

FMCW 송수신 칩을 이용한 단일 안테나 레이더 센서

Single Antenna Radar Sensor with FMCW Radar Transceiver IC

유경하 · 유준영 · 박명철* · 어윤성

Kyung Ha Yoo · Jun Young Yoo · Myung Chul Park* · Yun Seong Eo

요 약

본 논문에서는 130 nm 공정을 이용한 Ku-band에서의 송수신 칩을 사용하여 제작된 단일 안테나 모듈을 제안한다. 레이더 수신부에서 DCOC 피드백을 사용한 STC(sensitivity time control)가 거리에 따라 일정한 SNR을 유지한다. 또한 수신부 RF단에서 gain control을 통하여 수신단의 dynamic range를 조절할 수 있다. 칩의 출력 파워는 9 dBm이고, 수신부의 총 이득은 82 dB이다. 단일 안테나에서 Tx 신호가 Rx로 직접 누설되는 것을 막기 위해 stub-tuned hybrid coupler를 사용하였다. 최대 측정거리는 6 m이고, 혼안테나와 금속판을 사용하여 측정하였다.

Abstract

This paper presents a single antenna radar sensor with a Ku-band radar transceiver IC realized by 130 nm CMOS processes. In this radar receiver, sensitivity time control using a DC offset cancellation feedback loop is employed to achieve a constant SNR, irrespective of distance. In addition, the receiver RF block has gain control to adjust high dynamic range. The RF output power is 9 dBm and the full chain gain of the Rx is 82 dB. To reduce the direct-coupled Tx signal to the Rx in a single antenna radar, a stub-tuned hybrid coupler is adopted instead of a bulky circulator. The maximum measured distance between the horn antenna and a metal plate target is 6 m.

Key words: FMCW Radar, Single Antenna Radar, Hybrid Coupler, CMOS Radar IC

I. 서 론

주파수를 시간에 따라 빠르게 가변하여 송신과 수신 신호의 주파수 차이로 거리를 탐지하는 FMCW(frequency modulated continuous wave) 레이더는 최근 차량용 레이더, 모션 센서, 고도계 등의 여러 분야에서 사용되고 있다^{[1]~[4]}. FMCW 레이더는 송신신호와 목표물에 반사되

어 들어오는 수신신호의 주파수 차이를 이용하여 거리 및 속도를 알아낸다. 최근에는 드론과 같은 소형장비에 사용되기에 더 작고 더 적은 무게의 레이더가 필요하다. 일반적으로 레이더는 송신(Tx)과 수신(Rx)을 위하여 두 개의 안테나를 필요로 한다. 최근 레이더의 단일칩화와 소형화에 따라 두 개의 안테나는 크기와 무게 측면에서 시스템에 큰 부담이 될 수 있다. 또한 FMCW 레이더

「이 연구는 대학 ICT 기초연구실(RF 빔포밍 안테나 및 송수신기 다기능 MMIC 고도화 기술)의 지원과 산업통상자원부 산업기술혁신사업의 지원을 받아 수행되었음(과제번호: 10067194).」

광운대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University)

*RF Core(RF Core, Corp.)

· Manuscript received May 17, 2018 ; Revised June 29, 2018 ; Accepted August 13, 2018. (ID No. 20180517-058)

· Corresponding Author: Yun Seong Eo (e-mail: yseo71@kw.ac.kr)

시스템은 송신기와 수신기가 동시에 동작하기 때문에 송신 출력에 의해 수신기가 포화되거나 수신신호를 구분하지 못하는 경우가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 단일 안테나를 사용하여 안테나가 차지하는 부피와 무게를 크게 감소시킬 수 있는 단일 안테나 레이더를 구현하였다. 단일안테나 레이더는 송신출력이 수신기로 누설되는 양이 특히 클 수밖에 없는데, 이를 막아줄 circulator와 송신신호를 제거 또는 감쇄하는 기능이 매우 중요하다⁵⁾. 송신과 수신에 단일안테나를 사용하기 위해서는 circulator가 필요하게 되는데 일반적으로 circulator는 크기가 크고 PCB 위에 실장이 불편하고 비싼 개별부품으로 사용해야 하는 단점을 갖고 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 circulator를 대신하여 PCB 상에 구현이 가능하면서 저가이고 격리도는 우수한 hybrid coupler를 제안하여 적용하였다. Hybrid coupler를 사용할 경우 비록 3 dB insertion loss가 생기지만 circulator에 비해 부피가 작아지고, PCB 위에 구현이 가능하다⁶⁾. 또한 송신 출력전력이 수신기에 들어가 포화되는 것을 막고자 격리도를 개선하기 위한 stub-tuned hybrid coupler를 설계하여 coupler의 격리도 성능을 향상시켰다. 이는 더 높은 송신 출력을 허용하며, 탐지거리의 개선을 가져올 수 있다. 그림 1은 본 연구에서 개발한 Ku-band FMCW 송수신 단일 칩과 단일 안테나를 위한 hybrid coupler가 포함된 FMCW 레이더 모듈의 전체 블록도이다. 변조하는 주파수 신호를 송수신부에 각각 제공하기 위하여 외부에서 주파수를 변조하는 chirp generator를 사용하였다. 모듈의 소형화를 위하여 Wilkinson power divider를 제작하여 PCB 상에 구현하여 변조신호를 분할하였다.

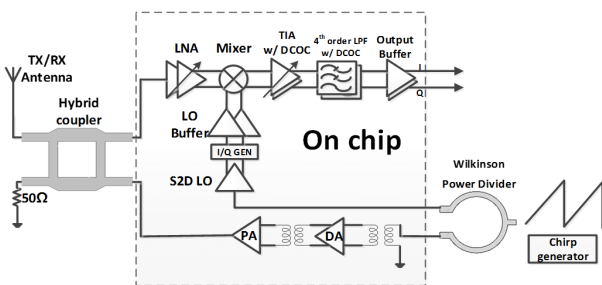


그림 1. FMCW 레이더 블록도
Fig. 1. Overall architecture of single antenna radar sensor.

II. FMCW 레이더 모듈 구조 및 송수신 단일칩

그림 1에 보여진 송신부, 수신부를 포함한 Ku-band FMCW 레이더 모듈의 블록도에서 송신부는 외부 chirp generator에서 공급한 변조 주파수 신호를 방사하고, 수신부에서 대상에 맞고 반사된 신호를 받는다. 그 후 수신부에서 받은 변조신호와 현재의 외부 chirp generator에서 공급되는 신호의 주파수 차이를 통해 대상과의 거리를 측정하는 방식이다. 거리가 멀어짐에 따라 주파수의 편차가 커지며, 수신부의 SNR이 줄어드는 현상을 막기 위하여 기저대역에서 DCOC(DC offset cancellation) 루프에 기반한 STC (sensitivity time control) 회로를 삽입하였다⁶⁾⁷⁾. 또한 외부 chirp generator에서 제공되는 주파수 변조 신호는 근거리 측정에 용이한 주파수 변조속도가 높은 삼각파형 형태의 신호이다. FMCW 레이더 단일칩은 0.13 μm CMOS RF 공정을 이용하여 설계, 제작되었다.

2-1 레이더 수신부와 Sensitivity Time Control Circuit

본 연구에서 개발된 FMCW 레이더 단일칩의 수신부는 저잡음 증폭기(LNA), 가변이득 증폭기, TIA(trans-impedance amplifier) 기반 passive mixer와 기저대역 아날로그 회로부로 구성된다. 전원 공급과 잡음의 영향을 줄이기 위해서 모든 회로는 차동구조를 사용한다. 그림 2는 수신부의 선형성을 개선하기 위해 만들어진 2단 cascode 구조의 RF 가변이득 저잡음 증폭기이다. 이득의 제어는 M3, M6 스위치 트랜지스터를 켜서 이득을 조절하며, VB2와 VB4의 바이어스를 0.9 V로 바꾸면 스위치의 저항이 작아져 이득가변 범위를 크게 할 수 있어 gain과 선형성의 성능을 동시에 증가시킬 수 있다. 이에 따라 더 먼 거리의 대상까지 측정 가능하게 된다.

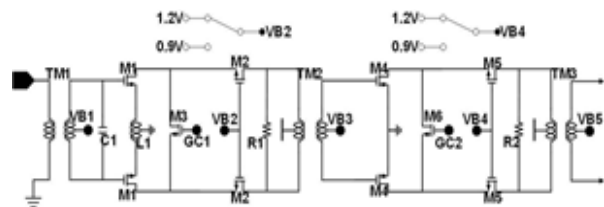


그림 2. RF front-end에서 gain 조절 회로
Fig. 2. RFFE gain control schematic.

다음은 STC 회로에 대한 설명이다. Passive mixer의 출력에 있는 TIA 단계에 있는 저대역 통과성능의 DCOC(DC offset cancellation) 루프 피드백을 통해 DC 대역이 제거되는데, 이는 송신기에서 누설되어 수신기로 직접 들어오는 신호로 인한 LO의 self-mixing에서 생성된 DC 잡음성분을 제거한다. 4th-order active RC 저주파 필터와 PGA(programmable gain amplifier)는 수신부의 선형성을 증가시켜주고, 고주파 잡음을 제거하기 위한 목적으로 포함되어 있다. 또한 거리에 따라 $1/R^4$ 으로 레이다 신호 크기가 감소함에 따라 원거리는 신호가 너무 작아 이득을 크게 해야 하고, 가까운 거리는 수신 신호가 크게 들어와 수신부 포화가 우려되고 신호크기를 줄여야 할 필요가 있는데, 이를 위해 STC 회로로 구현하였다. STC 회로는 그림 3과 같이 기저대역에서 2차 저대역 통과특성의 DCOC 루프를 피드백으로 사용하여 전체적인 기저대역 회로 체인의 성능이 그림 4와 같이 고대역 통과특성과 저대역이 같이 있는 형태로 나오는 것을 이용한다. 그래프를 보면 고

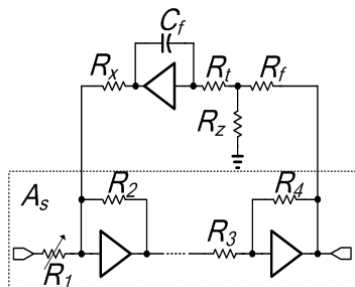


그림 3. 2nd DCOC loop 회로도
Fig. 3. 2nd order DC offset feedback loop circuit diagram.

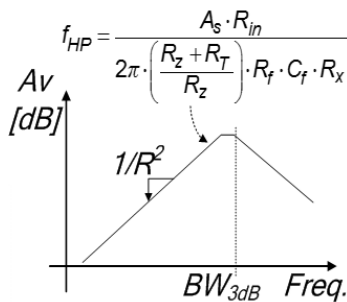


그림 4. 주파수 영역에서의 성능
Fig. 4. Its transfer function vs. frequency.

대역 통과 부분에서 +40 dB/decade의 성능을 보이며, 이에 따라 거리에 따른 신호 크기의 손실을 보상해준다. 따라서 탐지되는 거리의 차이 주파수가 고대역 영역에 있으면 거리에 따라 감소하는 이득이 자연스럽게 보상되어 원거리와 근거리의 수신전력이 일정하게 유지될 수 있다. 수신부는 기저대역 체인은 -23 dB부터 40 dB까지 이득 조절이 가능하며, 이를 통해 dynamic range를 개선할 수 있다^[8].

2-2 레이다 송신부

레이다 송신부는 구동 증폭기(drive amplifier)와 전력 증폭기(power amplifier)를 포함하고 있다. 두 증폭기는 차동의 cascode 구조로 이루어져 있다. 그림 5는 제작된 FMCW 단일칩의 송신부 구조이다. 구동 증폭기 입력단에서는 transformer를 사용하여 단일 신호를 차동 신호로 만들어 주는 게 특징이다. 또한 전력 증폭기 출력단에서도 transformer를 사용함으로써 차동 신호를 단일 신호로 만들어 주었다. 송신부의 입출력단 모두 transformer를 사용함으로써 50 Ω 매칭에 필요한 인덕터의 사용이 필수적인데, transformer를 사용함으로써 인덕터 역할을 할 뿐만 아니라, DC블록 역할을 해주기 때문에 제작 크기 면에서 장점을 갖는다. 또한 입력단 transformer는 단일 신호를 차동 신호로 출력단 transformer는 차동 신호를 단일 신호로 만들어 주는 게 특징이다. 구동 증폭기와 전력 증폭기 사이에도 transformer를 달아줌으로써 임피던스 매칭과 사이즈 축소의 효과를 가질뿐더러 DC 블록 역할을 한다. 또한 구동 증폭기 출력과 전력 증폭기 입력의 바이어스 값을 같게 할 필요가 없어 좀 더 유동적인 설계가 가능하다는 장점이 있다. 외부 chirp generator를 통해 RF 입력신호가 들어오는데, 이 신호는 100 μs의 주기를 갖고 15.0~15.5 GHz까지 가변되는 주파수가 삼각파형 형태로 바뀌는 신호이다.

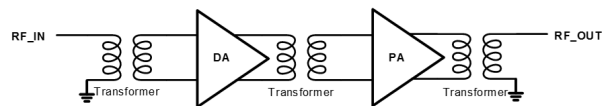


그림 5. FMCW 레이다 송신부 회로도
Fig. 5. Circuit of FMCW radar transmitter.

III. 모듈 소형화를 위한 Hybrid Coupler와 Divider

3-1 단일 안테나를 위한 Hybrid Coupler

단일 안테나 모듈에 필요한 circulator는 microstrip line 으로 90° hybrid coupler를 제작하여 대체하였다. Hybrid coupler의 설계 방법은 기본적인 90° hybrid coupler 구조 기반으로 Ansoft HFSS을 사용하여 EM simulation 방법으로 설계하였다. 시뮬레이션은 Tx/Rx 포트에 이상적인 50 Ω 포트 설정 외 10 %의 오차를 추가하여 시뮬레이션 결과를 확인하였다. 단일안테나 송수신기에서 가장 중요한 격리도를 최적으로 만들기 위해 50 Ω에서 포트 임피던스가 10 % 변하여도 격리도 성능이 상당한 수준으로 유지가 될 수 있도록 그림 6과 같이 Tx와 Rx 포트사이에 2개의 tuning stub를 삽입하여 성능을 최적화하였다. 그림 7과 그

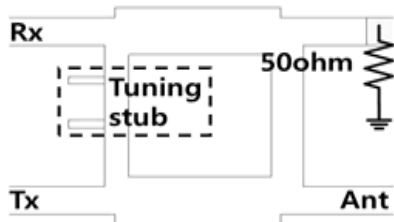


그림 6. 개선된 90° hybrid coupler
Fig. 6. 90° hybrid coupler for Tx and Rx circulation.

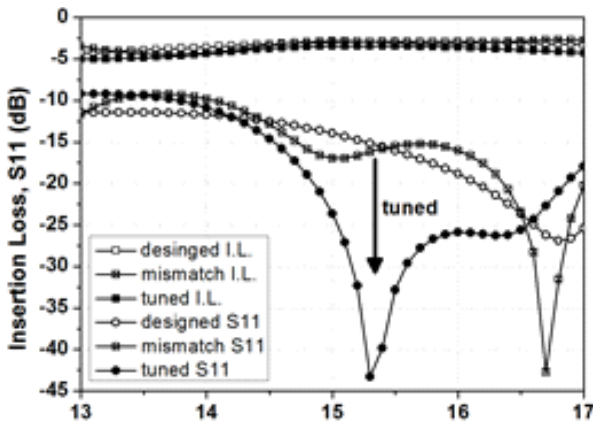


그림 7. Hybrid coupler의 insertion loss / return loss 성능 개선 전
Fig. 7. Designed/mismatched/tuned insertion loss and S_{11} of hybrid coupler.

림 8은 반사손실(S_{11}), 삽입손실, 격리도에 대한 그래프이다. 각각 designed의 경우, 이상적 입력력 임피던스에 대한 coupler의 초기 설계결과, mismatched의 경우 임피던스가 50 ohm에서 틀어진 경우 열화된 성능을, 그리고 tuned의 경우 tuning stub를 통해 조정을 한 후 다시 최적화된 coupler의 성능에 대한 simulation 결과이다. 그림 7에서 포트 임피던스가 틀어졌을 경우, VSWR 값이 약 2:1이지만 tuning stub로 설계를 진행한 후 S_{11} 값이 15 GHz에서 대략 -20 dB 이하의 성능을 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 삽입손실의 성능도 미세하지만 통신 주파수 대역에서 -4 dB 이상의 값을 갖는다. 그리고 그림 8에서는 가장 중요한 성능인 격리도의 개선 전후 그래프 비교를 보여주는데 임피던스가 틀어질 경우 격리도는 대략 -12 dB 값으로 매우 나빠지지만 tuning stub로 최적화한 결과, -25 dB 이상의 우수한 격리도로 수신기 포화를 막고, 허용 송신출력을 높여 탐지거리 향상을 얻을 수 있다.

3-2 동일 신호 제공을 위한 Wilkinson Power Divider

논문에서는 송신부와 수신부에 같은 주파수 변조 신호를 넣어주기 위하여 외부에서 divider가 필수적이다. 외부에서 divider를 사용할 경우, 크기와 가격 면에서 단점을 갖는다. 이 단점을 보완하기 위하여 Wilkinson power divider를 제작하여 PCB에 넣어 외부 divider의 역할을 대체하였다^[9]. Divider를 사용할 경우, 입력된 신호대비 출력신호가

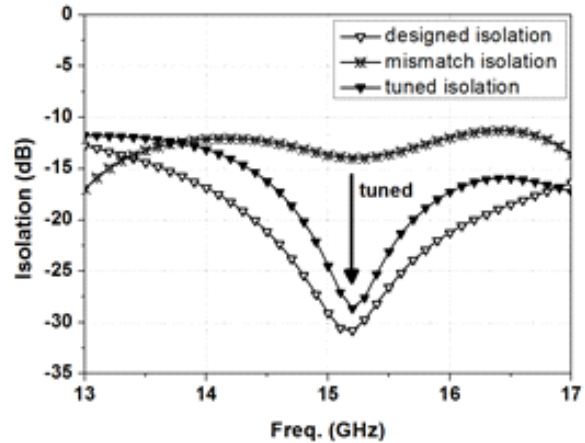


그림 8. Hybrid coupler의 isolation 성능 개선 후
Fig. 8. Designed/matched/tuned isolation of hybrid coupler.

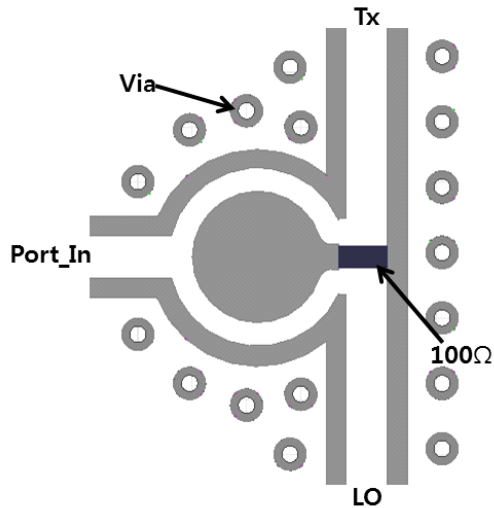


그림 9. 제작한 Wilkinson power divider
Fig. 9. Designed Wilkinson power divider.

최소 3 dB 감소가 생겨 제작함에 있어서 삽입 손실 크기를 가장 중점으로 진행하였다. Ansoft HFSS를 사용하여 제작과 EM 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 9는 실제 제작한 divider의 그림이다.

그림 10은 제작된 divider의 insertion loss와 2개의 출력 간 격리도를 나타낸 그래프이다. 통신 주파수인 15 GHz에서 삽입 손실은 약 -3.5 dB와 격리도 또한 -30 dB 이하의 성능을 갖는다.

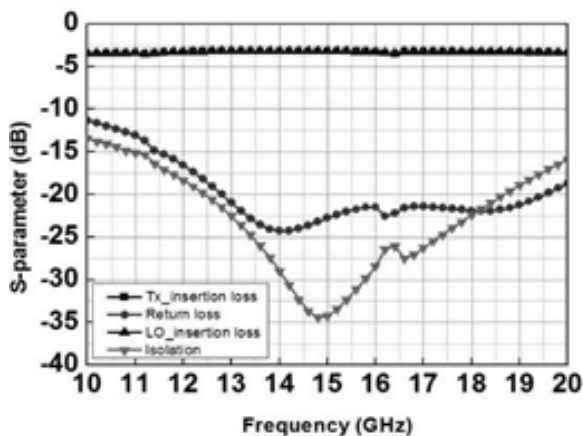


그림 10. Wilkinson power divider의 성능 plot
Fig. 10. Insertion loss and isolation of Wilkinson power divider.

IV. 측정 결과

본 논문에서 사용한 레이다는 130 nm CMOS 공정으로 만들어진 Ku-band FMCW 레이다 송수신칩이다. RF pad와 ESD pad를 포함한 칩의 크기는 $2,850 \times 2,050 \mu\text{m}^2$ 이다. 그림 11은 논문의 특징인 모듈의 소형화를 위하여 단일 안테나를 위하여 90° Hybrid coupler와 Wilkinson power divider를 추가하여 Ku-band FMCW 레이다 칩 측정을 위한 PCB 모듈의 사진이다. PCB의 기판은 TLY-5A 타코닉 기판과 FR-4를 사용하였다. 또한 PCB 기판과 칩과의 와이어 본딩으로 인해 생기는 인덕턴스는 약 $300 \sim 350 \text{ pH}$ 를 3D EM 시뮬레이션으로 확인하였고, 인덕턴스를 고려하여 Tx/Rx의 신호 라인을 microstrip line으로 매칭하였다. FMCW 모듈은 1.2 V의 DC 전압을 인가하고, 소비 전류는 115 mA이다. 그림 12는 수신단 전체의 최대 이득 및 잡음지수(noise figure)을 보여준다. 수신단의 이득은 최대 82 dB에서 최소 -22 dB이며, 104 dB의 넓은 동작 범위를 갖고 있음을 보여준다. 최대 이득일 때 잡음지수는 7.9 dB이다. 그림 13은 외부 PLL신호를 주파수 영역에서 보여주는 그림이고, 15.0~15.5 GHz에서 최대 파워와 최소 파워 간의 차이는 1.19 dB가 보이며 15.25 GHz에서는 9.12 dBm의 파워가 송출된다. 그림 14는 거리 1.5 m, 3 m, 6 m에서의 측정결과이다. 각 거리에 따른 비트주파수는 100 kHz, 200 kHz, 400 kHz이다. STC 회로의 역할을 통하여 거리에 따른 수신전력의 감쇄가 아날로그부에서 이득 보정되어 최종 수신전력의 크기가 비슷하다는 장점을 보

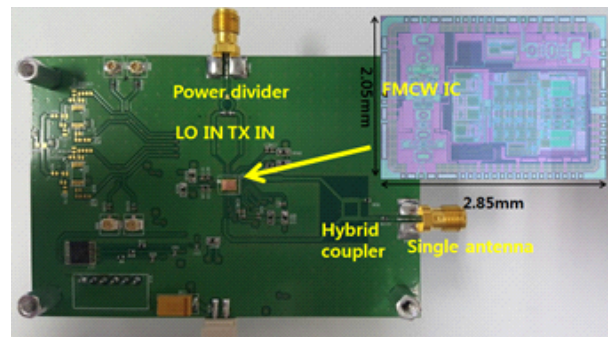


그림 11. FMCW 레이다 모듈
Fig. 11. Single antenna radar board with FMCW and tuned coupler.

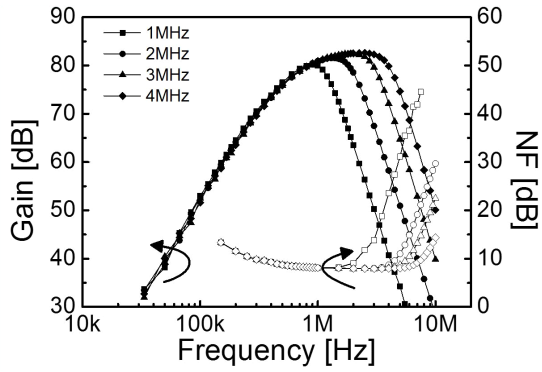


그림 12. 수신부 이득 및 노이즈 성능
Fig. 12. Receiver gain and NF with tunable bandwidth.

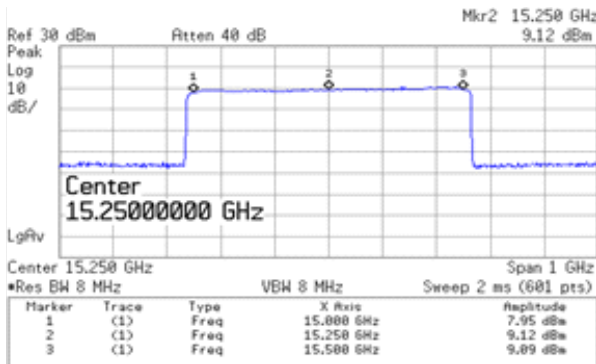


그림 13. 외부 PLL의 주파수 영역에서 성능
Fig. 13. Frequency spectrum of external LO sweeping module.

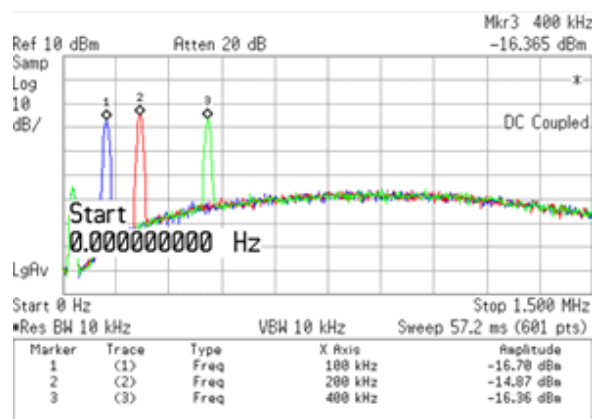


그림 14. STC 회로를 통해 개선된 수신신호
Fig. 14. Measured received signal to verify the proposed STC function.

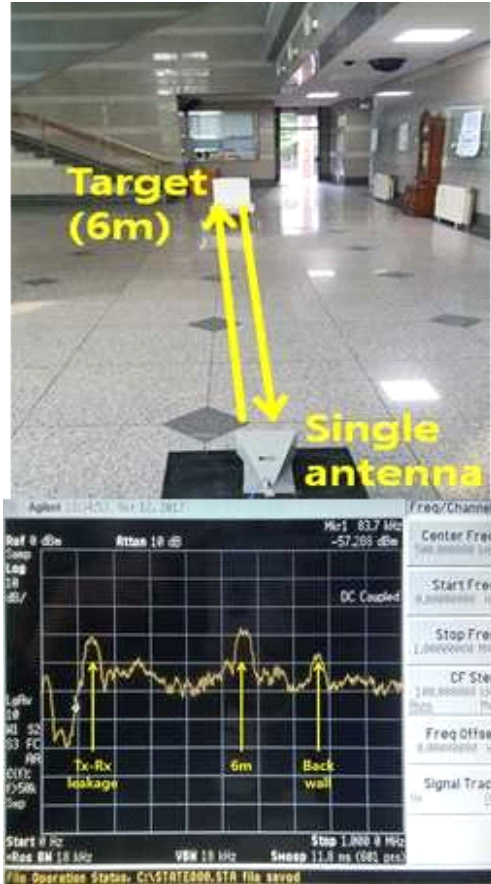


그림 15. 실제측정 환경과 측정 결과
Fig. 15. Measured result and the set up.

여주고 있다. 그림 15는 목표물을 혼 안테나로 측정한 결과의 사진 및 그래프이다. 목표물은 15 GHz에서 RCS=0.606 m²의 값을 갖는 직사각형 모양의 metal plate이다. 사용한 송수신 공용 혼안테나의 이득은 12 dBi이며, 목표물과 안테나와의 거리는 6 m이고, 탐지거리는 6.15 m로 측정되었다. 측정된 비트주파수는 420 kHz이고, 오차는 0.15 m이다. 측정을 위한 안테나와 송수신에 연결된 케이블의 길이가 1 m에 해당하므로 송신과 수신경로 1 m씩을 고려한 총 2 m의 거리를 보정하여 계산하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 CMOS 130 nm 공정기반 Ku-band FMCW 레이더 IC와 이를 이용한 레이더 모듈을 소개하였다. 주

파수 변조 범위는 15.0~15.5 GHz이며, 거리분해능은 30 cm이다. FMCW의 수신단에서 거리에 따른 수신전력 변화에 따른 감도를 자동으로 유지하는 STC기능을 수신기 기저대역의 DCOC 기능을 이용하여 칩에 집적하였다. FMCW 송신기 모듈의 최대 송신 출력 9.0 dBm, 최대 수신 이득 및 노이즈 성능은 각각 82 dB, 7.9 dB이다. 최대 측정 거리는 대략 6 m 까지이며, 송수신 단일 안테나와 송수신부가 모두 집적된 레이더 IC를 기반으로 기존 모듈 대비 크기 무게 및 전력 소비 측면에서 우수한 FMCW 레이더 모듈을 보여주었다.

References

[1] J. H. Kim, S. K. Kim, S. H. Lee, T. M. Lee, and J. Lim, "Vehicle black box with 24 GHz FMCW radar," in *Region 10 Conference(TENCON), 2016 IEEE*, Feb. 2017, pp. 1392-1396.

[2] T. Krejci, M. Mandlik, "Close vehicle warning for bicyclists based on FMCW radar," in *2017 27th International Conference Radioelektronika(RADIOELEKTRONIKA)*, Brno, 2017, pp. 1-5.

[3] G. Wang, C. Gu, T. Inoue, and C. Li, "Hybrid FMCW-interferometry radar system in the 5.8 GHz ISM band for indoor precise position and motion detection," in *2013*

IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), Seattle, WA, Jan. 2013, pp. 1-4.

[4] P. Molchanov, S. Gupta, K. Kim, and K. Pulli, "Short-range FMCW monopulse radar for hand-gesture sensing," in *2015 IEEE Radar Conference(RadarCon)*, Arlington, VA, Jun. 2015, pp. 1491-1496.

[5] R. S. Adams, B. O'Neil, and J. L. Young, "The circulator and antenna as a single integrated system," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 165-168, May 2008.

[6] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, New York, McGraw-Hill, 2001.

[7] H. Kasahara, T. Moriyama, T. Yamaguchi, and H. Yamada, "An equivalent sensitivity time control circuit for FM-CW radar," *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, vol. 80, no. 6, pp. 1-7, 1997.

[8] S. H. Jung, S. G. Kim, W. S. Choi, H. H. Kim, H. G. Kim, and Y. S. Eo, "High dynamic range Ku-band CMOS transceiver IC for FMCW radar application," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium(IMS)*, Honolulu, HI, 2017, pp. 1415-1417.

[9] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed. New York, John Wiley & Sons, 1998, pp. 317-372.

유 경 하



2016년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
 2016년 8월 ~ 현재: 광운대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 레이더 시스템을 위한 CMOS RF/ Analog 집적회로 설계

유 준 영



2018년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
 2018년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 레이더 시스템을 위한 CMOS RF/ Analog 집적회로 설계

박 명 철



EMC 등

2011년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
2016년 2월: 광운대학교 전자공학과 (석박 통합과정)
2016년~2016년: KETI 연구원
2017년~현재: RFcore 선임연구원
[주 관심분야] RF, RF Power Amplifier,

어 윤 성



1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
1995년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2001년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2000년 8월~2002년 8월: LG 전자기술원 RF Team 선임연구원
2002년 9월~2005년 8월: 삼성종합기술원 Chip Solution Center/삼성전자 DM연구소 책임연구원
2004년 3월~2004년 5월: 그리스 Athena Semi사 파견 공동연구
2005년 9월~현재: 광운대학교 전자공학과 교수
2009년 9월~현재: 실리콘알앤디(주) 대표이사
[주 관심분야] UWB CMOS 레이더 IC 및 센서모듈, FMCW CMOS 레이더 IC 및 모듈, 초고주파 CMOS 시스템 설계, CMOS/GaN 전력증폭기 설계