

결합 마이크로스트립 라인을 이용한 전압제어 발진기의 동조전압에 따른 위상잡음 특성 개선

정희원 류근관*, 신동환**, 염인복**, 김성찬*

Improvement of Phase Noise Characteristics for Tuning Voltage in Voltage Controlled Oscillator using Coupled Microstrip Lines

Keun-Kwan Ryu*, Dong-Hwan Shin**, In-Bok Yom**, Sung-Chan Kim* *Regular Members*

요약

전압제어 발진기의 위상잡음 특성을 개선하기 위해 결합 마이크로스트립라인을 이용하여 공진주파수를 동조하는 변형된 구조의 주파수 동조회로를 제안한다. 위상잡음 특성이 개선됨을 실험적으로 입증하기 위해 주파수 동조회로를 제외하면 같은 구조를 갖는 2개의 9.8GHz HEMT 전압제어 발진기를 설계 및 제작하였다. 측정결과 결합 마이크로스트립라인의 주파수 동조회로를 갖는 제안된 구조의 전압제어 발진기가 일반적인 전압제어 발진기에 비해 100KHz 오프셋 지점에서 8dBc/Hz 이상의 위상잡음 특성 개선효과를 나타내었다.

Key Words : Coupled Microstrip Lines, DRO, VCO, Phase Noise, Tuning Voltage

ABSTRACT

Improvement of phase noise characteristics in a different approach of HEMT VCO (Voltage Controlled Oscillator) with coupled microstrip lines to tune the oscillating frequency is investigated. Two HEMT VCOs of 9.8GHz are manufactured in the same configuration except for the frequency tuning circuit in order to empirically demonstrate the phase noise reduction. Experimental result shows that phase noise reduction can be enhanced 8dBc/Hz at 100KHz offset frequency from carrier by frequency tuning circuit with coupled microstrip lines over the conventional VCO.

I. 서론

최근 상업용 무선통신 및 이동통신의 발달에 힘입어 마이크로웨이브 대역의 송수신기에 대한 기술적 발달을 가져왔으며, 그 사용 주파수는 S-band (2-4GHz) 에서 Ku-band(12-14GHz) 및 Ka-band (26.5-40GHz)로 확대되고 있다. 이러한 통신시스템에 사용되는 국부발진기는 전체 시스템의 안정성에 가장 큰 영향을 미치므로 매우 중요한 핵심부품으로 여겨지고 있으며 위상잡음 특성 및 신뢰성이 주요관건이

된다. 뿐만 아니라 전체 시스템의 소형화 및 가격 절감에 국부발진기의 영향이 크므로 이에 대한 연구가 주를 이루어 진행되고 있다^[1].

이러한 국부발진기는 고안정의 기준신호에 전압제어 발진기의 위상을 고정시키는 방식을 사용하고 있다. X-band용 국부발진기의 구조로는 현재까지 상용화된 PLL chip을 사용하여 1~2GHz 대역에서 위상 고정시킨 후에 증폭기, 필터, 체배기 등을 거쳐 X-band의 신호원을 얻는 방법이 있다^[2]. 그러나 이러한 경우 여러 단의 증폭기 및 체배기를 사용함으로써

※ 본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [통해기위성 Ka대역 통신탑재체 우주인증 및 실용화 검증기술 개발]
* 국립한밭대학교 전자공학과(교신저자 : 김성찬, sckim@hanbat.ac.kr), **한국전자통신연구원 위성무선융합연구부 무선RF탑재기술팀
논문번호 : KICS2010-01-019, 접수일자 : 2010년 1월 10일, 최종논문접수일자 : 2010년 3월 24일

능동소자의 수를 증가시켜 신뢰성을 떨어뜨리는 원인이 될 수 있다. 또 다른 방법으로는 X-band의 전압제어 발진기를 구현하고 SPD (Sampling Phase Detector)를 이용하여 전압제어 발진기의 위상을 고정하는 방식이 사용되기도 한다^{3,4)}.

위상고정회로는 이미 범용화 되어 Ku-band에서도 어렵지 않게 구현되고 있으므로 결국 국부발진기의 핵심 요소인 전압제어 발진기를 어떻게 설계하는가에 국부발진기의 성능이 좌우하게 된다. 특히, 기준신호를 이용한 위상고정 발진기의 경우 loop 대역내의 위상잡음은 기준신호의 위상잡음에 의존하지만, loop 대역 밖의 위상잡음은 전압제어 발진기의 위상잡음이 그대로 나타나므로 전압제어 발진기의 위상잡음을 개선하는 것이 통신시스템의 성능개선과 밀접한 관계에 있다.

일반적으로 버랙터 다이오드를 사용하는 전압제어 발진기에서 동조회로에 낮은 제어전압을 인가하면 버랙터 다이오드의 커패시턴스가 증가하여 공진기의 부하 양호도(loaded Q factor)를 감소시켜 위상잡음이 증가하게 된다.

본 논문에서는 전압제어 발진기의 위상잡음을 개선하기 위하여 공진기와 결합하는 마이크로스트립라인을 고임피던스 인버터로 구현하고, 전압제어 발진기에 낮은 제어전압이 인가될 경우 나빠지는 위상잡음 특성을 개선하기 위해 결합 마이크로스트립라인을 갖는 변형된 구조의 주파수 동조회로를 설계하였다.

II. 저 위상잡음 발진기의 설계

설계하고자 하는 발진기의 구조는 직렬 레환형 구조로서 일반적으로 많이 사용되고 있는 유전체 공진 발진기의 구조이다. 이는 외부부하 변동에 따른 발진 주파수의 변화가 적고 제작이 수월하다는 장점이 있다. 발진기의 능동소자로는 fujitsu사의 FHX35LG HEMT를 사용하였으며 HEMT의 소오스(source) 단자에 연결된 저항에 의해 자기 바이어스 되어있다. 기판은 15mil 두께의 TMM3를 사용하였으며 유전율은 3.27이다. 일반적으로 초고주파 발진기에서 많이 사용되는 공진기는 유전체 공진기로서 크기가 작고 온도 변화에 안정적이며 높은 양호도를 갖는다. 본 논문에서는 Murata사의 유전체 공진기 DRD065BC029B를 모델링하여 공진소자로 사용하였다. 이는 유전율이 27.9이고 무부하 양호도(unloaded Q)가 15,000@10GHz의 제원을 갖고 있다.

그림 1은 유전체 공진 발진기에서 공진기와 결합한

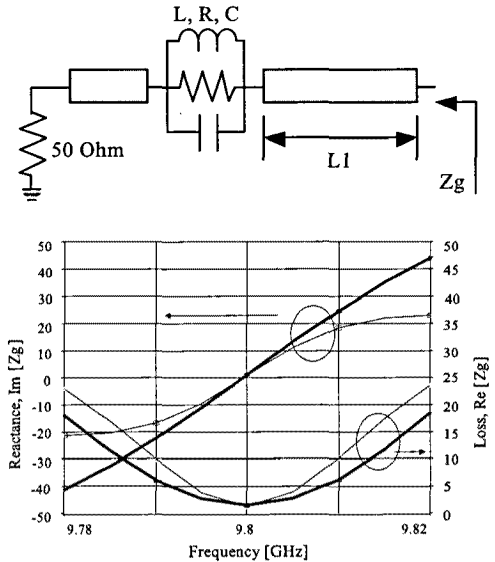


그림 1. 마이크로스트립라인과 결합된 유전체 공진기의 등가회로 및 공진주파수 근처에서의 Zg의 궤적 (Thin lines: 50Ω 마이크로스트립라인 결합, Thick lines: 80Ω 마이크로스트립라인 결합)

Fig. 1. Equivalent circuit of DR coupled with the microstrip line and Zg curves around resonant frequency (Thin lines: the 50Ω microstrip line coupling, Thick lines: the 80Ω microstrip line coupling)

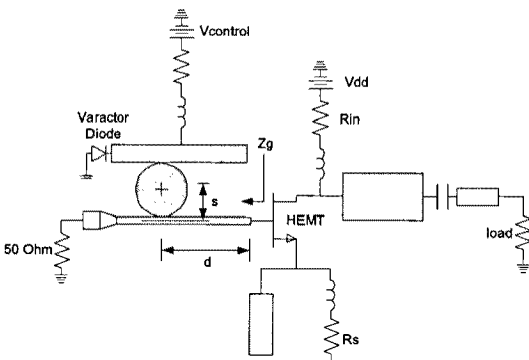
마이크로스트립라인의 등가회로 및 HEMT의 게이트 단자에서 바라본 공진 주파수 근처에서의 임피던스 궤적을 나타내고 있다. 유전체 공진회로 단자의 리액턴스 기울기는 결합된 마이크로스트립라인 L1의 길이에 비례하며 L1이 1/4 파장일 때 최대의 기울기를 갖는다. 그러므로 낮은 위상잡음을 위해서는 1/4 파장의 마이크로스트립라인을 사용하여야 한다. 이는 유전체 공진기와 결합된 마이크로스트립라인의 전기적 길이가 90°이므로 임피던스 인버터로서 동작한다.

임피던스 인버터는 병렬공진회로를 직렬공진회로로 변환시킨다. 그림 1에서의 그래프는 공진기와 결합하는 마이크로스트립라인의 특성임피던스에 따른 Zg의 궤적에 대한 시뮬레이션 결과이다. 특성임피던스 50Ω의 마이크로스트립라인을 이용한 경우보다 특성임피던스 80Ω의 마이크로스트립라인을 이용한 경우가 공진주파수 근처에서 리액턴스 Im(Zg) 성분변화의 기울기가 급격하고 손실, Re(Zg) 성분이 작음을 알 수 있다. 이러한 특성은 공진회로가 능동소자를 포함한 부하와 직렬 연결되었을 때 external Q가 크게 되어 결과적으로 loaded Q를 크게 만들게 되고 loaded Q의 상승은 발진기의 발진주파수 근처의 위상잡음 특성이 개선됨을 의미한다⁶⁾.

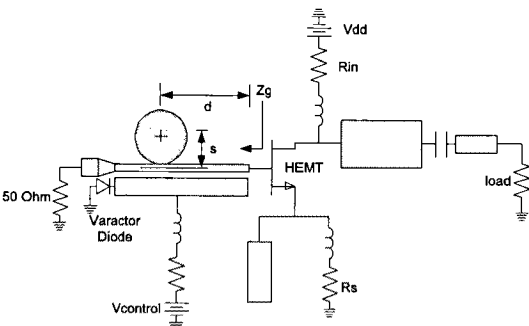
더 높은 특성임피던스를 갖는 임피던스 인버터는 위상잡음 특성을 더욱 개선시키지만 마이크로스트립 라인의 폭을 좁게 만드는 원인이 되며 매우 높은 특성 임피던스를 갖는 임피던스 인버터를 하이브리드로 제작할 경우 공정상의 제약을 받게 된다. 그러나 본 논문에서는 전압제어 발진기의 동조회로에 낮은 제어전압의 인가할 경우 전압제어 유전체 공진 발진기의 공진회로부에 등가적으로 매우 높은 특성임피던스의 임피던스 인버터 특성을 갖는 구조적 메커니즘을 이용하여 전압제어 발진기의 동조회로를 설계하였다.

III. 전압제어 발진기의 주파수 동조회로 설계

그림 2의 (a)와 (b)는 전압제어 발진기의 구조를 보여주고 있다. 그림 2(a)의 전압제어 발진기는 병렬 마이크로스트립라인과 유전체 공진기로 구성된 일반적인 주파수 동조회로를 갖는다. 발진 주파수를 동조하기 위한 버랙터 다이오드와 연결된 마이크로스트립라인은



(a) 일반적인 전압제어 발진기
(a) The conventional VCO



(b) 제안된 전압제어 발진기
(b) The proposed VCO

그림 2. 전압제어 발진기의 구조; (a) 일반적인 전압제어 발진기, (b) 제안된 전압제어 발진기
Fig. 2. VCO configurations; (a) the conventional VCO, (b) the proposed VCO

유전체 공진기와 인접해 있다. 두 마이크로스트립라인과 유전체 공진기는 대역통과필터의 역할을 하며 이 경우 버랙터 다이오드와 연결된 주파수 동조회로는 위상잡음 특성에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 왜냐하면 버랙터 다이오드에 낮은 제어전압을 인가할 경우 다이오드의 커패시턴스가 커서 공진회로의 양호도를 감소시키기 때문이다. 그림 2(b)의 전압제어 발진기는 유전체 공진기가 버랙터 다이오드와 연결된 결합 마이크로스트립라인과 인접해 있다. 이러한 구조는 기존의 일반적인 주파수 동조회로를 갖는 전압제어 발진기와 비교해 위상잡음 특성이 개선된다.

그림 3은 버랙터 다이오드와 연결된 결합 마이크로스트립 라인과 유전체 공진기와의 결합 메커니즘을 보여주고 있다. 발진주파수 동조는 버랙터 다이오드의 가변 커패시턴스에 의해 얻어지며 제어전압이 낮을 경우 버랙터 다이오드는 높은 커패시턴스를 갖게 된다. 이 때 버랙터 다이오드와 연결된 결합 마이크로스트립 라인의 특성임피던스는 이전보다 낮게 된다. 그 이유는 전송선로 라인의 등가회로 상에서 특성임피던스와 커패시턴스는 반비례 관계에 있기 때문이다. 버랙터 다이오드와 연결된 마이크로스트립 라인의 특성임피던스가 낮아지면 결합계수 1:N1은 증가하게 된다. 왜냐하면 결합계수와 특성임피던스 역시 반비례관계에 있기 때문이다. 또한 결합계수 1:N1이 증가하면 유전체 공진기와 인접한 마이크로스트립 라인의 인덕턴스가 증가하고 특성임피던스 역시 증가하게 된다. 따라서 유전체 공진기와 인접한 마이크로스트립 라인의 폭은 물리적으로 동일하지만 특성임피던스는 높아져 위상잡음 개선효과를 기대할 수 있다.

그리고 유전체 공진기와 인접한 마이크로스트립 라

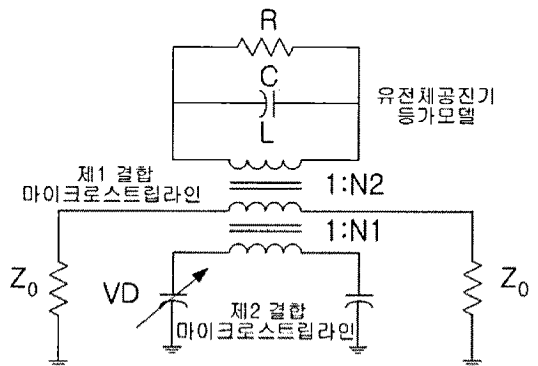


그림 3. 결합 마이크로스트립 라인과 결합된 유전체 공진기의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of a DR coupled with the microstrip lines

인의 특성임피던스 증가는 유전체 공진기와의 결합계 수 1:N2를 낮아지게 만들고 이는 유전체 공진기가 마이크로스트립 라인과의 자기적 결합을 약하게 만들어 부하 양호도의 감소를 제한한다. 이것은 낮은 제어전압을 인가할 때 전압제어 발진기의 위상잡음 및 스푸리어스 특성을 개선될 수 있음을 의미한다. 반면, 높은 제어전압이 인가되는 경우 버랙터 다이오드의 커패시턴스는 작아지고 유전체 공진기의 양호도에는 거의 영향 주지 않게 된다. 그러므로 버랙터 다이오드에 높은 제어전압이 인가될 경우 위상잡음 특성은 일반적인 유전체 공진 발진기의 위상잡음과 거의 비슷한 특성을 나타내게 된다.

그림 4는 50Ω의 결합 마이크로스트립 라인을 이용하고 제어전압에 따라 버랙터 다이오드의 커패시턴스가 0.2pF~2.0pF로 변화할 때 제 1 결합 마이크로스트립 라인의 특성 임피던스 변화에 대한 시뮬레이션 결과이다. 제어전압이 높은 경우, 즉 버랙터 다이오드의 커패시턴스가 0.2pF의 경우 제 1 결합 마이크로스트립 라인의 특성 임피던스는 49.95Ω을 나타내고 있지만 제어전압이 높은 경우, 즉 버랙터 다이오드의 커패시턴스가 2.0pF의 경우 제 1 결합 마이크로스트립 라인의 특성 임피던스는 56.82Ω을 나타내고 있다. 이는 유전체 공진기와 인접한 마이크로스트립 라인의 폭은 물리적으로 동일하지만 특성임피던스는 높아져 위상잡음 개선효과를 기대할 수 있음을 의미한다.

그림 5는 본 논문에서 제안한 그림 2(b)의 주파수 동조회로를 이용한 전압제어 발진기와 그림2(a)의 일반적인 전압제어 발진기를 각각 설계하고 버랙터 다이오드의 제어전압을 -1V~-11V로 변화할 때 각 전압

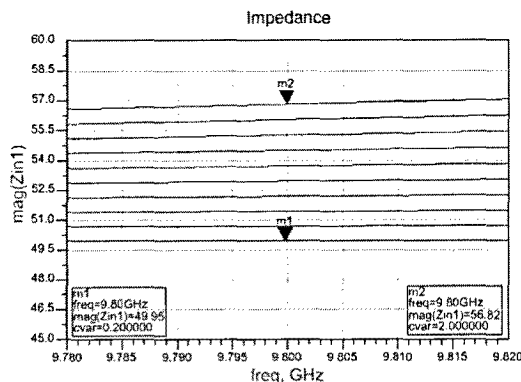
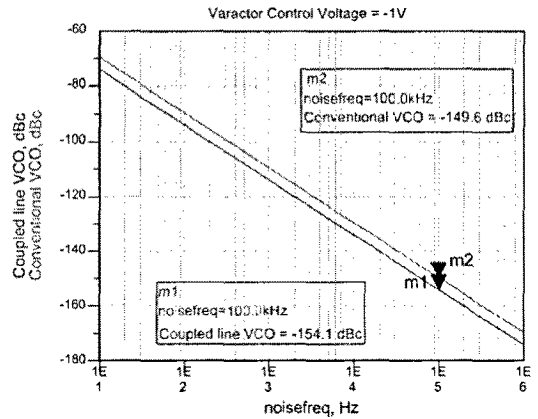
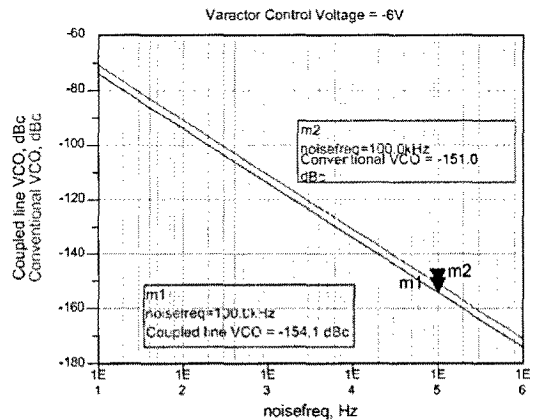


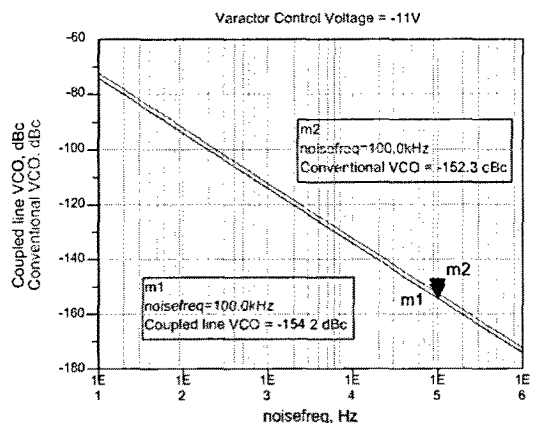
그림 4. 버랙터 다이오드의 커패시턴스 변화(0.2~2.0pF)에 따른 제 1 결합 마이크로스트립 라인의 특성임피던스 변화
Fig. 4. Characteristic impedance variation of the first coupled microstrip line according to the capacitance (0.2~2.0pF) of varactor diode



(a) 제어전압=-1V
(a) VD=-1V



(b) 제어전압=-6V
(b) VD=-6V



(c) 제어전압=-11V
(c) VD=-11V

그림 5. 제안한 전압제어 발진기와 일반적인 전압제어 발진기의 제어전압에 따른 위상잡음 특성 시뮬레이션; (a) 제어전압=-1V, (b) 제어전압=-6V, (c) 제어전압=-11V
Fig. 5. Simulation results of the phase noise characteristics between the proposed VCO and the conventional VCO; (a) VD=-1V, (b) VD=-6V, and (c) VD=-11V.

제어 발진기의 위상잡음 변화 경향을 시뮬레이션한 결과이다. 각각의 그림에서 m1의 마커는 결합 마이크로스트립 라인을 이용한 전압제어 발진기의 위상잡음을 나타낸 것으로 제어전압의 변화에 따른 발진기의 위상잡음 특성 변화가 거의 없음을 나타내고 있다. 반면에 m2의 마커는 일반적인 전압제어 발진기의 위상잡음을 나타낸 것으로 제어전압이 낮을수록 발진기의 위상잡음 특성이 나빠지고 있음을 보여주고 있다.

IV. 측정 및 고찰

설계 및 제작된 2개의 전압제어 발진기는 튜닝나사의 미세한 조정으로 9.8GHz에서 발진하도록 하였다. 또한, 유전체 공진기의 위치는 HEMT의 게이트 단자에서 1/4 파장 떨어진 지점에 고정하였다. 발진기의 위상잡음 및 출력 특성은 Agilent E5500 위상잡음 측정기와 Agilent 8564E 스펙트럼 분석기를 이용하여 각각 측정하였다.

제안한 전압제어 발진기의 위상잡음 측정결과, 동조회로의 버랙터 다이오드에 -1V의 제어전압을 인가한 경우 커리어로부터 100KHz 떨어진 지점에서 -116dBc/Hz의 특성을 나타내었다. 이는 그림 6(a)에서 나타난 바와 같이 기존의 전압제어 발진기의 위상잡음에 비해 8dBc/Hz 이상의 개선효과를 나타내고 있다. 그림 6(b)는 제어전압이 -6V를 인가한 경우로 결합 마이크로스트립라인을 갖는 전압제어 유전체 공진 발진기의 위상잡음 특성이 5dBc/Hz 이상 향상되었음을 보여주고 있다. 또한, 동조회로에 제어전압을 -11V를 인가한 경우에는 버랙터 다이오드의 매우 낮은 커패시턴스에 의해 두 개의 전압제어 발진기는 그림 6(c)에서 보는 바와 같이 비슷한 위상잡음 특성을 나타내고 있으며 커리어로부터 100KHz 떨어진 지점

에서 -119dBc/Hz의 우수한 특성을 나타내고 있다. 제안된 전압제어 발진기의 위상잡음 특성은 제어전압이 -1V~-11V의 변화에 대해 $\pm 1.5\text{dBc/Hz}$ @100KHz의 위상잡음 변동이 측정되었으며 일반적인 발진기의 경우 $\pm 5.0\text{dBc/Hz}$ @100KHz의 위상잡음 변동이 측정되었다.

두 개의 전압제어 발진기는 모두 약 6.0dBm의 출력전력을 나타내었으며 주파수 동조 대역폭은 6.8MHz와 6.3MHz로 각각 측정되었다. 두 개의 전압제어 발진기의 전기적 특성을 표 1에서 비교하였다.

그림 7에 제작된 전압제어 발진기의 사진을 나타내었다.

표 1. 제안한 전압제어 발진기의 전기적 특성
Table 1. Performance comparison between the conventional VCO and the proposed VCO

Parameters	Conventional VCO	This Work
Oscillation Frequency	9.8 GHz	9.8 GHz
Output Power	5.83 dBm	6.0 dBm
DC current	17 mA	17 mA
Tuning Range [VD=-1V~11V]	6.8 MHz	6.3 MHz
Phase Noise @ 100KHz [VD=-1V]	-108 dBc/Hz	-116 dBc/Hz
@ 100KHz [VD=-6V]	-112 dBc/Hz	-118 dBc/Hz
@ 100KHz [VD=-11V]	-118 dBc/Hz	-119 dBc/Hz
Phase Noise Variation	± 5.0 dBc/Hz	± 1.5 dBc/Hz

V. 결론

본 논문에서는 결합 마이크로스트립 라인을 이용하여 초고주파용 전압제어 발진기의 동조전압에 따른

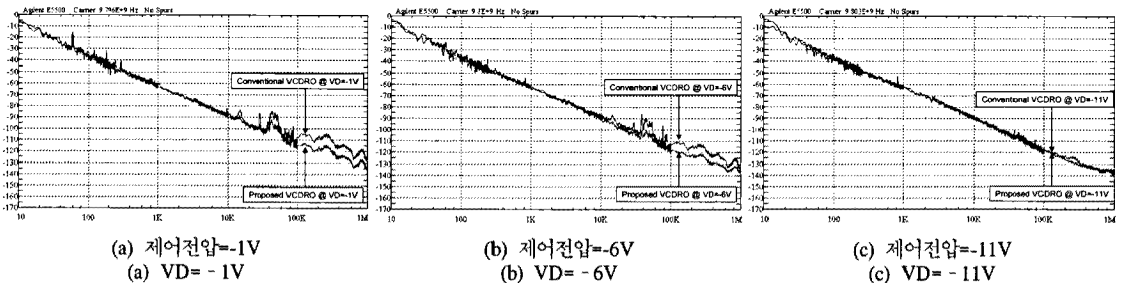


그림 6. 제안한 전압제어 발진기와 일반적인 전압제어 발진기의 제어전압에 따른 위상잡음 특성 비교; (a) 제어전압이 -1V일 때, (b) 제어전압이 -6V일 때, (c) 제어전압이 -11V일 때
Fig. 6. Measured results of the phase noise characteristics between the proposed VCO and a conventional VCO; (a) VD = -1V, (b) VD = -6V, and (C) VD = -11V.

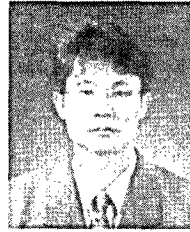
위상잡음 특성의 개선에 대해 살펴보았다. 주파수 동조회로에 낮은 제어전압을 인가할 경우 제안된 전압 제어 발진기는 일반적인 전압제어 발진기에 비해 커리어로부터 100KHz 떨어진 지점에서 8dBc/Hz 이상의 위상잡음 감소효과를 얻었다. 본 논문의 전압제어 발진기의 설계 및 제작 기법은 Ka-band 위성 중계기 등의 space용 국부발진기 및 무선 LAN, 이동통신 시스템 등의 다양한 상업용 국부발진기에 적용시킬 수 있다. 또한 HEMT에 비해 플리커 잡음 특성이 우수한 MESFET 및 BJT 등의 능동소자를 사용할 경우 보다 향상된 위상잡음 특성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] T.A. Bos, et al., "A Low Cost 16.2GHz Phase Locked Oscillator for Wireless LAN," in *Proc. IEEE MTT-S Digest*, pp.1395-1398, June 1997.
- [2] N.R. Mysoor, "An electronically tuned, stable 8415MHz dielectric resonator FET oscillator for space applications," in *Proc. Aerospace Applications Conference Digest*, pp.147-156, 1990.
- [3] J. Perez, et al., "A Comparison of the Performance of Three Different Phase Locked Phase locked Oscillator Fabricated at 21 GHz," in *Proc. IEEE MTT-S Digest*, pp.305-308, June 1992.
- [4] B. Hitch, et al., "Phase locked DRO/CRO for space use," in *Proc. IEEE Frequency Control International Symposium*, pp.1015-1023, 1997.
- [5] E.A. Craig, et al., "Stable X-band local oscillator," *Applied Microwave and Wireless*, pp.65-76, 1995.
- [6] K.K. Ryu, et al., "Development of EQM (Engineering Qualified Model) Local Oscillator for Ka-band Satellite Transponder," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol.40, No.3, pp.198-200, February 2004.

류 근 관 (Keun-Kwan Ryu)

정회원



1992년 광운대학교 전자통신공학과 공학사
 1994년 광운대학교 전자통신공학과 공학석사
 2000년 광운대학교 전자통신공학과 공학박사
 2000년 3월~2003년 1월 한국

전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원
 2003년~현재 국립한밭대학교 전자공학과 교수
 <관심분야> 초고주파용 능동/수동 회로 설계

신 동 환 (Dong-Hwan Shin)

정회원



1996년 충남대학교 전자공학과 공학사
 1999년 충남대학교 전자공학과 공학석사
 1999년~현재 한국전자통신연구원 무선RF탑재기술팀
 <관심분야> 초고주파용 능동회로, 위성통신시스템

염 인 복 (In-Bok Yom)

정회원

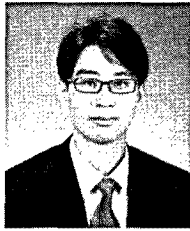


1990년 한양대학교 전자공학과 공학사
 2004년 충남대학교 전자공학과 공학석사
 2007년 충남대학교 전자공학과 공학박사
 1990년~현재 한국전자통신연구원 무선RF탑재기술팀

<관심분야> 마이크로파 능동/수동 회로, 위성통신시스템

김 성 찬 (Sung-Chan Kim)

정회원



1999년 동국대학교 전자공학과 공학사
 2001년 동국대학교 전자공학과 공학석사
 2006년 동국대학교 전자공학과 공학박사
 2006년~2007년 동국대학교

밀리미터파 신기술 연구센터 박사후연구원
 2007년~현재 국립한밭대학교 전자공학과 교수
 <관심분야> 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제작