

근거리 무선통신용 5.5 GHz 대역 VCO 설계 및 제작

Design and Fabrication of 5.5 GHz Band VCO for DSRC

한 상 철* · 오 승 엽**

Sang-Cheol Han* · Seung-Hyeub Oh**

요 약

근거리무선통신용 RF 모듈을 구성하는 핵심 부품인 5.5 GHz 대역의 직렬 케환형 전압 제어 발진기를 설계 및 제작하였다. MESFET의 소신호 산란계수와 발진기의 케환부, 공진부의 Z-파라미터를 이용하여 최적 부하임피던스가 도출될 때의 VCO 설계 파라미터들을 추출하였다. 최적 부하임피던스가 도출될 때 케환부와 공진부의 리액턴스를 구하는 프로그램은 MATLAB을 이용하여 작성하였으며 추출된 파라미터 값으로 ADS 시뮬레이터를 이용하여 비선형 대신호 해석을 하였다. 설계된 파라미터를 이용하여 구현된 전압 제어 발진기의 특성을 측정된 결과, 바랙터 다이오드에 인가되는 전압의 변화(0~5 V)에 따른 주파수 변화는 5.42 GHz~5.518 GHz 이었고, 이때의 출력 레벨은 6.5 dBm 이었다. 5.51 GHz 발진시 2차 고조파 억압은 -21.5 dBc 이었으며 위상 잡음 특성은 10 kHz 오프셋에서 -83.81 dBc/Hz를 얻었다. 제작된 VCO는 DSRC용 뿐만 아니라 5.8 GHz 대역의 다른 시스템에도 이용될 수 있다.

Abstract

This paper shows the design, fabrication and performance analysis of VCO which plays a major role in 5.8 GHz RF module for ITS. The design specifications of the VCO are determined on the basis of 5.8 GHz RF modul performance requirements. The design parameters are optimized through ADS simulation tool. The operating characteristic and performance analysis of the implemented VCO based on the design parameters are accomplished. The frequency variations according to the voltage change(0~5 V) of varactor diode are from 5.42 GHz to 5.518 GHz and the power level is 6.5 dBm. The second harmonic suppression are -21.5 dBc at 5.51 GHz and the phase noise characteristics are -83.81 dBc at 10 kHz offset frequency. The implemented VCO is available to not only DSRC and also, 5.8 GHz other systems.

I. 서 론

1980년대 초부터 유럽과 일본 등에서 연구가 시작된 지능형교통시스템(Intelligent Transportation System, ITS)은 도로 용량의 한계에 의한 교통 혼잡, 물류 비용 증가 등의 심각한 문제들을 해결하는 대

안으로 연구되기 시작하였다. 우리 나라에서도 90년대부터 연구 개발이 시작되어 2010년까지 5개 분야에서 단계적인 서비스를 하기로 계획되어 있다^{[1],[2]}. 그러나 5.8 GHz 대역의 ITS용 RF 핵심 부품들은 아직 상용화되어 있지 않아서 부품 개발의 필요성이 대두되고 있다.

「본 논문은 정보통신연구진흥원의 2000대학 기초연구지원사업 연구비 지원에 의해 수행된 연구임.」

*상지영서대학 전자계산과(Dept. of Computer Science, Sangjiyoungseo College)

**충남대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Chungnam National Univ.)

· 논문 번호 : 20001211-143

· 수정완료일자 : 2001년 2월 6일

본 논문에서는 ITS용 RF 모듈 구성 부품 중 주파수 합성기를 구성하는 5.5 GHz 대역의 VCO (Voltage controled oscillator)를 설계·제작 하였다. ITS 용 주파수는 5.725 GHz~5.875 GHz의 ISM 밴드에서 국가별로 정하여 사용하고 있으며, 우리 나라는 도로요금자동징수시스템(Electronic Toll Collection System, ETCS)용 주파수로 5.795 GHz~5.815 GHz가 할당되어 있다. 차량 단말기나 노변 기지국 장치에 사용될 능동형 근거리무선통신(Dedicated Short Range Communication)용 RF 모듈(송수신 시스템)의 블록도는 그림 1과 같다.

그림 1의 송수신 시스템은 국부 주파수(LO)로 5.45 GHz~5.51 GHz, 중간 주파수(IF)로 315 MHz를 사용하여, 송수신 주파수 범위는 5.765 GHz~5.825 GHz가 된다. 사용 주파수는 주파수 합성기의 분주 데이터에 의해 선택되며 변조 방식은 ASK (Amplitude Shift Keying)이다.

RF 송수신 시스템에서 전압 제어 발진기의 위상 잡음 및 고조파 특성은 수신 감도와 인접 채널의 선택도를 결정하는 중요한 요소이며, 특히 디지털 변조 방식에 있어서는 수신 오류(BER)에 커다란 영향을 준다.

특히, 위상 잡음 특성은 주로 트랜지스터의 잡음 지수, 1/f 특성을 갖는 DC 근처 저주파 잡음과 캐리어(carrier)와의 혼합에 의한 플리커 잡음(1/f noise), 바랙터 다이오드(Varactor Diode)와 함께 구성되는 공진부의 특성 등에 의해 결정된다^[3]. 따라서 스트립 라인으로 공진부를 구성함에 있어서 고주파에서

유전을 손실이 적은 기판을 사용하는 것이 위상 잡음 감소에 좋다^[4].

본 논문에서는 고주파 특성이 좋은 비유전을 6.15, 두께 25 mil의 RT/Duroid 6006 기판과 발진기용 소자로 많이 사용되는 저잡음 소자인 Avantek사의 ATF-13786을 사용하여 근거리무선통신용 송수신 단말기의 주파수 합성기에 사용될 VCO를 설계 제작하였다.

II. 5.5 GHz 대역 VCO 설계

2-1 설계 규격

현재 ITS용 능동형 RF 모듈의 변조 방식으로는 ASK가 표준 규격으로 제안되고 있어 양호한 위상 잡음 특성에 대한 요구가 높지 않다. 그러나 QPSK나 OFDM 변조 방식 등을 사용하게 될 경우 수신 오류율을 낮추기 위해서는 좋은 위상 잡음 특성을 갖는 발진기가 필요하다. 고조파 응답 특성과 위상 잡음 특성에 대한 요구 규격은 RF 모듈의 스퓨리어스 억압 특성과 변복조 방식에 따라 결정되었지만 본 연구에서는 일반 상용 VCO에 준하여 표 1과 같이 설계 규격을 정하였다.

제작할 VCO는 그림 1에 제시된 RF 모듈의 사용 주파수 5.45 GHz~5.51 GHz를 포함하는 영역에서 발진이 되도록 하고, 가변 제어 전압의 범위는 시스템 사용 전압 5 V 이내로 제한하였다.

2-2 VCO 회로 설계

본 논문에서 설계한 VCO는 직렬 케환형 발진 회로로서 그림 2와 같은 구조를 갖는다. 발진회로는

표 1. VCO의 설계 규격

Table 1. Design specification of VCO.

주파수 조정 범위	5.435 GHz~5.515 GHz (0~5V가변시)
출력 전력	5 dBm 이상
고조파 응답 특성	-20 dBc 이상
위상잡음	-85 dBc/Hz 이하 (at offset freq.=10 kHz)

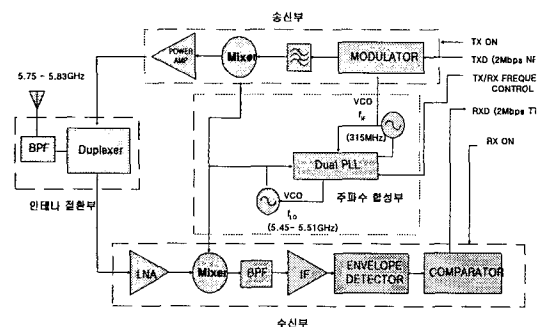


그림 1. 능동형 DSRC용 RF 모듈 블록도

Fig. 1. Block diagram of RF module for active type DSRC.

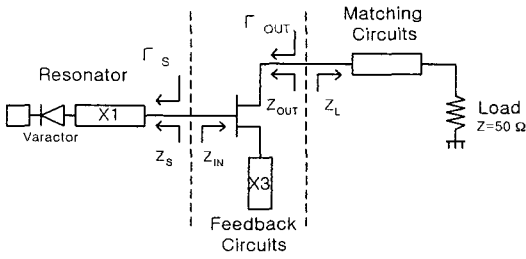


그림 2. VCO의 구성도
Fig. 2. The configuration of VCO.

능동 소자를 포함하여 고주파를 생성시키는 부저항 부와 발진 주파수를 결정하고 안정화 시키는 공진 부, 부하에 최대 전력이 전달될 수 있도록 하는 임피던스 정합부로 되어있다. 소신호 설계시 발진 회로의 공진부는 바랙터 다이오드의 정전 용량 추가에 의한 주파수 하향을 고려하여 5.8 GHz에 맞추어 설계하였다.

GaAs MESFET를 사용한 공통 소스 회로는 발진 하고자 하는 주파수에서의 소신호 산란계수 S_{11} 과 S_{22} 의 절대치가 1보다 크면 발진이 일어나지만 1보다 작을 경우에는 그림 1과 같이 궤환 요소 X_3 를 첨가시킨다. 즉, 궤환 요소를 첨가한 MESFET의 산란계수 S_{711} 과 S_{722} 의 절대치가 1보다 크고, 원하는 주파수에서 최대 출력을 낼 수 있도록 X_3 의 값을 결정해야한다^{[5],[6]}.

직렬 궤환 요소 X_3 를 결정하기 위하여 MESFET의 산란계수를 Z-파라미터, $[Z_1]$ 으로 변환하고 직렬 궤환 요소 X_3 의 Z-파라미터, $[Z_2]$ 를 결정한 후 결정된 2개의 Z-파라미터를 더하여 궤환 요소를 포함한 MESFET의 Z-파라미터, $[Z_{TOTAL}]$ 을 계산한다. 계산된 전체 Z-파라미터를 다시 산란 계수로 변환하여 안정도 판별식을 이용하여 MESFET 회로가 안정한지 불안정한지를 판단한다^[7].

직렬 궤환요소 X_3 를 결정한 후에는 공진기 X_1 의 값을 결정한다. 회로가 발진하기 위해서는 X_1 과 X_3 의 조합에 의해 변하는 출력임피던스 Z_{out} 의 실수 부분이 음수이어야 한다. 최적 발진 조건을 위한 X_1 과 X_3 의 조합은 출력임피던스 Z_{out} 의 절대값이 최대를 나타낼 때로 정의된다. 출력 임피던스가 최대일 때 발진기의 발진 출력도 최대가 된다.

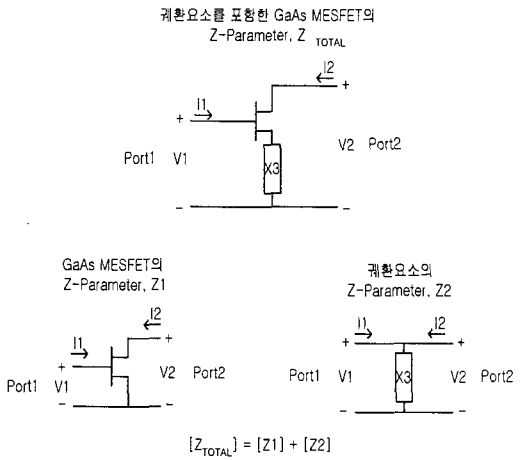


그림 3. 궤환요소를 포함한 GaAs MESFET의 Z- 파라미터
Fig. 3. Z-parameter of GaAs MESFET including feedback component.

본 논문에서는 이러한 파라미터 변환과 X_1, X_3 조합에 의한 출력임피던스 계산과정을 MATLAB을 이용하여 프로그래밍 하여 최적의 X_1 과 X_3 값을 결정하였다. 결정된 X_1 과 X_3 값을 이용하여 마이크로 스트립 라인의 형태와 크기를 계산한 다음 이 값들로 시뮬레이션 소프트웨어인 ADS를 이용하여 발진 조건을 확인하였다. 시뮬레이션에 의해 추출된 최적의 Z_{out} 를 이용하여 부하 임피던스 Z_L 을 결정하였다.

최대 전력을 발생시키기 위한 부하 임피던스 Z_L 의 허수부와 실수부는 다음 조건식으로부터 직접 구해진다^{[7],[8]}.

$$I_m(Z_L) = -I_m(Z_{OUT}) \tag{1}$$

$$R_e(Z_L) = \frac{1}{3} |R_e(Z_{OUT})| \tag{2}$$

식 (2)는 부하 임피던스의 실수부분이 RF 드레인 전류의 크기 증가에 따라 선형적으로 감소할 때 발진기로부터 최대 출력을 얻을 수 있는 조건식이다.

MATLAB으로 작성한 프로그램에 의해 구해진 출력 임피던스 Z_{out} 의 절대값이 최대일 때의 X_1 과 X_3 의 리액턴스값은 다음과 같다.

$$X_1 = -1$$

$$X_3 = -91$$

구해진 X_3 값이 음수를 나타내는 것은 소스단의 스테르브를 개방형 스테르브(개방 스테르브: $-jZ_0 \cot \beta l$, 단락 스테르브: $-jZ_0 \tan \beta l$)를 사용함을 의미한다. X_1 과 X_3 의 값을 50Ω 의 특성임피던스를 갖는 개방형 스테르브를 이용하여 길이를 계산하면 다음과 같다.

$$X_1 = 8 \text{ mm}$$

$$X_3 = 2.7 \text{ mm}$$

계산된 X_1 과 X_3 의 값을 초기 값으로 사용하여 원하는 주파수 이외의 주파수에서 출력 임피던스 Z_{out} 이 양의 값을 갖도록, 즉, 불필요한 주파수 영역에서 발진이 안되도록 ADS를 이용하여 다시 최적화 하였다.

MESFET의 동작점 결정은 설계 목표치 중 출력 레벨 및 위상 잡음을 고려하여 결정한다. 일반적으로 높은 드레인-소스 전류는 위상 잡음이 증가하고, 적은 드레인-소스 전류는 출력 파워가 감소되게 된다. 특히 $1/f$ 잡음은 발진회로의 발진 신호와 주변 저주파 잡음과 주파수 혼합에 의해 나타나므로 DC 바이어스점, 능동 소자에서 본 RF 부하 곡선, RF 주파수 대역에서 임피던스의 주파수 의존성 등에 의해 영향을 받는다^[6]. 따라서 트랜지스터의 V-I 특성 곡선으로부터 출력은 작지만 위상 잡음을 작게 하기 위한 동작점으로 $V_{ds}=1 \text{ V}$ 이고, $V_{GS}=-0.5 \text{ V}$, $I_{ds}=15 \text{ mA}$ 인 점을 선택하였다.

그림 4는 최적화된 X_1 과 X_3 를 갖는 발진기의 시뮬레이션 회로도이고 그림 5는 시뮬레이션 결과 나타난 출력임피던스 특성이다.

그림 5의 시뮬레이션 결과 $5 \text{ GHz} \sim 6 \text{ GHz}$ 이의 주파수 대역에서 Z_{out} 의 실수 부분은 양의 값을 가지므로 발진이 일어나지 않고 음수인 영역에서만 발진이 된다. 5.8 GHz 대역 발진을 위한 최적의 출력 임피던스는 $Z_{out} = -147.617 + j -14.463$ 이었다. 결정된 Z_{out} 과 식 (1), 식 (2)를 이용하여 부하임피던스 $Z_L = 49.2 + j14.463 \Omega$ 을 구하였다.

설계된 소신호 모델에서 추출된 파라미터를 이용하여 출력 전력, 고조파 특성 등 트랜지스터의 비선형 특성에 의해 발생하는 발진 특성 예측을 위한 대신호 해석을 하였다. 소신호 설계에 의해 제안된 발

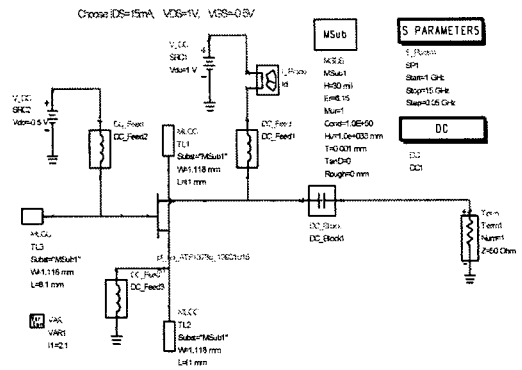


그림 4. 최적화된 X_1, X_3 를 포함한 발진 회로
Fig. 4. VCO circuit including optimized X_1, X_3 .

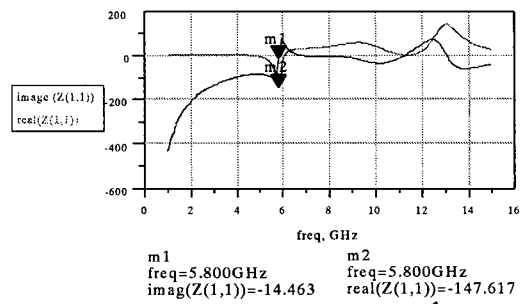


그림 5. 최적화된 X_1, X_3 를 포함한 발진 회로의 출력 임피던스 특성
Fig. 5. Output impedance characteristic of VCO circuit including optimized X_1, X_3 .

진기 회로에 바랙터 다이오드 대신 1 pF 의 콘덴서를 공진부에 연결하고, 소신호 설계에서 계산된 Z_L 값이 부하 임피던스 50Ω 과 정합이 되도록 오픈 스테르브를 사용한 출력 정합 회로를 구성한 후, 이때의 발진 주파수가 5.8 GHz 가 되도록 ADS를 이용하여 대신호 시뮬레이션을 하였다. 그림 6은 최종 설계된 대신호 해석을 위한 회로도이다.

대신호 시뮬레이션 결과 설계된 VCO 회로는 그림 7(a)와 같이 커패시턴스가 1 pF 일 때 $f_0=5.80 \text{ GHz}$ 에서 6.859 dBm 의 크기를 갖는 신호가 발생되고 고조파 특성은 기본파 대비 20 dBc 이상 억압되는 것으로 확인되었다.

바랙터 다이오드의 커패시턴스 변화에 따른 주파

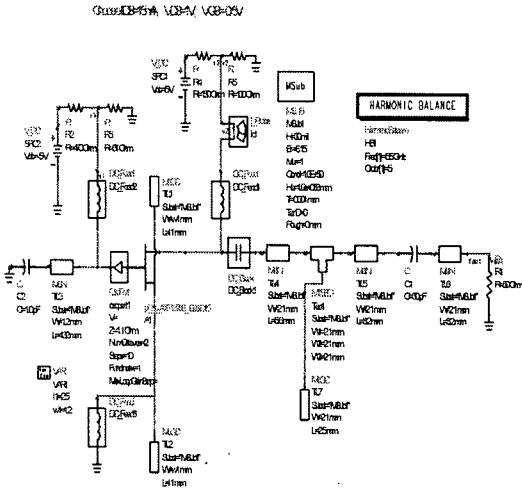
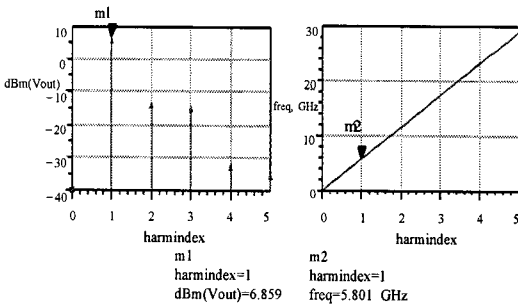
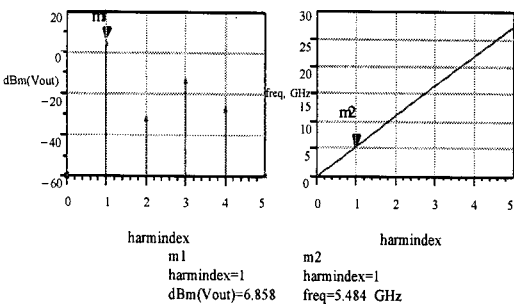


그림 6. 대신호 해석을 위한 시뮬레이션 회로도
Fig. 6. Simulation circuit for large signal analysis.



(a) 1.0 pF일 때
(a) With 1.0 pF



(b) 1.5 pF일 때
(b) With 1.5 pF

그림 7. 설계된 VCO의 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation result of designed VCO.

수 변동 특성을 살펴보기 위해 커패시턴스가 1.5 pF 일 때 발진 주파수와 신호의 크기를 시뮬레이션한 결과 그림 7(b)와 같이 발진 주파수 5.484 GHz, 신호 크기 6.858 dBm을 얻었다.

III. VCO의 제작 및 실험 결과

그림 6의 설계된 VCO 회로의 레이아웃(Layout)을 이용하여 PCB 회로를 구성한다. 사용 기판은 비유전율 6.15, 두께 25 mil의 RT/Duroid 6006이다. VCO에 사용된 트랜지스터는 발진용 소자인 Avantek사의 ATF-13786을 사용하였고, 가변 용량 소자는 MACOM사의 MA46H201 바랙터 다이오드를 사용하였다. 바랙터 다이오드는 Q가 3000이고 역방향 전압이 0~20 V로 변할 때 정전 용량은 2.5 pF~0.2 pF까지 바뀐다. 바랙터 다이오드의 Q가 높으면 다이오드 등가회로의 직렬 저장 성분이 거의 0에 가깝게 계산되므로 무시된다^[9].

DC 바이어스 회로는 RF 신호에 대해서는 개방되어 RF 신호가 DC 바이어스 라인으로 커플링되는 것을 방지하도록 $\lambda/4$ 마이크로스트립 라인과 부채꼴 스텐브(radial stub)를 사용했다. $\lambda/4$ 마이크로스트립 라인은 RF 신호선에 비해 높은 임피던스 특성 (100 Ω)을 갖도록 설계하였다.

그림 8은 설계된 VCO의 PCB 패턴도이다.

그림 9는 1 인치×1 인치의 치구에 제작된 VCO를 보여준다.

제작된 VCO의 특성을 측정하기 위해 FET의 바이어스로 $V_{ds} = 1$ V, $V_{GS} = -0.5$ V를 가하고 바랙

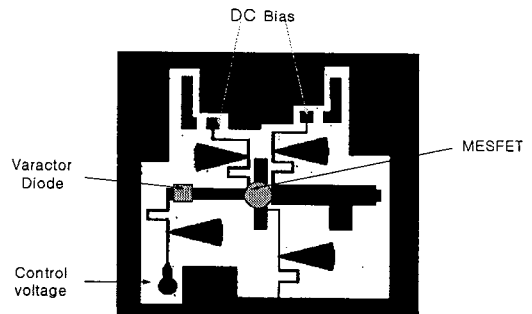


그림 8. 설계된 VCO PCB 패턴
Fig. 8. The PCB pattern of designed VCO.

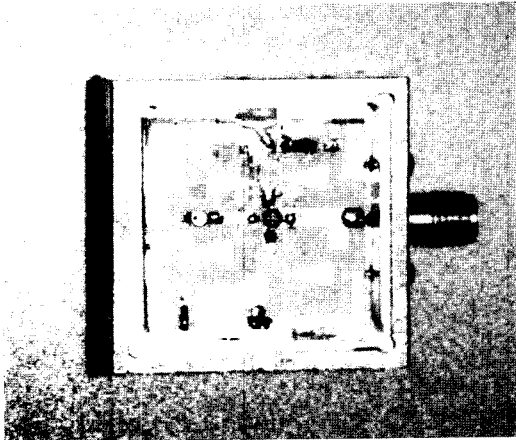


그림 9. 제작된 VCO
Fig. 9. Fabricated VCO.

터 다이오드 역방향 전압을 0 V에서 5 V까지 변화하면서 발진 특성을 관찰하였다. 제어 전압은 20 V까지 입력이 가능하나, 그림 1에 제안된 RF 모듈의 동작 전압이 5 V이므로 제어 전압의 범위도 그에 맞추어 측정하였다.

그림 10은 바랙터 다이오드에 인가한 제어 전압에 따른 발진 출력 특성을 측정된 것이다.

발진 주파수범위는 5.42 GHz~5.518 GHz까지 98 MHz 이었고 출력 전력의 크기는 6.8 dBm~6.48 dBm까지 0.32 dBm의 변화를 보였으며, 주파수가 증가할수록 크기는 작아졌다. 제어 전압 감도(Control voltage sensitivity)는 16 MHz/V~22 MHz/V로

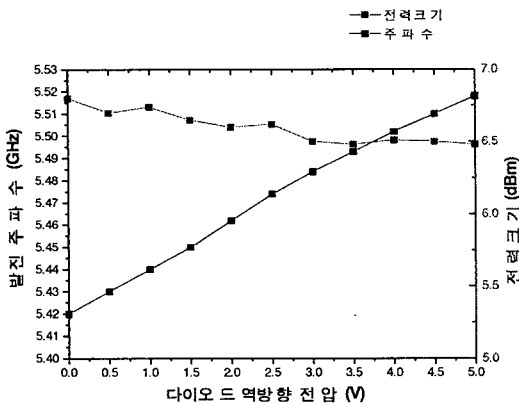


그림 10. 제어 전압 변화에 따른 발진 주파수 및 전력의 크기
Fig. 10. Frequency and level vs. control voltage.

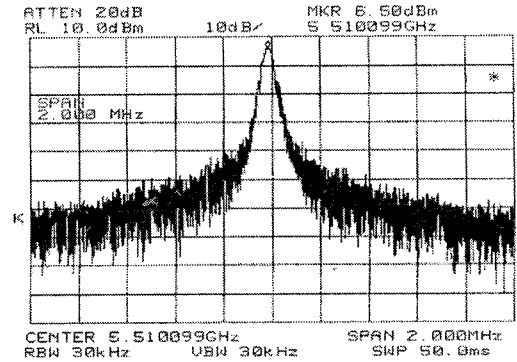


그림 11. 기본 주파수 특성
Fig. 11. Fundamental frequency characteristic.

평균 19.6 MHz/V로 측정되었다.

그림 11은 프리 러닝(free running)시 기본파 출력 특성을 측정된 결과를 보여 주고 있다. 5.51 GHz의 기본파(f_0)의 크기는 6.50 dBm으로 측정되어 설계 요구 사양 5 dBm보다 1.5 dBm 크게 측정되었다.

그림 12는 5.51 GHz에서의 고조파 특성을 측정된 것이다. 측정 결과 2차 고조파는 기본파에 비해 21.5 dB 작게 나타났다. 따라서 설계 목표치 -20 dBc를 상회한 측정 결과를 보였다.

그림 13은 VCO의 위상 잡음 특성을 나타낸다. 오프셋 주파수 10 kHz에서 위상 잡음은 -83.81 dBc/Hz로 나타나 설계 요구 규격인 -85 dBc/Hz에 근사한 값을 보였다.

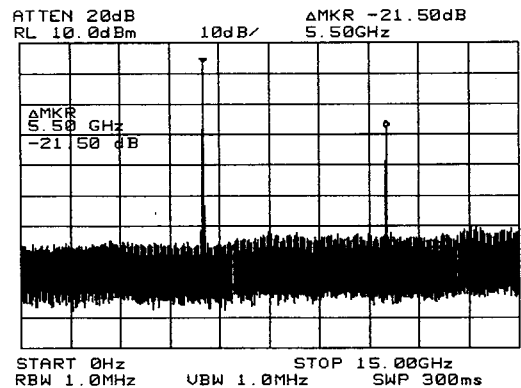


그림 12. 5.51 GHz 발진시 고조파 특성
Fig. 12. Harmonic characteristic at 5.51 GHz.

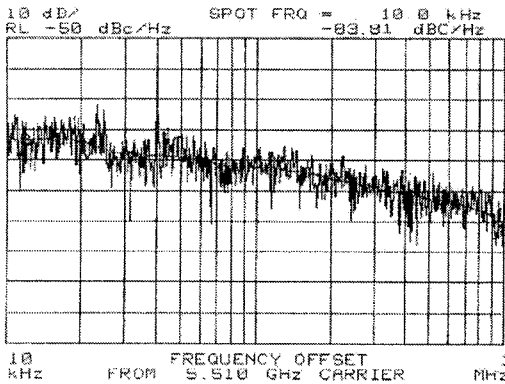


그림 13. 제작된 VCO의 위상 잡음 특성
Fig. 13. Phase noise characteristic of the fabricated VCO.

표 2. 제작된 VCO의 측정 결과(괄호안은 목표치)
Table 2. Measurement results of the fabricated VCO.

주파수 조정 범위	5.42 GHz~5.518 GHz (5.435 GHz~5.515 GHz) (0~5 V 가변시)
출력 전력	6.5 dBm (5 dBm 이상)
고조파 응답 특성	-21.5 dBc (-20 dBc 이상)
위상잡음	-83.81 dBc/Hz (-85 dBc/Hz 이하) (at offset freq.=10kHz)

제작된 VCO를 측정된 결과를 표 2에 나타내었다. 주파수 조정범위, 출력 전압, 고조파 응답 특성은 모두 목표치를 만족하였으며 위상 잡음은 1.2 dB 작은 특성을 보였다.

IV. 결 론

본 논문은 ITS용 근거리고속무선통신 송수신 요구 규격을 바탕으로 RF 모듈을 구성하는 핵심 부품인 전압 제어 발진기를 설계하고 제작하였다.

작성된 프로그램을 이용하여 전압 제어 발진기를

구성하는 설계 파라미터 값을 설정한 후 ADS를 이용한 비선형 시뮬레이션을 통해 최적화된 회로를 설계하였다.

설계된 회로도를 바탕으로 구현된 전압제어 발진기의 특성을 측정된 결과, 바랙터 다이오드에 인가되는 전압의 변화(0 V~5 V)에 따른 주파수 변화는 5.42 GHz~5.518 GHz 이었고, 이때의 출력 레벨은 6.5 dBm이었다. 2차 하모닉 억압은 5.51 GHz에서 -21.5 dBc 를 보였으며 위상 잡음 특성은 10 kHz 오프셋에서 -83.81 dBc를 얻었다.

측정 결과 제작된 전압 제어 발진기는 설계 요구 규격을 만족하였고, 5.8 GHz 대역 ITS용 RF 모듈 시스템의 주파수 합성부에 사용하여 만족할 만한 성능을 얻어 ITS용으로 뿐만 아니라 5.8 GHz 대역의 주파수를 사용하는 송수신 시스템에 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 이상건, 이승환, "ITS 서비스 구현을 통한 교통 정보화 추진 방향", *Telecommunication Review* 제9권 4호, 1999.
- [2] "ITS 고속 무선 패킷 통신 시스템 개발에 관한 연구", 한국전자통신연구원, 1999. 12.
- [3] 장인봉, 양승인 "능동바이어스 회로로 구현된 저주파 궤환 회로를 이용한 발진기의 위상잡음 감소", 한국전자파학회, 제8권 제1호, pp. 94-95, 1997, 2.
- [4] Ulrich L. Rohde, David P. Newkirk, *RF/Microwave Circuit Design for Wireless Applications*, Wiley Interscience, pp. 831-833, 2000
- [5] Minoru Maeda, Katsuhiko Kimura, Hiroshi Kodera, "Design and Performance of X-band Oscillator with GaAs Schottky-Gate Field-Effect Transistor", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-23, no. 8, pp 661-667, 1975. 8.
- [6] 이문규, "Load Line을 고려한 마이크로파 발진기의 비선형 설계에 관한 연구." 서울대학교 박사학위 논문, 1998년 2월.
- [7] Guillermo Gonzales, *Microwave Transistor*

Amplifiers Analysis and Design, Prentice-Hall, 1996.

[8] Walid EL-Kamali, Jean-Paul Grimm, Roman Meierer and Christos Tsironis, "New Design Approach for Wide-Band FET Voltage-Controlled Oscillators", *IEEE Trans. Microwave*

Theory and Tech., vol. 34, no. 10, pp. 1059-1063, October, 1986.

[9] Ulrich L. Rohde, David P. Newkirk, *RF/Microwave Circuit Design for Wireless Applications*, Wiley Interscience, pp. 163-168, 2000.

한 상 철



1981년 2월: 충남대학교 전자공학과(공학사)
1986년 8월: 한양대학교 공업교육학과(공학석사)
2001년 2월: 충남대학교 대학원 박사과정수료
현재: 상지영서대학 전자계산과 교수

[주 관심분야] 초고주파 회로 및 안테나 등

오 승 업



1971년 2월: 연세대학교 전기공학과(공학사)
1973년 2월: 연세대학교 전기공학과(공학석사)
1982년 8월: 연세대학교 대학원(공학박사)
1980년 8월~1981년 8월: 일본 동북대학 전기통신연구소 객원 연구원

1985년 5월~1986년 5월: 미국 펜실베이니아 주립대학 전기과 객원 연구원
1975년 10월~현재: 충남대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] 초고주파 회로, 안테나 공학 및 위성통신 등