

도플러 레이더를 위한 X-Band SOM 설계

Design of X-Band SOM for Doppler Radar

정 선 화 · 황 희 용

Sun-Hwa Jeong · Hee-Yong Hwang

요 약

본 논문에서는 하나의 트랜지스터로 발진과 주파수 혼합이 동시에 이루어지는 self-oscillating-mixer(SOM) 방식을 적용하여 높은 변환 이득을 갖는 X-band 도플러 레이더를 설계하였다. SOM의 위상 잡음 특성을 향상시키기 위하여 $\lambda/2$ slotted square patch resonator(SSPR) 공진기를 제안하였으며, 동일 주파수에서 기존 공진기에 비해 50 %의 면적 감소와 175.4의 높은 Q값을 이루었다. 제작된 SOM은 저 전력 시스템을 구현하기 위해 1.7 V의 낮은 바이어스 전압을 인가해 주었으며, 높은 변환 이득을 위하여 트랜지스터의 pinch-off voltage 근처를 동작점으로 설정하였고, 변환 이득이 최대가 되도록 최적화 하였다. 제안된 SOM의 출력 파워는 10.65 GHz에서 -3.16 dBm으로 측정되었으며, DC Power consumption은 7.65 mW로 상대적으로 작은 전력을 소모한다. 또한, 9.48 dB의 높은 변환 이득 특성과 100 kHz offset에서 -90.91 dBc/Hz의 위상 잡음 특성을 나타내며, 이때 성능지수(FOM)는 -181.8 dBc/Hz 으로 다른 SOM에 비해 7 dB 이상 개선되었다.

Abstract

This paper presents a X-band doppler radar with high conversion gain using a self-oscillating-mixer(SOM) that oscillation and frequency mixing is realized at the same time. To improve phase noise of the SOM oscillator, a $\lambda/2$ slotted square patch resonator(SSPR) was proposed, which shows high Q-factor of 175.4 and the 50 % reduced circuit area compared to the conventional resonator. To implement the low power system, low biasing voltage of 1.7 V was supplied. To enhance the conversion gain of the SOM, bias circuit is configured near the pinch-off region of transistor, and the conversion gain was optimized. The output power of the proposed SOM was -3.16 dBm at 10.65 GHz. A high conversion gain of 9.48 dB was obtained whereas DC Power consumption is relatively low about 7.65 mW. The phase noise is -90.91 dBc/Hz at 100 kHz offset. The figure-of-merit(FOM) of the proposed SOM was measured as -181.8 dBc/Hz, which is supplier to other SOMs by more than about 7 dB.

Key words : Self-Oscillating-Mixer(SOM), Doppler Radar, Conversion Gain

I. 서 론

도플러 레이더는 송신된 신호가 목표물로부터 반

사되는 신호를 수신하여 복조하는 시스템으로 수신된 신호가 도플러 효과에 의해 목표의 움직임에 따라 송신 주파수에 비해 주파수와 위상이 복조된다^[1].

「본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2013-H0401-13-1002).」

강원대학교 IT대학 전기전자공학과(Dept. of Electrical and Electronics Engineering, College of Information Technology, Kangwon National University)

· Manuscript received July 4, 2013 ; Revised October 10, 2013 ; Accepted October 28, 2013. (ID No. 20130704-059)

· Corresponding Author : Hee-Yong Hwang (e-mail : hyhwang@kangwon.ac.kr)

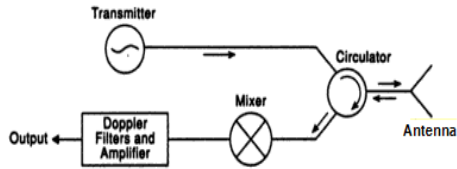


그림 1. 싱글 안테나 타입의 도플러 레이더
Fig. 1. Single antenna type Doppler radar.

그림 1은 한 개의 안테나를 이용한 일반적인 도플러 레이더의 개념도이다. 송신 신호와 수신 신호의 분리를 위해 안테나 전단에 circulator가 사용되며, 분리된 수신 신호는 혼합기에서 발진 신호와 혼합되어 IF 주파수를 출력하게 된다.

Self-oscillating-mixer(SOM)는 발진과 주파수 혼합을 동시에 수행하기 위한 능동 믹서와 발진기가 결합된 회로로서 도플러 레이더에 적용될 경우 도플러 레이더에서 송신된 신호와 수신된 신호를 분리 및 혼합하기 위해 필요한 써큘레이터, 혼합기, 발진기 부분을 생략하거나 결합하여 회로의 소형화, 부품비의 절감 및 낮은 DC 전력 소모의 이점을 얻을 수 있다^{[3],[4]}.

따라서, 본 논문에서는 높은 Q값을 갖는 $\lambda/2$ slotted square patch resonator(SSPR) 공진기와 매칭 회로를 이용하여 낮은 위상 잡음 특성을 가지면서 동시에 높은 변환 이득의 장점을 갖는 SOM의 설계법을 제시하였으며, 이를 통해 소형화된 고성능 X-band SOM 도플러 레이더를 제작하였다.

II. 본 론

SOM은 일반적인 2-port 트랜지스터 오실레이터 설계 과정을 토대로 설계되었다. 제안된 SOM은 바이어스 회로를 포함한 트랜지스터의 S-parameter 회로를 만들고, 설계된 공진기의 Γ_S 가 안정도 원의 불안정 영역에 위치하도록 배치하여 종단 회로를 설계한다. 부하 측의 정합회로는 식 (1)을 이용하여 설계한다^[5].

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S}$$

$$Z_L = -Z_{out} = -R_{out} - jX_{out} \quad (1)$$

2-1 SSPR 공진기 설계

그림 2는 제안된 $\lambda/2$ SSPR 공진기의 레이아웃을 나타낸다. $\lambda/2$ SSPR 공진기는 한 변의 길이가 $\lambda/9$ 인 정사각형에, 폭이 0.2 mm인 슬롯을 1/2비율로 삽입하여 공진기에서 전류가 지나가는 통로를 넓혀 손실을 줄이고 결과적으로 높은 Q값을 갖도록 하였다. 제안된 공진기는 두께가 0.762 mm, 손실탄젠트가 0.003, 유전율이 3.48인 Teflon 기판에서 설계가 되었다. 설계된 공진기는 λ 로 설계되었던 기존의 SSPR 공진기에 비해 면적이 50 % 감소되었으며, 175.4의 높은 Q값을 갖는다^{[6],[7]}.

그림 3은 제안된 $\lambda/2$ SSPR 공진기의 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타낸다.

2-2 도플러 레이더 설계

그림 4는 제안된 SOM식 도플러 레이더의 전체적인 레이아웃이다. S-parameter 회로에서 바이어스 회

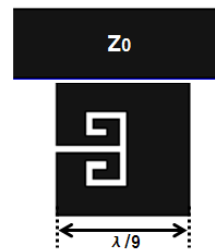


그림 2. 설계된 공진기 레이아웃
Fig. 2. Layout of the designed resonator.

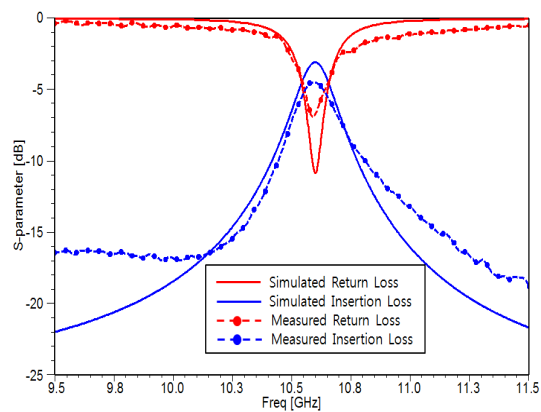


그림 3. 설계된 공진기의 시뮬레이션 및 측정
Fig. 3. Simulation and measurement of designed resonator.

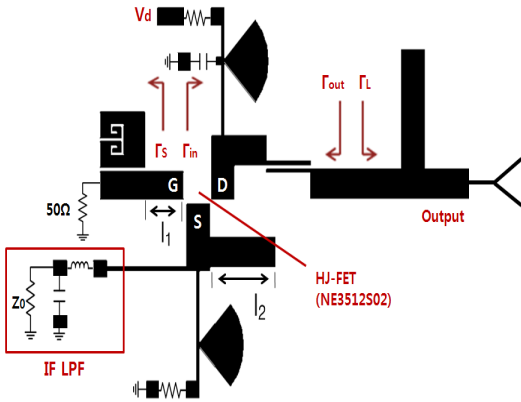


그림 4. 설계된 도플러 레이더 레이아웃
Fig. 4. Layout of the designed Doppler radar.

로는 드레인 단에 하나의 파워 서플라이를 사용하는 자기 바이어스를 채택하였고, 적은 전력으로 시스템을 구동하기 위하여 1.7 V의 전원을 공급해 주었다.

또한, 우수한 변환 이득 특성을 얻기 위해 비선형성이 큰 pinch-off voltage 근처를 동작점으로 정하였다. DC 바이어스 회로는 능동소자에 전원 공급시 발진기의 RF 동작에 영향을 최소화 하도록 설계되어야 하므로, 이를 위해 높은 임피던스를 갖는 $\lambda/4$ 선로와 RF short 특성을 갖는 radial stub을 결합하여 RF 회로와 바이어스 회로를 격리하였다. 좁은 대역폭에서 short 회로로 동작되는 radial stub은 $\lambda/4$ 길이의 마이크로스트립 선로를 지나면서 open 회로로 동작하여 RF choke로서의 역할을 하게 된다. 또한, radial stub에 바이패스 커패시터를 추가로 연결함으로써, 저주파에서 short 회로를 만들어 기생 발진을 막도록 하였다^[8].

그림 5는 입출력 안정도 원을 나타낸다. 설계 주파수에서 충분한 부성 저항을 얻음과 동시에 입·출력 안정도원의 불안정 영역이 충분히 넓어지도록 소스단에 연결된 개방 stub의 길이(l_1)를 조절하였다.

또한, Γ_s 와 Γ_L 가 불안정 영역인 안정도원의 바깥쪽에 위치하고, 동시에 우수한 변환 이득을 갖도록 하기 위하여 공진기와 50 Ω feed 선로 사이의 간격과 공진기와 트랜지스터의 게이트단 사이의 거리(l_2)를 조절하였다. 출력 정합회로는 그림 5에서 얻은 Γ_s 값을 토대로 개방 stub을 사용하여 식 (1)의 임피던스 값과 정합되도록 설계하였다. 전체적인 회로는 저잡

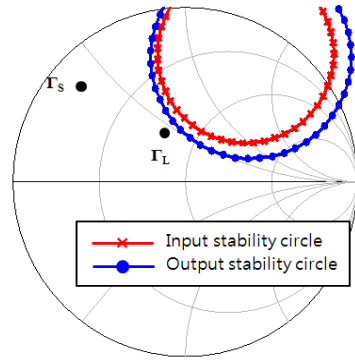


그림 5. 입·출력 안정도 원
Fig. 5. The input and output stability circle.

음 특성을 갖는 NE3512S02를 사용하여 Agilent사의 ADS(Advanced Design System)에서 HB(Harmonic Balance) 시뮬레이션으로 설계되었다.

III. 제작 및 측정

그림 6은 제작된 1×2 배열 안테나이다. 안테나는 Ansoft社의 HFSS로 EM Simulation하여 설계되었고, 기판은 도플러 레이더와 같은 Teflon 기판을 사용하였다.

그림 7은 배열 안테나의 E-plane과 H-plane을 시뮬레이션 및 측정된 결과이다. 제작된 안테나는 발진 주파수에서 최대 이득은 약 10.42 dB이며, S_{11} 는 -28.6 dB이었으며, 대역폭은 40 MHz이다.

그림 8과 9는 제작된 도플러 레이더 및 측정 결과이다. LO 출력 전력은 드레인 부분의 출력단에서 측정하였고, RF 입력 전력은 함수발생기(Anritsu MG-3692B)로 -50 dBm을 공급해 주었다. 이는 제안된 시스템으로 1 m 거리에 있는 움직이는 타겟의 속도 측정을 가정하여 레이더 방정식^[5]에 의해 계산된 수신 전력 값이다. LO 신호와 RF 신호가 혼합된 IF 신호는 FET의 소스단에서 LPF를 통과시켜 측정하였다. 측정 결과, LO 출력 전력은 약 -3.16 dBm이고, IF 출력 전력은 -40.52 dBm이다. 이때, 변환 이득은 식 (2)에 의해 계산되었으며, 2.6 MHz에서 약 9.48 dB으로 높은 값을 가졌다^[5].

$$G_c(dB) = 10 \log \frac{P_{IF}(IF \text{ 출력 전력})}{P_{RF}(RF \text{ 입력 전력})} \quad (2)$$

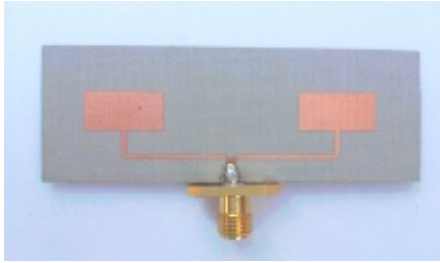


그림 6. 제작된 1x2 안테나
Fig. 6. The fabricated 1x2 antenna.

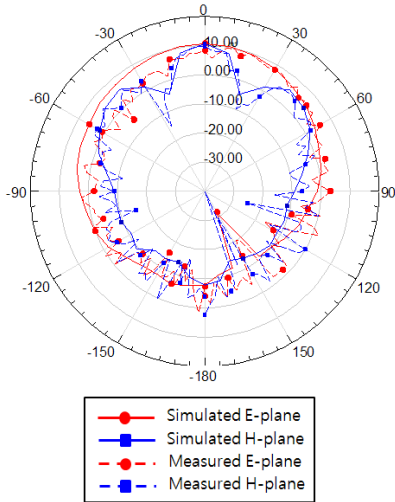


그림 7. 방사 패턴
Fig. 7. Radiation pattern.

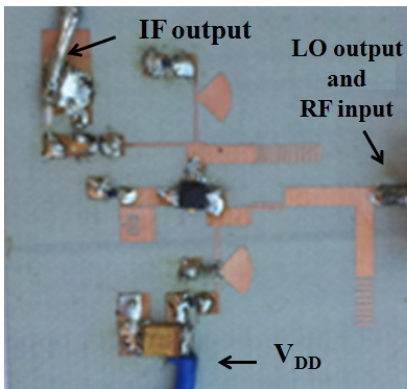
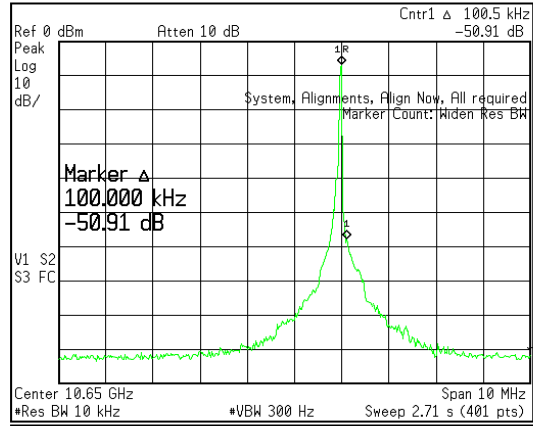
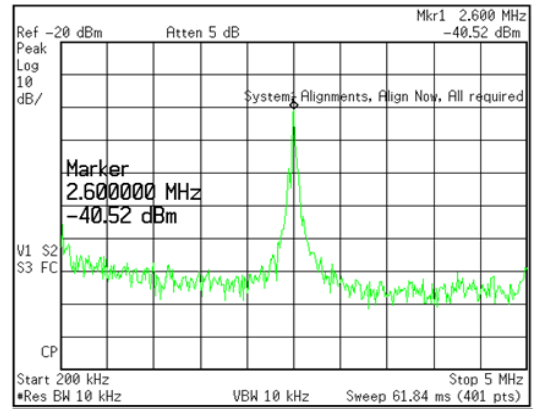


그림 8. 제작된 도플러 레이더
Fig. 8. Photograph of the fabricated Doppler radar.

이때, DC 전력 소모량은 7.65 mW이며, 위상 잡음 특성은 100 kHz offset에서 약 -90.91 dB/Hz이 측정



(a) 위상 잡음 특성
(a) Phase noise characteristic



(b) IF 출력 전력
(b) IF output power spectrum

그림 9. 제작된 도플러 레이더의 측정
Fig. 9. Measurement of the fabricated Doppler radar.

되었다.

식 (3)은 다른 SOM들과 발진기 성능을 비교하기 위해 가장 널리 사용되는 FOM(Figure Of Merit)^[9]를 정의한다.

$$FOM = L(\Delta f) - 20 \log\left(\frac{f_0}{\Delta f}\right) + 10 \log\left(\frac{P_{dc}}{1mW}\right) \quad (3)$$

여기서 $L(\Delta f)$ 는 Δf 의 오프셋 주파수에서의 위상 잡음이고, f_0 는 발진주파수이며, P_{dc} 는 발진기의 DC 소모 전력량이다. 제안된 발진기의 FOM은 10.65 GHz에서 -181.80 dBc/Hz로 계산된다.

표 1은 다른 SOM과 성능 비교를 나타낸다. 제안

표 1. SOM 성능 비교

Table 1. Performance comparison of SOM.

Ref.	f_0 (GHz)	G_C (dB)	P_{dc} (mW)	η (%)	$L(\Delta f)$ (dBc/Hz)	FOM (dBc/Hz)
[4]	4.7	2	37.5	21.3	-110.8 @1 MHz	-168.64
[10]	15.2	-12	22	2.77	-81 @100 kHz	-171.24
[11]	2.5	11.5	50	1.86	-84 @10 kHz	-174.97
This work	10.6	9.68	7.65	6.27	-90.9 @100 kHz	-181.80

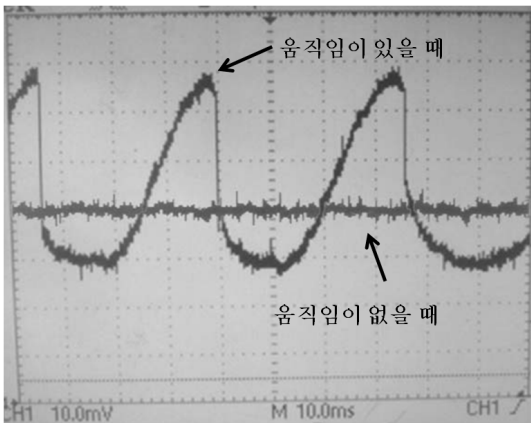


그림 10. 제작된 도플러 레이더의 동작 특성
Fig. 10. Operation characteristic of the fabricated doppler radar.

된 SOM은 기존의 다른 SOM 들보다 낮은 전력 소모와 높은 변환 이득을 가지며, 동시에 기존 SOM들에 비해 FOM이 7 dB 이상 개선되었다.

그림 10은 제작된 도플러 레이더의 동작 특성을 오실로스코프로 측정된 것이다. 타겟의 움직임이 없을 때는 IF 출력단에서 DC 파형이 나타나며, 움직임이 있을 때 IF 출력은 도플러 주파수를 갖는 사인파 형태로 나타난다. 그림 10은 1 m 전방에서 0.42 m/s 속도로 움직이는 직경 330 mm의 금속 원판을 감지하였다.

이때, IF 전압은 42 mVpp로 움직임이 측정되었다.

IV. 결 론

본 논문은 발진 주파수 혼합기(SOM) 방식을 적용

하여 회로의 소형화 및 간소화, 적은 제작 비용, 적은 전력 소모 등의 장점과 동시에 높은 변환 이득과 낮은 위상잡음 특성을 갖는 도플러 레이더를 설계 및 제작하였다.

발진기의 위상 잡음 특성을 향상시키기 위해 175.4의 높은 Q값을 갖는 $\lambda/2$ semi fractal 공진기를 설계하여 기존 공진기보다 50 %의 면적 감소와 100 kHz에서 -90.91 dB/Hz로 낮은 위상 잡음 특성을 이루었다. 이때, FOM은 -181.8 dBc/Hz로 기존 SOM 논문들에 비해 성능이 최대 7 dB 개선되었다. DC 바이어스는 하나의 전원을 사용하는 자기바이어스를 채택하였으며, 높은 변환 이득 특성을 얻기 위하여 비선형성이 큰 pinch-off voltage 근처를 동작점으로 설정하였다. 측정 결과 출력은 약 -3.16 dBm을 보였고, 변환 이득은 9.48 dB의 우수한 값을 얻었다.

본 논문의 연구를 통해 기존의 도플러 레이더를 간소화 시키며, 발진기의 성능을 높일 수 있었고, 우수한 변환 이득 특성을 얻을 수 있었다. 향후 제안된 도플러 레이더는 수면 속도 측정, 스마트 조명 시스템, 근접 움직임 감지 장치에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Jee-Hoon Lee, Yun-Taek Im, and Seong-Ook Park, "Doppler radar sensing system of respiration and heart rate", *Antennas, Propagation and EM Theory, ISAPE 2008. 8th International Symposium on*, pp. 706-708, Nov. 2008.
- [2] Richard C. Dorf, *The Electrical Engineering Handbook*, Second Edition, CRC Press, 1997.
- [3] L. Chiu, T. Y. Yum, Q. Xue, and C. H. Chan, "A high-performed sub harmonic self oscillating mixer for modern wireless communication system", *TENCON 2005 IEEE Region 10*, pp. 1-6, Nov. 2005.
- [4] 김민희, 조춘신, 이재욱, "2차 고조파 주입을 사용한 고 선형성의 자체 발진 혼합기", *한국전자과학회논문지*, 23(6), pp. 682-690, 2012년 6월.
- [5] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Third Edition, Wiley, 2005.
- [6] J. -S. Kim, H. -Y. Hwang, "2.45 GHz high gain

self-oscillating mixer for simple short-range Doppler radar", *Microwave Journal*, vol. 54, Iss. 8, Aug. 2011.

[7] 임경환, 능동초고주파 회로설계 입문, 홍릉과학출판사, 2008.

[8] 서성원, 정진호, 박찬형, "새로운 헤어핀 공진기를 이용한 X 밴드 발진기", 한국전자과학회논문지, 19(2), pp. 250-256, 2008년 2월.

[9] Chih-Lin Chang, Chao-Hsiung Tseng, "Design of low phase-design of low phase-noise oscillator and voltage-controlled oscillator using microstrip trisection bandpass filter", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 21, no. 11, Nov. 2011.

[10] Zhen-Yu Zhang, Ke Wu, and Ning Yang, "A millimeter-wave sub-harmonic self-oscillating mixer using dual-mode substrate integrated waveguide cavity", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 5, May 2010.

[11] Mohammad-Reza Tofghi, Senior Afshin S. Dar-yoush, "A 2.5-GHz InGaP/GaAs differential cross-coupled self-oscillating mixer(SOM) IC", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 4, Apr. 2005.

정 선 화



2008년 3월~2012년 2월: 강원대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2012년 3월~현재: 강원대학교 전기전자공학 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파 능동 회로, 레이더 시스템

황 희 용



1992년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1995년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 2001년 3월~2002년 4월: 메릴랜드 주립대 연구학자
 2010년 3월~2011년 2월: 워싱턴주립대 방문교수
 2002년 5월~2003년 4월: (주)아모텍연구소장
 2003년 2월~현재: 강원대학교 전기전자공학과 교수
 [주 관심분야] RF, Microwave, Millimeter Wave 분야의 부품 및 시스템