

초소형 / 광대역 VCO 개발

°변상기*, 강용철*, 황치전*, 안태준**

*전자부품연구원 통신부품연구센터, **건국대학교 전자·정보통신 공학과
경기도 평택시 진위면 마산리 455-6
byeonsa@nuri.keti.re.kr

The Development of Ultra-Miniature / Wideband VCO

°Sang-Gi Byeon*, Young-Cheol Kang*, Chi-Jeon Hwang*, Tae-Joon Ahn**

*Telecommunication Components Research Center, Korea Electronics Technology Institute
**Dept. of Electronics Information & Communication Eng. of Konkuk University

Abstract

The ultra-miniature and low phase noise Colpitts VCO of 0.06cc in size has been developed using the high Q resonator and phase compensation technique. This type is one transistor VCO without a buffer. To design and simulate the VCO accurately, nonlinear model parameters of a bipolar transistor are extracted using the measured I-V data and S parameters based on the Gummel-Poon model. Design and simulation have been done by Serenade 7.5 design tool using the extracted nonlinear model parameters. The wideband VCO has been designed using two varactor diodes and open loop gain compensation technique to improve the operating frequency range. The ultra-miniature VCO has shown the phase noise of -91dBc/Hz at 10kHz offset and output power of -3dBm. The wideband VCO has shown the tuning frequency bandwidth of 150MHz, phase noise of -95dBc/Hz at 10kHz offset and output power of 5dBm.

1. 서 론

VCO는 모든 이동통신기기에 소요되는 RF 핵심부품으로서 90년대 이전에는 공진소자로서 유전체 공진기를 사용하였으나, 소형화를 목적으로 마이크로스트립 선로를 사용한 VCO가 사용되고 있다. 셀룰라폰 등 이동통신 단말기의 소형화를 위하여 VCO는 다층 PCB구조를 채택하여 내부에 마이크로스트립 공진소자를 내장한 Colpitts 방식 VCO가 셀룰라폰 및 PCS 단말기에 사용되고 있다. 이동통신기기용으로 현재 사용되고 있는 VCO는 바이폴라 트랜지스터를 발진증폭기로 사용하고 출력 증대 및 출력부하 Isolation을 위한 완충증폭기(Buffer Amplifier)를 갖는 2단 BJT 증폭기 구조로 단말기용 부피는 0.1cc급이었으나 향후 0.08cc급이 2000년에 보편화 될 것이며 그 이후에는 0.05cc급 및 0.03cc이하 제품이 등장할 것으로 전망된다. 본 논문은 차세대 이동통신 단말기용 초소형 VCO 및 이동통신 기지국용 광대역 VCO 개발결과를 기술하였다. 디지털 이동통신기기에 적합한 초소형 저위상잡

음 VCO를 개발하기 위하여 본 논문에서는 공진회로 Q를 증대하고 궤환경로에 위상 보정기법을 적용하였으며 목표규격을 각각 초소형VCO에 대해서는 부피 0.06cc이하로, 발진 주파수대역 1.6~1.66GHz, 출력 -3dBm, 위상잡음 -91dBc/Hz(10kHz offset)로 설정하였고, 광대역 VCO에 대해서는 발진주파수 1.7~1.8GHz(발진주파수 대역폭 100MHz), 출력 5dBm으로 설정하였다.

II. 설계 및 제작

1. 초소형 VCO

본 논문의 초소형 VCO는 완충증폭기가 없는 One-Transistor 구조이다. 설계핵심은 VCO체적의 소형화와 함께 저전압 VCO로서 제어특성이 우수하고 위상잡음을 낮추기 위하여 다양한 설계 파라미터 수정작업을 수행하였다. 초소형 VCO를 개발함에 있어서 다양한 VCO구조의 분석이 수행되었는데 특히, 공진부의 최적화 설계를 하였고 부성저항 회로부를 요구되는 성능을 갖도록 궤환신호의 위상보정기법 적용과 궤환회로의 최적화에 주력하였다. 초소형 VCO공진부는 공진소자로서 종래에는 마이크로스트립 선로 인덕터를 사용하였으나 본 논문에서는 Air Coil 인덕터를 적용하여 공진부 Q를 증가시켜 위상잡음 특성을 개선하였다. Air Coil 인덕터를 사용하여 Q를 증대하고 인덕터-바랙터 다이오드를 종래의 병렬구조에서 직렬구조로 대체하여 완충 증폭기를 배제한 One-Transistor 구조의 VCO를 구현할 수 있었다.

2. 광대역 VCO

일반적으로 광대역 발진주파수 제어특성을 갖는 VCO는 광대역 주파수 변화에 대한 일정한 궤환특성을 갖는 부성저항 특성의 궤환증폭기 구현이 요구된다. 즉 발진주파수 스펙트럼이 광대역 범위에서 변하는 광대역 VCO는 주파수 변화에 대한 출력전류, 고주파 출력이 비교적 일정한 특성이 요구된다. 일반적인 Colpitts VCO는 궤환신호 비율이 트랜지스

터의 궤환경로에 있는 커패시터에 의해 결정되며 이러한 궤환경로에 의한 개방루프 이득은 주파수 변화에 민감하다. 즉, 제어 대역폭 범위에서 고대역 부근의 개방루프 이득이 저대역 부근보다 크게 되므로 이로 인한 VCO의 고주파 출력 변화로 인하여 제어 대역폭이 제한되게 된다. 이러한 문제점을 극복하는 방안으로는 저대역의 개방루프 이득을 증가시키고 고대역 개방루프 이득을 감소시켜 비교적 평탄한 개방루프 이득을 갖도록 보정하는 것이다. 이러한 루프이득 보정기법으로는 커패시터로 구성되는 궤환경로 회로를 LC 직렬회로로 대체하는 것이다. 이렇게 되면 일반적인 Colpitts VCO에 비하여 저대역에서의 궤환신호 비율은 증가하고 고대역에서는 궤환신호 비율이 감소하여 비교적 평탄한 궤환신호 비율을 갖는 VCO로 동작하게 된다. 이 경우에 보정회로는 요구되는 주파수 대역에서 만족할 만한 평탄한 이득특성이 되도록 LC 직렬회로의 최적설계가 요구된다. 부성저항 회로부에 최적설계를 한 다음에는 광대역 VCO에 적합한 공진회로부의 설계가 수행되어야 한다. 공진회로부 설계는 먼저 공진기 Q_L 을 결정해야 하는데 광대역 VCO는 Q_L 이 최소가 되도록 해야 하나, Q_L 이 작으면 위상잡음이 증가하므로 적절한 선택이 요구되는데 일반적으로 Q_L 이 낮아야 한다. 그러나 광대역 VCO는 Q_L 이 낮아야 한다는 이론에는 분명한 설명이 없으며, 이에 대한 반론도 제시되고 있다. 단지 Q_L 증가로 인한 바랙터 다이오드 단의 과도한 RF 전압 상승이 대역폭을 제한하게 된다. 즉 광대역 VCO에서는 공진기의 RF 전압이 바랙터 다이오드에 대부분 나타나며 협대역 VCO에서는 RF 전압이 바랙터 다이오드와 커플링 커패시터에 분할된다. 그러므로 비교적 제어용량이 큰 바랙터 다이오드를 광대역 VCO에 사용해야 하나 일반적으로 제어용량이 큰 바랙터 다이오드는 용량변화가 비선형이 되어 신중한 선택이 요구된다. 본 연구에서는 다양한 공진회로부의 최적 설계 및 제작을 수행하였는데 특히 공진회로부의 공진특성이 대칭적이 되도록 하고 바랙터 다이오드 2개를 병렬로 사용하여 최종 광대역 VCO의 공진회로부를 확정하였다. 부성저항 회로부에 개방루프이득 보정기법을 적용하고 공진회로부가 공진특성이 대칭적이 되도록 하면서 2개의 바랙터 다이오드를 병렬로 사용한 구조를 갖는 공진회로부를 결합한 광대역 VCO는 실제로 종래의 VCO와 비교하여 제어 대역폭이 2배 이상 증가하였다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 0.06 μ m급 One-Transistor 구조에 맞는 VCO 시뮬레이션만 취급하였고 광대역 VCO는 회로도만 나타내었다. 동작주파수는 약 1.6 GHz ~ 1.7 GHz대역을 목표로 설계하였다. 사용된 Tool로서는 Ansoft사의 Serenade 7.5를 사용하였다. 본 논문에서는 기존의 Tool에서 제공된 트랜지스터의 라이브러리를 이용하지 않고, Gummel-Poon 모델에 기반을 두고 추출한 파라미터 값을 이용해서 트랜지스터를 Nonlinear 모델링을 하여 사용하였다. 입력 전압을 3.6V로 주고 0.5V씩 가변시켜서 특성 그래프를 얻을 수 있었다. 특성 그래프를 검토해 보면 목표규격인 $-3\pm 3\text{dBm}$ 이내의 출력 전

력을 얻을 수 있었고 제어감도 역시 가변전압의 1.6 GHz ~ 1.7 GHz대역 이내에서 약 20MHz/V 정도 움직이는 특성 그래프를 얻을 수 있었다. 위상잡음의 시뮬레이션 결과는 목표로 했던 offset 주파수 10kHz에서 -90dBc/Hz 이하의 값을 얻지 못했다. 기본적인 회로도에서는 실제적으로 제작한 공진단회로 단의 용량 값을 제대로 입력하지 못한 결과인 듯 하다. 그림 2 ~ 4는 시뮬레이션에 의한 VCO의 특성 그래프이다.

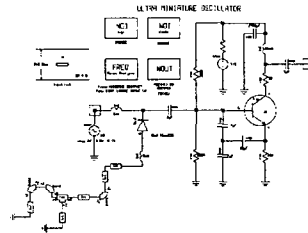


그림 1. 0.06 μ m급 One-Transistor VCO 시뮬레이션 Schematic

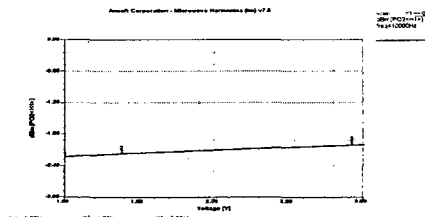


그림 2. 0.06 μ m급 One-Transistor VCO RF 출력특성

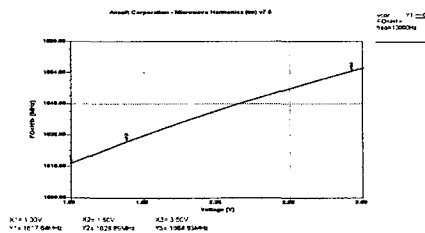


그림 3. 0.06 μ m급 One-Transistor VCO 제어전압 감도

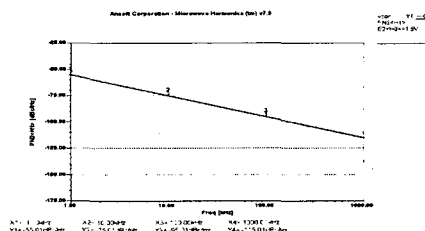


그림 4. 0.06 μ m급 One-Transistor VCO 위상잡음 특성

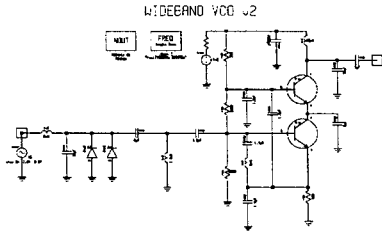


그림 5. 광대역 VCO 시뮬레이션 Schematic

4. VCO 제작 및 측정

가. 초소형 VCO 제작

초소형 VCO는 다층형의 0.06cc급 One Transistor 구조로 제작하였다. 0.06cc급 VCO는 다층 PCB 구조로 제작하였으며, 소형화에 필수적으로 사용되는 Microstrip Inductor 공진기 구조를 PCB 내층에 구현하였고 공진회로 Q를 증대시키기 위하여 Air Coil 인덕터를 Microstrip Inductor에 직렬연결되도록 전면1층에 구현하였다. 본 연구의 VCO는 4층 구조로 되어 있으며 전면 1층에는 부품 취부용 도체부로 구성되어 있으며, 2층은 1층에 대한 접지면으로 구성되었다. 3층은 내층 도체부로서 공진소자로 사용되는 선로 폭이 비교적 큰 Microstrip Line Inductor와 전원 단에 발진 성분이 유입되는 것을 방지하기 위한 RF Choke용 Inductor를 배치하였고, 4층은 2층과의 공통접지 및 표면실장용 단자를 형성하였다.



그림 6. 0.06cc급 VCO

VCO의 초소형화를 위해 1005 칩 크기의 부품을 사용하였고 특성의 균일화 및 조립작업의 용이화를 위하여 0.12mm 두께의 Metal Mask를 제작하였고, Reflow Soldering 설비를 이용하여 조립하였다. 개발된 초소형 VCO는 0.8t, 4층 FR-4, PCB를 사용하였다.

나. 광대역 VCO 제작

광대역 VCO는 단면 PCB 형태로 제작하였다. 전체회로 구성은 Oscillator부와 Buffer 증폭기로 동작하는 구조의 Cascade 증폭기 형태(직렬공진형 증폭기)로서, 고출력 및 부하 임피던스에 따른 발진 주파수 및 특성변화를 최소화하기 위해 종래의 Buffer 증폭기 부차형태로 구성하였다. 광대역 발진제어 특성을 달성하기 위하여, Tuning 감도가 큰 바랙터 다이오드 선정 및 2개를 병렬로 접속한 것, 주파수의 Sweep에 따른 출력 Power Level의 균일화를 위해 출력부에 가변 LC 탱크회로를 채택한 것 등의 Topology를 적용하여 제작해 보았고, 그 중에서 바랙터 다이오드 2개를 병렬로 접속한

경우의 특성이 타 경우의 것보다 양호하여 이것을 제작, 측정하였다.

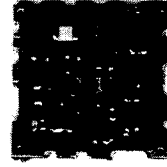


그림 7. 광대역 VCO

5. 측정결과 및 고찰

VCO의 전기적 특성 측정을 위해서 측정대역이 10MHz~3GHz인 VCO/PLL Signal Analyzer (HP4352B)와 Signal Generator (HP8648C)로 시스템 구성을 이루어서 측정을 하였다. 그림 8~13에 측정결과를 각각 나타내었다.

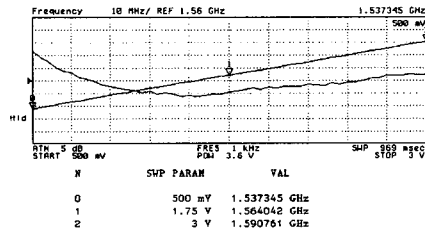


그림 8. 0.06cc급 VCO 주파수 제어감도

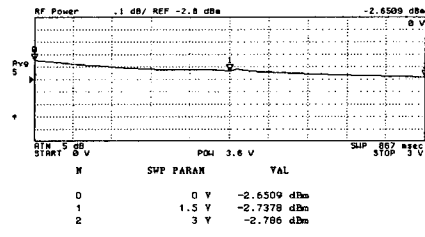


그림 9. 0.06cc급 VCO RF 출력특성

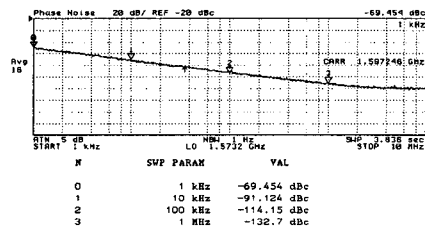


그림 10. 0.06cc급 VCO Phase Noise

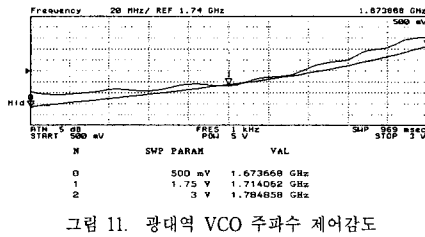


그림 11. 광대역 VCO 주파수 제어감도

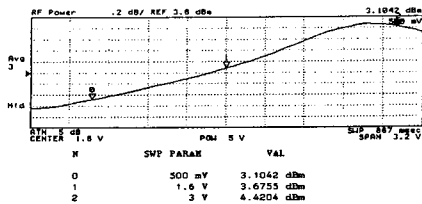


그림 12. 광대역 VCO RF 출력특성

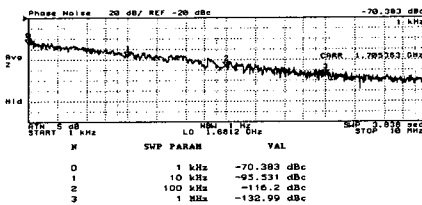


그림 13. 광대역 VCO Phase Noise

0.06cc(5×5.8×2.0mm)급 초소형 VCO와 광대역 VCO의 개발목표 규격과 측정결과를 표 1과 2에 요약하였다. 0.06cc급 초소형 VCO 제작은 0.058cc(5×5.8×2.0mm)로서 목표에 부합하였다. 초기에는 발진용 Inductor를 Air Coil로 높은 Q를 형성하여 Phase Noise가 1.6GHz대역에서 -95dBc/Hz(@10kHz Offset)로 상당히 양호하였으나, 초소형화 과정에서 발진용 Inductor의 일부를 내층에 마이크로 스트립으로 형성한 것이 전체 공진회로의 Q를 저하시켜 Phase Noise(-91dBc/Hz)를 다소 저하시킨 원인으로 판단된다. Tuning 전압의 변화에 따른 주파수 제어감도가 좋아 비교적 양호한 선형성을 나타내고 있고, 출력 Power의 변화도 적은 편으로 관찰되었다. 광대역 VCO의 경우는 체적이 0.55cc(12.7×12.7×3.4mm)로서 광대역 특성을 유지시키기 위해 공진부에 바랙터 다이오드를 2개 병렬로 접속함에 따라 45MHz/V의 정도의 주파수 제어감도를 나타내고 있다. 광대역 VCO의 출력이 목표규격에 미흡한 이유는 바랙터 다이오드에 포함된 비선형성이 합산에 작용하여 선형성을 다소 저하시킨 것과 Tuning 전압의 Sweep에 따른 공진기 내의 임피던스의 변화의 폭이 바랙터 다이오드 1개를 사용한 경우보다 커서 발진폭상의 변화에 따른 것으로 보이거나 Phase Noise는 -95.5dBc/Hz로서 규격을 만족하고 있다.

구분	단위	목표규격	측정치
Frequency Range	GHz	1.6GHz대역	1.54 ~ 1.692
Control Voltage	Vdc	0.5 ~ 3.2	0.5 ~ 3.2
Phase Noise(@10kHz Offset)	dBc/Hz	-90 이하	-91
Output Power	dBm	-3±3	-2.7

표 1. 초소형 VCO 목표규격 및 측정결과

구분	단위	목표규격	측정치
DC Current dissipation(@5Vdc)	mA	15mA 이하	14.5mA
Frequency Range	GHz	1.7~1.8GHz대역	1.67 ~ 1.84GHz
Control Voltage	Vdc	0.5 ~ 4.5	0.5 ~ 4.5
Pushing Figure(@Vt=Vcc/2)	MHz/V	5	4
Pulling Figure(@VSWR=1.7:1)	kHz	25	22
Phase Noise(@10kHz Offset)	dBc/Hz	-95 이하	-95.5
Output Power	dBm	5±2	3.6
Spurious Level	dBc	-12 이하	-18

표 2. 광대역 VCO 목표규격 및 측정결과

III. 결 론

본 논문에서는 차세대 이동통신 단말기용 초소형 VCO 및 이동통신 기지국용 광대역 VCO를 개발하였다. 디지털 이동통신기에 적합한 초소형 저위상잡음 VCO를 개발하기 위하여 공진회로 Q를 증대하고 궤환경로에 위상보정기법을 적용하였다. 이와 같은 방식에 의하여 종래의 VCO보다 특성이 우수한 0.06cc이하급의 초소형 다중 VCO를 개발하였다. 개발된 초소형VCO는 0.8t 4층 FR-4 PCB를 사용하여 상단(1층)층에 SMD부품 회로를 구성하였고, 3층(내층)에 마이크로 스트립선로 RF choke 인덕터 및 공진소자 인덕터를 배치하였다. 공진회로 Q를 증대하고 이로 인한 저위상잡음 VCO 구현을 위하여 Air Coil 인덕터를 사용하였으며 공진회로부의 공진특성 커브가 대칭이 되도록 공진회로부를 설계하였다. 이동통신 기지국용 광대역 VCO는 초소형 VCO에서와 같이 Q를 증대시키는 기법을 적용하였으며 광대역 선형 VCO구현을 위하여 공진회로부의 최적화와 함께 안정된 고출력 발진특성을 얻기 위하여 바이어스 회로를 최적화하였다. VCO의 광대역 선형적 발진특성을 달성하기 위하여 본 논문에서는 제어부에 바랙터 다이오드 2개를 병렬로 구성하여 리드선 인덕터는 작게하고 제어범위는 2배 이상 확장하는 기법을 적용하였다. 광대역 VCO는 Buffer Amp가 포함된 2단 트랜지스터 증폭기 구조로서 0.8t, FR-4 양면 PCB를 사용하여 제작하였다. 개발된 초소형 VCO는 부피 0.06cc이하로서 발진주파수대역 1.54 ~ 1.692GHz, 출력 -3.6dBm, 위상잡음 -91dBc/Hz(10kHz offset)로서 목표규격을 달성하였다. 또한 광대역 VCO는 발진주파수 1.7~1.85GHz(발진주파수 대역폭 150MHz), 출력 5dBm, 위상잡음 -96dBc/Hz(10kHz offset), Spurious Level -15dBc로서 목표규격을 달성하였다. 본 논문을 통하여 개발된 VCO의 초소형화, 저위상잡음화 및 광대역화 기술은 차세대 이동통신기의 고주파 부품 국산화에 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

1. Y. Kao and H. Wang, "Method predicts the performance of wideband VCOs," Microwave & RF, Aug. 1996, pp. 81~86.
2. J. L. Martin and F. J. O. Gonzalez, "Accurate linear oscillator analysis and design," Microwave J., June 1996, pp. 22~37.
3. M. Duplaix, "Design microwave oscillator with stability circles," MMICAD Application Note 1993, pp. 125~127.
4. Ulrich Rhode, "Oscillator Design for Lowest Phase Noise," Microwave Engineering Europe May 1994 pp. 31~40.
5. Walid EL-Kamali et al., "New Design Approach for Wide-Band FET Voltage Control Oscillators," IEEE Trans.on Microwave Theory and Tech., vol-34 No.10 Oct. 1986, pp. 1059~1063.