는 대역 통과 여파기는 사용하지 않고 기본 주파수의 $\lambda/4$ 트랩을 이용하여 기본 주파수를 억압하고자 하였다.

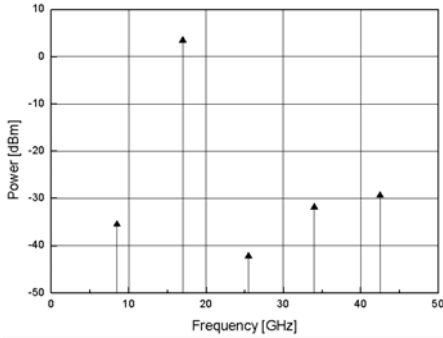


그림 7. 주파수 체배기를 포함함 발진기의 출력 스펙트럼
Fig 7. Simulated output spectrum of oscillator with frequency doubler

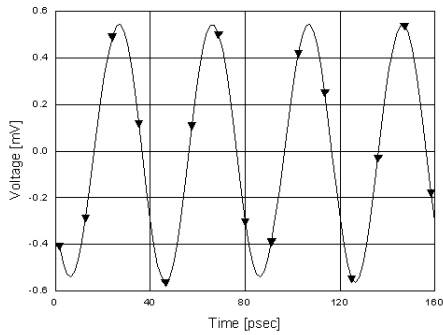


그림 8. 주파수 체배기를 포함함 발진기의 출력 파형
Fig 8. Voltage waveform of oscillator with frequency doubler

IV. 발진기와 주파수 체배기의 측정

발진기와 주파수 체배기 회로의 설계는 Agilent사의 ADS를 이용하였다 PCB 기판은 유전율 2.2에 높이가 0.508mm인 RT/Duroid 기판을 이용하였으며 발진기의 능동소자로는 GaAs MESFET인 ATF 26884를 이용하였다. 발진기의 바이어스 조건은 $V_{ds}=4.5$ V, $I_{ds}=38$ mA이다. 그림 9는 측정된 병렬 케환형 발진기의 출력 스펙트럼을 보이고 있다 발진기의 출력이 부가 회로 없이 충분한 고조파 억압 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 발진기의 기본 주파수 출력은 9.3 dBm이며 그림 10에서 나타난 2차 고조파 억압특성은 -47.7 dB이다. 그림 11은 주파수 체배기를 이용한 24.0 GHz의 최종 출력 스펙트럼을 나타내고 있다 주파수 체배기의 능

동소자로는 HEMT인 FHX35LG를 이용하였으며 바이어스 조건은 $V_{ds}=5.0$ V, $I_{ds}=7$ mA이다. 주파수 체배기를 포함한 발진기의 최종 출력은 4.7 dBm이며 주파수 체배기의 주파수 변환 이득은 -4.6 dB로서 매우 우수한 특성을 보이고 있다 그림 12에서는 주파수 체배기의 출력단에서의 고조파 억압 특성을 나타내었는데 기본 주파수 억압 특성은 -37.5 dBc이며 3차 고조파 억압 특성은 -44.7 dBc 이다. 그림 13은 제작된 발진기의 위상잡음을 나타내고 있는데 중심주파수에서 10 KHz와 100 KHz 떨어진 곳에서 각각 -80.3 dBc/Hz와 -93.5 dBc/Hz의 우수한 위상잡음 특성을 나타내었다. 그림 14에서는 제작된 전체 회로의 실물 사진을 보이고 있는데 발진기와 주파수 체배기가 병렬 구조의 형태로 놓이게 되어 전체 회로의 구성에 있어서 소형화되어 있다 표 1에서는 제안된 구조의 발진기 특성을 전통적인 것의 특징과 비교하여 정리하였다. 출력은 약 2.2 dB 높게 측정되었으며 위상 잡음은 약 10 dB 개선되었다.

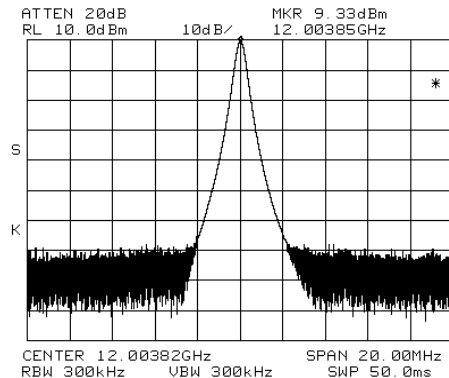


그림 9. 유전체 공진기 발진기의 출력 스펙트럼
Fig 9. Measured output spectrum of DR oscillator

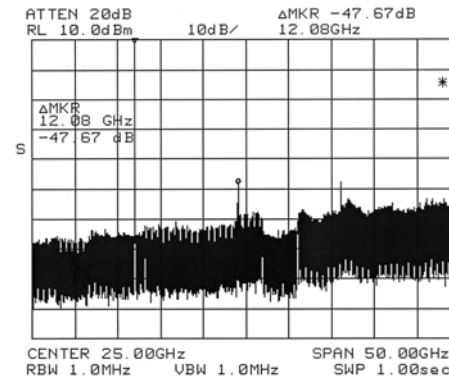


그림 10. 유전체 공진기 발진기의 고조파 억압 특성
Fig 10. Measured harmonic suppression of DR oscillator

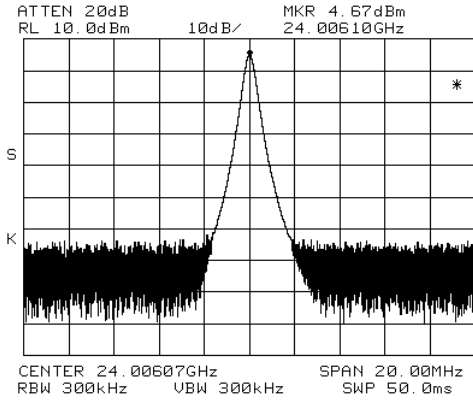


그림 11. 주파수 체배기를 포함한 발진기의 출력 스펙트럼
Fig 11. Measured output spectrum of DR oscillator with frequency doubler

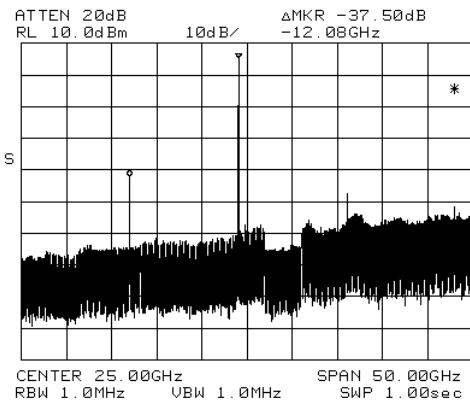


그림 12. 주파수 체배기를 포함한 발진기의 고조파 억압 특성
Fig 12. Measured harmonic suppression of DR oscillator with frequency doubler

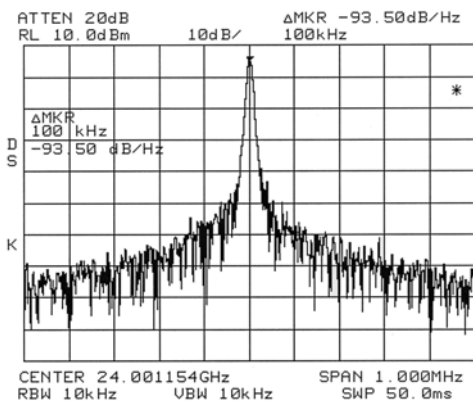


그림 13. 주파수 체배기를 포함한 발진기의 위상 잡음
Fig 13. Phase noise characteristic of DR oscillator with doubler

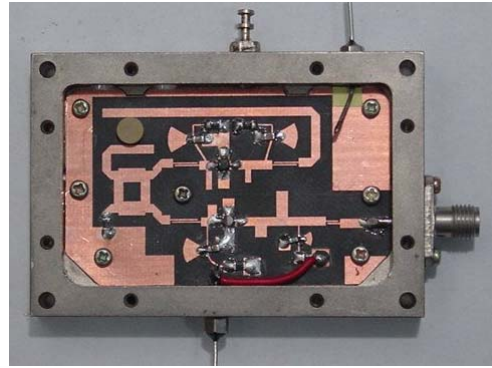


그림 14. 유전체 공진 발진기의 실물 사진
Fig 14. Photograph of DR oscillator with frequency doubler

표 1. 제안된 발진기의 전기적 특성 비교
Table 1. Characteristics comparison of proposed oscillator with conventional one

Parameter	Conventional	Proposed
Output freq. [GHz]	24.0	24.0
Output power [dBm]	2.5	4.7
Phase noise [dBc/Hz]		
@ 10 KHz	-72.9	-80.3
@ 100 KHz	-82.1	-93.5
@ 1 MHz	-105.5	-115.7
Harmonic supp. [dBc]		
@ fo	-23.4	-37.5
@ 3fo	-34.2	-44.7

V. 결론

본 논문에서는 주파수 체배기를 이용한 24.0 GHz 발진기를 설계 및 제작하였다 병렬 궤환형 발진기의 출력은 MESFET의 게이트와 유전체 공진기 여파기 사이에서 취함으로써 낮은 위상잡음 뿐만 아니라 고조파 성분을 최대한 억압하도록 하였다 고조파가 충분히 억압된 발진 신호는 주파수 체배기와의 사이에 고조파 억압을 위한 부가적인 회로 없이 곧바로 주파수 체배기의 입력으로 인가된다 설계된 병렬 궤환형 발진기와 주파수 체배기는 일반적인 구성과 다르게 병렬 형태로 구성되므로 전체 회로가 매우 간결하며 소형화 되어 있다 이와 같은 발진기는 LMDS (Local Multipointing Distribution Service)용 시스템의 국부 발진기로 응용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] M. Funabashi, T. Inoue, K. Ohata., K. Maruhashi, K. Hosoya, M. Kuzuhara, K. Kanekawa, and Y. Kobayashi, "A 60 GHz MMIC stabilized frequency source composed of a 30 GHz and a doubler," *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 71-74, 1995.

[2] A. Kanda, T. Hirota, H. Okazaki, and E. Nakamae, "An MMIC chip set for a V-band phase-locked local oscillator," *IEEE GaSa IC Symp.*, pp. 259-262, 1995.

[3] A. M. Pavio, and M. A. Smith, "A 20-40 GHz push-push dielectric resonator oscillator," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-33, pp. 1344-1349, 1985.

[4] 현안선, 김훈석, 김종현, 이종철, 김남영, 정원채, 홍의석, "주파수 체배기를 이용한 K-band 용 Hair-pin 발진기," 한국전자과학회논문지 9(6), February 1998.

[5] A. Boudiaf, D. Bachelet, and C. Rumelhard, "A high-efficiency and low-phase-noise 38-GHz pHEMT MMIC tripler," *IEEE Trnas. Microwave Theory Tech.*, pp. 2546-2553, 2000.

[6] Y. Kwon, D Pavlidis, P. Marsh, G. I. Ng, T. Brock, G. Munns, and G. I. Haddad, "A fully integrated monolithic D-band oscillator-doubler chain using InP-based HEMT's," *IEEE GaAs IC Symp.*, pp. 51-54, 1992.

이 건 준(Kun-Joon Lee)

정회원



1997년 2월 원광대학교 반도체학과 졸업
 1999년 2월 광운대학교 전파공학과 석사
 2002년 3월~현재 고려대학교 전파공학과 박사과정
 <관심분야> 초고주파 회로 설계(Oscillator, Power Amplifier, Antenna)

고 정 필(Jung-Pil Ko)

정회원



2002년 2월 고려대학교 전파공학과 졸업
 2004년 2월 고려대학교 전파공학과 석사
 2004년 3월~현재 SK Teletech
 <관심분야> 초고주파 회로 설계, 이동 통신 시스템

김 영 식(Yong-Sik Kim)

정회원



1978년 3월~1982년 1월 홍익공업대학 전자과 조교수
 1988년 5월 University of Massachusetts at Amherst(공학박사)
 1988년 5월~1989년 2월 University of Massachusetts at Amherst Post Doc.

1989년 3월~1993년 2월 ETRI 이동통신연구단 무선기술 연구실 실장
 1993년 3월~현재 고려대학교 전파통신공학과 교수
 <관심분야> RF front-end system