

개선된 바랙터 결합 선로를 이용한 Ku-Band 헤어핀 발진기 설계

A Ku-Band Hair-Pin Resonator Oscillator with a New Varactor Coupled Line Structure

최 광 석 · 원 득 호 · 윤 상 원

Kwang-Seok Choi · Duck-Ho Won · Sang-Won Yun

요 약

본 논문에서는 개선된 바랙터 결합 선로를 제안하고, 이 구조를 사용한 주파수 합성기를 설계 제작하였다. 제안된 결합 선로는 기존 구조에 추가적인 $\lambda/4$ 전송 선로를 이용하여 바랙터에서 반사되는 잡음신호를 제거하는 구조이다. 제작한 주파수 합성기는 Ku-band 대역에서 헤어핀 공진기를 사용하였으며, PLL을 사용하여 주파수를 고정하였다. 제안된 구조로 제작한 헤어핀 발진기의 경우, 38 MHz의 주파수 조정 범위와 100 kHz offset에서 -97 dBc/Hz의 위상 잡음을 나타내었다. 이러한 측정 결과는 제작한 기존 구조의 바랙터 결합 선로를 가지는 헤어핀 발진기보다 30 MHz 개선된 주파수 조정 범위와 8 dB 개선된 위상 잡음 특성을 가지는 것으로 확인되었다.

Abstract

In this paper, we propose a new varactor coupled line structure and design the VCO using the proposed structure. The proposed coupled line structure removes the reflected signals from the varactor diode using an added $\lambda/4$ transmission line. The frequency synthesizers are designed using the PLL technique at Ku-band. The synthesizer using the proposed coupled structure has 38 MHz frequency tuning range and -97 dBc/Hz phase noise characteristic at 100 KHz offset frequency. The measured results show improved tuning range as well as the improved phase noise characteristics compared to the conventional designs.

Key words : Hair-pin Oscillator, Coupled Line, Varactor, Tuning Frequency, Phase Noise

I. 서 론

현대의 통신 기술은 멀티미디어의 고용량 정보를 개인 서비스 이용자에게 전달하기 위해서 디지털 변조방식을 사용하므로, 저잡음의 안정적인 주파수 합성기를 필요로 하고 있다. 이에 따라서 통신 시스템의 기준 주파수로 동작하게 되는 주파수 합성기의

소형화와 고성능화가 매우 중요한 문제로 인식되고 있다.

발진기의 성능을 개선하기 위한 방법으로는 높은 Q 를 가지는 공진기를 사용하거나, 낮은 잡음지수를 가지는 능동 소자를 사용하는 방법이 있다. 본 논문에서 사용한 헤어핀 공진기의 경우 공진기의 구조 개선을 통하여 Q 의 값을 개선할 수 있다는 장점이

「본 연구는 지식경제부의 차세대 신기술개발 사업의 지원을 받아, 수행하는 차세대 무선통신용 트랜시버 시스템개발사업의 일환으로 수행되었습니다.」

서강대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

· 논문 번호 : 20091109-131

· 교신저자 : 윤상원(e-mail : swyun@sogang.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2009년 12월 18일

있고, 전송 선로를 공진기로 사용하였기 때문에 제작비용이 적게 든다는 장점이 있다. 또한 MMIC로도 제작이 가능하여 소형화를 만족시킬 수 있다.

본 논문에서는 이러한 헤어핀 공진기와 제안된 바랙터 결합 선로를 이용하여 발진기를 제작하였다. 제작한 발진기는 능동 회로 부분에 영향을 주는 잡음 신호를 제거하여 발진기의 위상 잡음 특성을 개선하였다. 제작 결과, Ku-band에서 38 MHz의 주파수 조정 범위와 -97 dBc/Hz의 위상 잡음 특성을 얻을 수 있었다.

II. 헤어핀 공진기 발진기 설계 이론

2-1 헤어핀 공진기 발진기 설계 이론

본 논문에서는 기본적인 공진기 이론과 부성 저항 이론을 사용하여 발진기를 제작하였다. 설계한 발진기의 등가 회로는 그림 1과 같다. 이러한 발진기는 기본적으로 발진 주파수를 결정하는 공진기와 공진기의 손실을 보상해 주는 능동 회로 부분으로 구성된다. 공진기의 경우, 발진 주파수와 같은 공진 주파수로 제작하여 발진 주파수의 신호만을 능동 회로 부분으로 반사시키게 된다. 이렇게 반사된 신호는 능동 회로 부분을 통하여 증폭되어 다시 공진단으로 반사되어 발진이 일어나게 된다.

$$\Gamma_L \Gamma_{in} = 1 \quad (1)$$

식 (1)은 이러한 과정을 수식으로 표현한 것이다. 이는 결과적으로 공진기에서의 손실과 능동 회로 부분에서의 보상되는 신호의 크기가 같으며, 반사되는 신호의 위상이 기준 점에서 서로 같아야 함을 의미

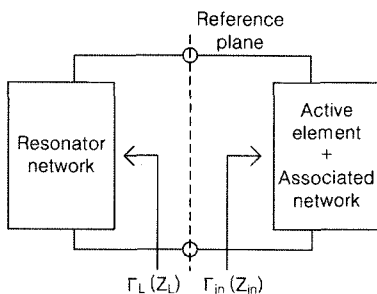


그림 1. 제작한 발진기의 등가 회로
Fig. 1. Equivalent circuit of oscillator.

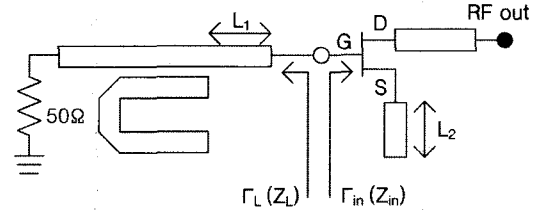


그림 2. 직렬 케환형 발진기 구조
Fig. 2. Series feedback oscillator circuit.

한다^[1].

본 논문에서 사용한 발진기 구조는 그림 2와 같은 직렬 케환형 구조이다. 제작에 사용한 직렬 케환형 구조는 병렬 구조에 비해 좁은 주파수 조정 범위를 가진다는 단점이 있지만, 구조가 간단하고 큰 부성 저항을 얻을 수 있다는 장점 때문에 높은 주파수 대역 발진기 설계 시 주로 이용되는 특징이 있다.

사용한 직렬 케환형 구조의 경우 L_1 의 길이를 변경하여 공진기 단의 위상값을 변경할 수 있으며, L_2 를 변경하여 원하는 부성 저항 값을 얻을 수 있다.

2-2 제안된 바랙터 다이오드 결합 선로 이론

PLL을 이용하여 발진기의 발진 주파수를 고정시키는 경우 전압을 통해 발진 주파수를 변경하기 위해 바랙터 다이오드를 사용하게 된다. 이 때 공진기와 바랙터의 연결을 위해서 결합 선로가 추가되는데, 기존 방식의 경우 그림 3과 같은 구조의 바랙터 결합 선로를 추가하여 바랙터와 공진기를 결합시켰다^{[2][3]}.

하지만 이러한 구조의 경우, 능동 회로 부분에서 공진단으로 인가되는 신호가 일부 바랙터 부분으로

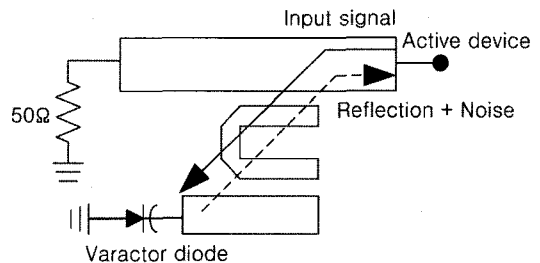


그림 3. 기존의 바랙터 결합 선로와 헤어핀 공진기
Fig. 3. Conventional varactor coupled line with a hair-pin resonator.

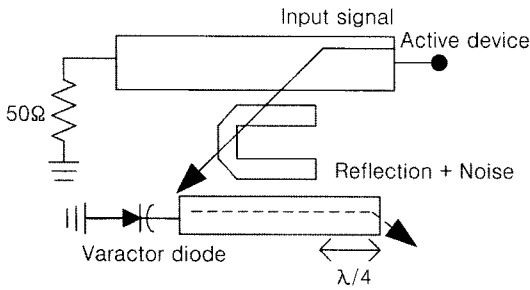


그림 4. 제안된 바랙터 결합 선로와 헤어핀 공진기
Fig. 4. Proposed varactor coupled line with a hair-pin resonator.

전달되는 현상이 일어나게 된다. 결과적으로는 이러한 신호의 반사 신호와 바랙터 자체의 잡음 신호가 다시 능동 회로 부분으로 전달되게 된다. 이러한 현상은 결과적으로 능동 회로 부분의 잡음 지수에 영향을 주어 낮은 위상 잡음을 가지는 원인이 된다.

그림 4는 본 논문에서 제안된 바랙터 결합 선로의 구조이다. 제안된 구조의 경우 기존의 결합 선로에 추가적인 $\lambda/4$ 전송 선로를 추가한 구조이다. 이렇게 추가된 $\lambda/4$ 전송 선로는 제작한 발진 주파수에서 short 특성을 가지기 때문에 반사된 신호와 잡음 신호가 능동 소자 부분으로 인가되는 것을 방지하게 된다. 결과적으로는 반사된 신호와 잡음 신호가 능동 소자 부분에 영향을 주지 못하기 때문에 기존의 결합 선로를 사용한 경우보다 위상 잡음이 개선되게 된다.

III. 헤어핀 공진기 주파수 합성기 설계

3-1 헤어핀 공진기 설계

원하는 주파수에서 공진 주파수를 가지는 헤어핀 공진기를 설계하기 위하여 Agilent사의 ADS를 사용하여 설계하였다. 기판은 유전율 3, 두께 15 mil인 ROGERS사의 RO3003을 사용하였다.

설계한 헤어핀 발진기의 구조는 그림 5와 같다. 전체적인 구조는 $\lambda/2$ 길이를 이용한 기본적인 헤어핀 구조를 사용하였다. 제작된 공진기는 원하는 발진 주파수인 13.8 GHz의 $\lambda/2$ 전송 선로 길이인 6.8 mm 보다 작은 6 mm 정도에서 원하는 공진 주파수를 얻을 수 있었다.

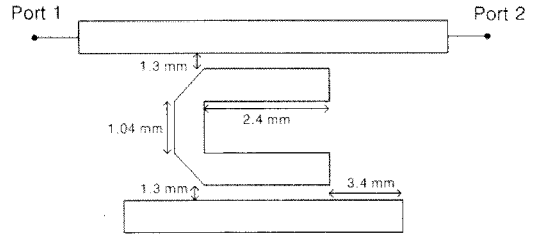


그림 5. 시뮬레이션을 위한 제안된 공진기 구조
Fig. 5. Resonator circuit for ADS simulation.

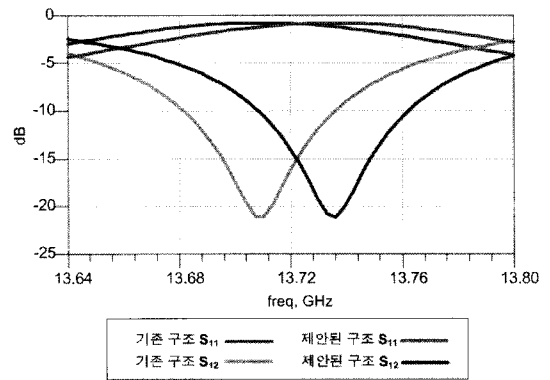


그림 6. 헤어핀 공진기 특성 ADS 시뮬레이션 결과
Fig. 6. ADS simulation result of hair-pin resonator characteristic.

그림 6은 ADS를 이용한 기존 구조와 제안된 구조의 공진기 특성 시뮬레이션 결과이다. ADS 시뮬레이션 결과, 기존 구조와 제안된 구조 모두 약 13.7 GHz에서 공진 주파수를 얻을 수 있었다. 제안된 구조의 경우 기존 구조의 공진 주파수보다 25 MHz 높은 공진 주파수를 가지는 것으로 제안된 구조의 발진 주파수가 더 높을 것임을 예상할 수 있다.

정확한 헤어핀 공진기의 공진 주파수 예측을 위해 제작한 공진기에 바랙터 다이오드를 연결하고, 실제 바랙터에 인가된 전압 변화에 따른 공진 주파수의 변화를 시뮬레이션 하였다. 설계에 사용한 바랙터 다이오드는 MACOM사의 MA-46601로 Deloach method를 이용하여 제작한 등가회로를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

그림 7은 기존 구조의 주파수 변화를, 그림 8은 제안된 구조의 주파수 변화를 ADS 시뮬레이션한 결과이다. 기존 구조의 시뮬레이션 결과 바랙터의 전압 인가에 따른 주파수 변화는 1.2 MHz 정도로 좁게

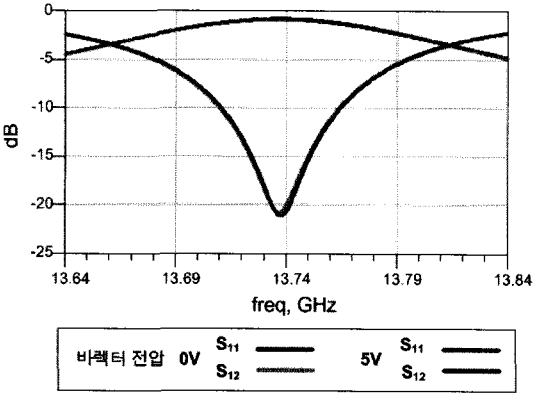


그림 7. 기존 구조 전압 조정 범위 시뮬레이션
Fig. 7. A simulation result of conventional type voltage tuning range.

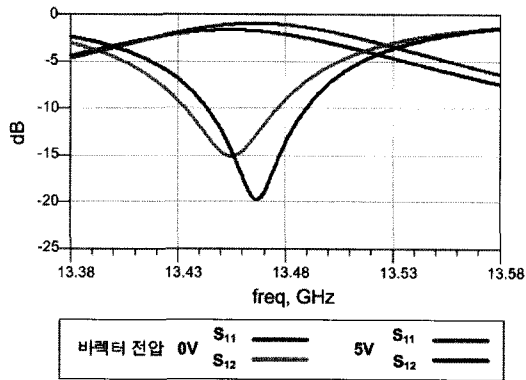


그림 8. 제안된 구조 전압 조정 범위 시뮬레이션
Fig. 8. A simulation result of proposed type voltage tuning range.

나타난 것을 확인하였다. 반면에 제안된 구조의 주파수 변화는 12 MHz로 기존 구조의 경우보다 더 넓은 주파수 변화 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

이렇게 시뮬레이션을 통하여 얻은 공진기 특성을 이용하여 위상 잡음 특성에 직접적으로 영향을 주는 loaded Q 를 계산하였다. 표 1은 기존 구조와 제안된 구조에서 바랙터 인가 전압에 따른 loaded Q 를 계산한 값이다. 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과를 보면 기존 구조의 경우 바랙터에 0 V를 인가하였을 때 79, 5 V를 인가하였을 때 88의 loaded Q 를 가지는 것을 확인하였다. 일반적으로 바랙터의 경우 전압 인가 시 더 좋은 Q 특성을 가지기 때문에 5 V 인가 시 더 높은 loaded Q 를 얻을 수 있었다. 제안된 구조의

표 1. 시뮬레이션을 통하여 얻은 loaded Q

Table 1. Calculated loaded Q from ADS simulation.

Loaded Q			
바랙터 인가 전압			
기존 구조		제안된 구조	
0 V	5 V	0 V	5 V
79	88	102	103

경우 바랙터에 0 V와 5 V를 인가한 경우 loaded Q 는 각각 102, 103으로 기존의 구조보다 더 좋은 loaded Q 특성을 가짐을 확인하였다.

3-2 전압 제어 헤어핀 발진기 설계

제작한 발진기의 부성 저항 부분은 원하는 발진 주파수인 13.8 GHz에서도 높은 이득을 얻을 수 있는 HEMT를 사용하여 설계하였다. 사용한 소자는 Agilent사의 ATF36077로 ADS를 이용하여 설계한 부성 저항의 시뮬레이션 결과는 그림 9와 같다. 설계 결과 11 GHz부터 14.11 GHz에서 부성 저항이 발생하여 원하는 13.8 GHz에서 사용이 가능함을 확인하였다.

정확한 발진 주파수를 예측하기 위해 ADS의 Oscstest를 사용하여 제작한 헤어핀 공진기 발진기의 발진 가능성을 시뮬레이션 하였다. 그림 10은 제안된 구조를 이용한 헤어핀 발진기의 layout이며, 그림 11은 이러한 제안된 구조에서의 ADS Oscstest 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과 13.76 GHz에서 공진단과 능동 회로 부분의 반사 계수의 곱이 '1'보다

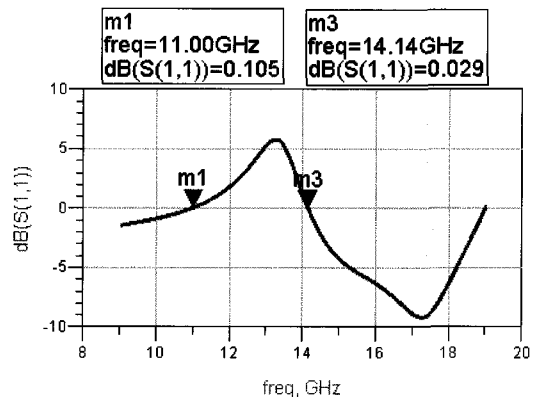


그림 9. 부성 저항 ADS 시뮬레이션 결과
Fig. 9. ADS simulation result of negative resistance.

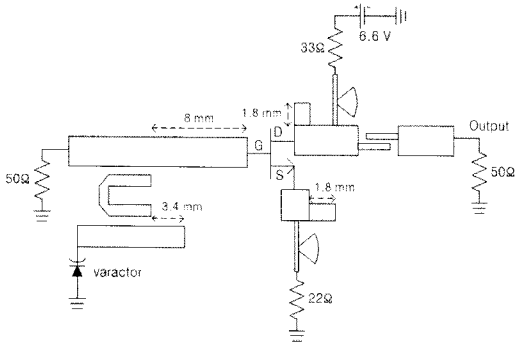


그림 10. 제작한 헤어핀 발진기 layout
Fig. 10. Hair-pin oscillator layout.

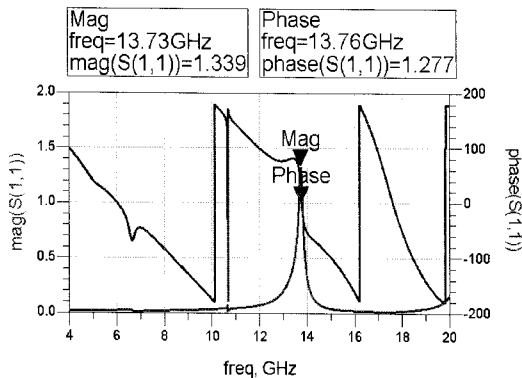


그림 11. ADS osctest 시뮬레이션 결과
Fig. 11. ADS osctest simulation result.

크고, 위상 또한 '0'이 되어 발진 가능성을 가짐을 확인하였다.

3-3 헤어핀 공진기 주파수 합성기 설계

설계한 헤어핀 공진기 전압 제어 발진기에 PLL (Phase-Locked Loop)을 이용하여 주파수 합성기를 설계하였다. 그림 12는 설계한 주파수 합성기의 블록 다이어그램이다. 사용한 PLL IC는 National Semiconductor사의 LMX2350이며, 기준 주파수로는 13 MHz의 TCXO(Temperature Compensation Crystal Oscillator)를 사용하였다. 사용한 LMX2350의 경우 fractional N 방식의 PLL IC로서 동작 가능한 주파수 범위는 1.2 GHz에서 2.5 GHz이다. 제작한 발진기의 발진 주파수가 사용된 PLL IC의 동작 범위와 일치하지 않으므로 출력된 신호에 1/8 divider인 Hittite사의 HMC494를 사용하였다.

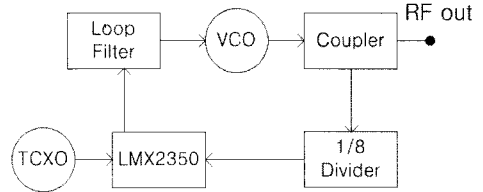
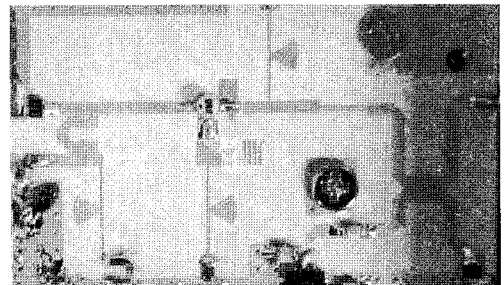


그림 12. 제작한 주파수 합성기 구조도
Fig. 12. Block diagram of a frequency synthesizer.

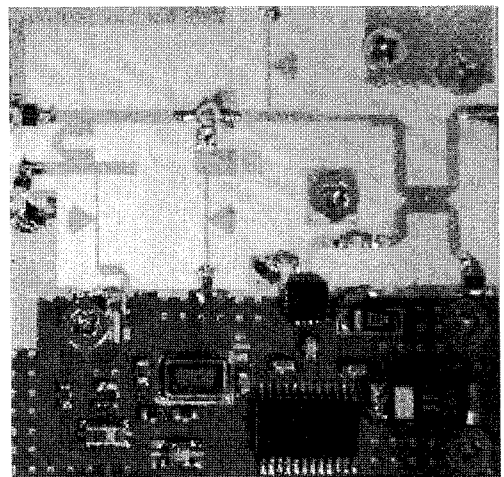
IV. 제작 및 측정 결과

그림 13는 제작한 기존 구조와 제안된 구조의 헤어핀 공진기 주파수 합성기이다. 두 구조 모두 PLL을 이용하여 주파수를 고정시켰으며, PLL의 제어 신호는 외부에서 입력하였다.

제작한 주파수 합성기를 측정하기 위하여 Agilent



(a) 기존 구조 주파수 합성기
(a) Conventional type frequency synthesizer



(b) 제안된 구조 주파수 합성기
(b) New type frequency synthesizer

그림 13. 헤어핀 공진기 주파수 합성기
Fig. 13. Hair-pin resonator frequency synthesizer.

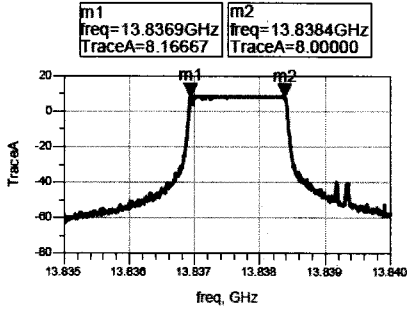


그림 14. 기존 구조의 전압 조정 주파수 범위 측정 결과

Fig. 14. Measured result of conventional type synthesizer voltage tuning range.

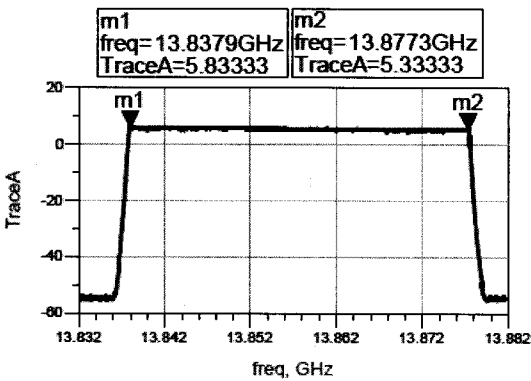


그림 15. 제안된 구조의 전압 조정 주파수 범위 측정 결과

Fig. 15. Measured result of proposed type synthesizer voltage tuning range.

사의 8565EC spectrum analyzer를 사용하여 출력과 특성을 측정하였다.

그림 14와 그림 15는 각각 제작한 기존 구조와 제안된 구조의 주파수 합성기의 주파수 조정 범위와 출력 신호의 크기를 측정한 결과이다. 측정 결과는 기존 구조의 경우 8 dBm의 출력 신호와 2 MHz의 주파수 조정 범위를 가지는 것으로 측정되어 ADS 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과와 일치하였다. 반면, 제안된 구조의 경우 5 dBm의 출력 신호와 38 MHz의 주파수 조정 범위를 나타내어 ADS 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과보다 더욱 우수한 성능을 얻었음을 확인하였다. 결과적으로 제안된 구조의 경우 기존 구조보다 36 MHz 넓어진 주파수 조절 범위를 가지는 것으로 측정되었다.

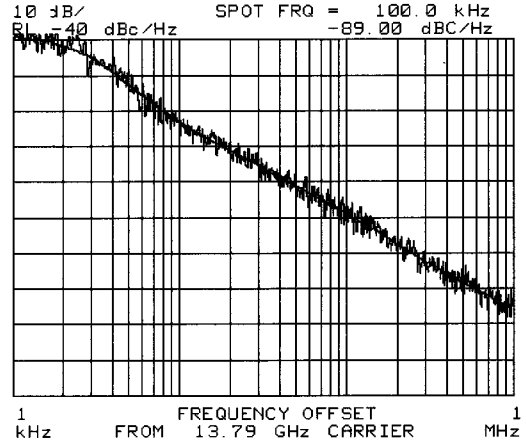


그림 16. 기존 구조의 위상 잡음 측정 결과

Fig. 16. Phase noise result of conventional type synthesizer.

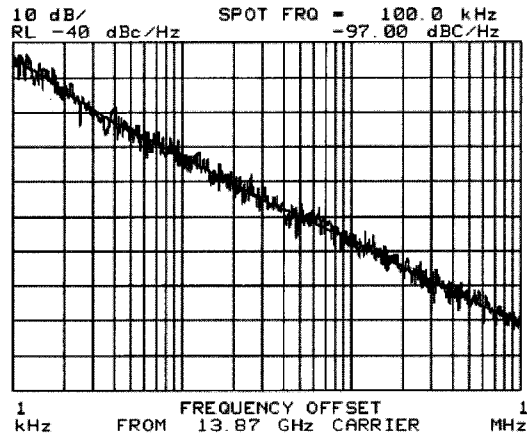


그림 17. 제안된 구조의 위상 잡음 측정 결과

Fig. 17. Phase noise result of proposed type synthesizer.

기존 구조와 제안된 구조의 발진 신호의 위상 잡음 특성은 각각 그림 15와 그림 16에 나타내었다. 두 경우 모두 사용한 loop filter는 3차 수동형 구조를 사용하여 제작하였으며, loop filter의 대역폭은 1 kHz로 설계하였다. 측정된 결과는 기존 구조의 경우 100 kHz offset에서 -89 dBc/Hz를 나타내었으며, 제안된 구조의 경우 -97 dBc/Hz로 기존 구조의 경우보다 8 dB 개선된 위상 잡음 특성을 얻었다.

V. 결 론

본 논문에서는 새로운 바랙터 다이오드 결합 선

로 구조를 제안하고, 기존 구조와 제안된 구조를 사용하여 주파수 합성기를 설계 제작하고 성능을 비교하였다. 원하는 발진 주파수를 얻기 위하여 헤어핀 공진기를 사용하여 제작하였으며, 부성 저항 이론을 이용하여 공진기의 손실을 보상하였다. 제작된 주파수 합성기는 기존 구조의 경우 13.79 GHz의 발진 주파수와 8 dBm의 출력 신호를 가지며, 제안된 구조의 경우 13.86 GHz의 발진 주파수와 5 dBm의 출력 신호를 가졌다. 주파수 고정을 위하여 PLL을 사용하여 0~5 V의 전압을 이용 주파수를 고정하였다. 측정된 주파수 조정 범위는 기존 구조의 경우 2 MHz, 제안된 구조의 경우 38 MHz로 제안된 경우 더 넓은 주파수 조정 범위를 얻었음을 확인하였다. 100 kHz offset에서 측정된 위상 잡음 특성은 기존 구조의 경우 -89 dBc/Hz, 제안된 구조의 경우 97 dBc/Hz로 제안

된 구조에서 8 dB 개선된 위상 잡음 특성을 나타내었다.

참 고 문 헌

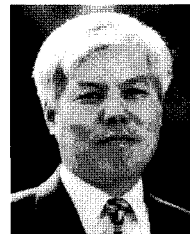
- [1] David M. Pozar, *Microwave Engineering 3th Edition*, Wiley, 2005.
- [3] Y. Cheng, K. Czuba, and G. Kompa, "K-band phase locked hair-pin oscillator", *IEEE International Symposium*, vol. 4, pp. 26-29, May 2002.
- [3] Y. D. Lee, M. H. Lee, and K. H. Lee, "Voltage-controlled hair-pin resonator oscillator with new tuning mechanism", *Electronics Letters*, vol. 36, Issue 17, pp. 1470-1471, Aug. 2000.

최 광 석



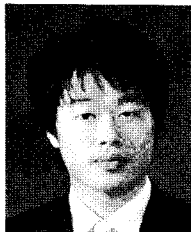
2008년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 2008년 2월~현재: 서강대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로설계, 전압제어 발진기 설계

윤 상 원



1977년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1979년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1984년 5월: 미국 Texas 주립대학교 전기공학과 (공학박사)
 1984년 9월~현재: 서강대학교 전자공학과 교수
 [주 관심분야] 초고주파 및 밀리터리파 회로설계, RF 시스템

원 득 호



2008년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 2008년 2월~현재: 서강대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로설계, 전압제어 발진기 설계