

드론용 초소형 레이더를 위한 K-band FMCW Radar 송수신 IC

A K-Band FMCW Radar Transceiver IC for Small Drone Radars

곽준혁 · 박동욱* · 김홍희** · 송승준** · 전재우** · 주현준** · 백동현*** · 김영진**** · 어윤성*

Jun-Hyuk Kwak · Dong-Wuk Park* · Hong-Hee Kim** · Seung-Jun Song** · Jae-Woo Jeon**
Hyoun-Joon Joo** · Dong-Hyun Baek*** · Young-Jin Kim**** · Yun-seong Eo*

요 약

본 논문에서는 65 nm 공정을 이용한 K 대역 고집적의 FMCW 레이더 송수신 IC 칩을 제안한다. 레이더 송수신 IC는 송신 1개, 수신 2개의 채널이 있으며 광대역의 chirp이 가능한 주파수 합성기와 RF, IF 회로부, ADC 등 대부분의 회로가 단일 칩에 집적되었다. IF 부는 DCOC 피드백을 이용한 STC 기능으로 거리에 따른 손실을 자동 보상하고 수신기는 RF와 IC에서 이득제어를 통해 넓은 dynamic range가 가능하다. 수신기 총 이득은 83 dB이고, 칩의 출력 파워는 11.64 dBm이며 외부 안테나를 통해 최대 26.4 m의 탐지가 가능하다.

Abstract

This paper presents a K-band frequency-modulated continuous-wave radar transceiver integrated-circuit (IC) implemented in a 65 nm complementary metal-oxide semiconductor process. The transceiver IC includes 1-ch Tx and 2-ch Rx. The wideband chirp generator, radio frequency (RF) and intermediate frequency (IF) parts, and analog-to-digital converter were integrated into the IC. The IF component can automatically compensate for the path loss difference along the distance using the sensitivity time control (STC) function with DC offset cancellation feedback. The receiver can perform over a wide dynamic range through gain control in the RF and IC. The full receiver gain was 83 dB, and the transmitted power was 11.64 dBm. An experiment using an external antenna showed that the maximum detection range was 26.4 m.

Key words: FMCW Radar, Transceiver IC, STC, Full-Integrated IC, K-Band

I. 서 론

최근 드론, 자동차, SAR, IoT 등에서 주파수 변조 방식

인(FMCW, frequency modulated continuous wave) 레이더 송수신 기술의 CMOS 기반 단일칩 레이더 송수신 IC 연구개발이 활발하게 이루어져 왔다^{[1][2]}. 특히 최근 드론이

「본 논문은 2021년 과학기술정보통신부 재원으로 한국 연구재단의 지원(No.2021M1B3A3102380)과 한국산업기술기획평가원에서 수행하는 소재부품기술개발사업의 연구비 지원(RS-2024-00446222)으로 수행되었습니다.」

실리콘알앤디(주)(Silicon R&D Co., Ltd.)

*광운대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University)

**LIG넥스원 미사일시스템핵심기술연구소3팀(Missile Systems CoreTech R&D 3 Team, LIG Nex1 co., Ltd)

***중앙대학교 전자전기공학부(Department of Electrical and Electronic Engineering, Chung-Ang University)

****한국항공대학교 항공전자정보공학부(School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University)

· Manuscript received January 5, 2025 ; Revised February 3, 2025 ; Accepted February 19, 2025. (ID No. 20250105-012S)

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

나 소형 비행체에 적용될 탐지 레이더와 고도계의 경우 경량화 및 소형화가 필요하고 전력 소모도 낮아야 하는 요구사항들이 있다. 이를 해결하고자 본 연구에서는 단일 칩화 및 STC 기능을 추가하여 성능을 향상시킨 K 대역 FMCW 레이더 IC를 제안한다. 기존 시스템들은 주로 송수신 회로를 분리하거나 외부 chirp 생성기에 의존하여 시스템 크기와 비용이 증가하는 문제가 있었다. 이에 반해, 본 연구에서는 송신기, 수신기, PLL, ADC까지 모두 통합한 단일 칩 FMCW 레이더 IC를 구현하였다. 또한, 신호 대 잡음비(SNR, signal noise ratio) 및 원거리 탐지 성능을 향상 시키기 위해 기저대역에 STC 회로를 추가하여 거리에 따른 신호 세기가 일정하게 유지되도록 설계하였다.

II. FMCW 레이더 송수신 IC 설계

2-1 RF 송수신기 구조 설계

그림 1은 K-band FMCW radar 송수신 IC의 블록 다이어그램을 보여주고 있다. FMCW 송수신 IC의 회로에는 RF 송신기, RF 수신기, 분수 위상 동기 루프(F-PLL, fractional-phase locked loop), 수신기 IF, 그리고 아날로그-디지털 변환기(ADC, analog to digital converter)가 집적되었다. RF 송신기는 구동 증폭기(DA, drive amplifier)와 전력 증폭기(PA, power amplifier)로 구성되어 있다. 레이더의 입체적인 탐지도 가능하도록 단일 송신에 수신 채널은 2개를 설계하여 집적하였다. 주파수 변조기의 경우는 F-PLL 기반으로 설계되었고 생성된 변조 주파수 국부 발

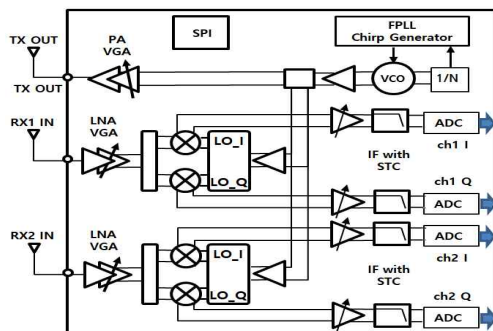


그림 1. FMCW 레이더 송수신 IC 블록도
Fig. 1. FMCW radar transceiver IC blockdiagram.

진기(LO, local oscillation)는 quadrature인 IQ LO 신호로 변환되어 수신기에 공급된다. 또한 수신기의 경우 RF 증폭기와 하향 변환기를 통해 IF 신호로 변환되며, IF부에는 거리에 따른 수신 신호 크기 보상을 위한 감도 시간 제어(STC) 회로가 집적되어 있다. 그리고 최종적으로 12 bit의 ADC가 I, Q 각각에 내장되어 디지털 신호로 변환하여 출력한다.

2-2 수신기 회로 설계

수신기는 RF부와 IF부로 구성되며 RF부의 경우 저 잡음 증폭기(LNA, low noise amplifier) 앞 단의 광대역 매칭을 위해 single to differential on-chip 트랜스포머(transformer)를 이용하여 설계하였으며, 증폭기 core는 저 잡음, 고 이득을 위해 소스 인덕터 degeneration 방식의 cascode 구조를 사용하였다. 가변 이득 증폭기(VGA, variable gain amplifier)도 동일하게 cascode 구조에서 중간 노드에서 병렬로 스위치를 달아 이득 가변을 하는 구조로 설계하였다. 근거리해에 해당하는 낮은 beat 주파수 탐지를 위해 플리커 노이즈($1/f$ noise) 최소화하고자 I/Q double balanced passive mixer 구조로 설계하였다. 또한 IF 수신기의 경우 사실상 기저대역부라고 할 수 있으며, 그림 2(a)와 같이 I와 Q의 동일한 경로로 회로 구성이 되어 있다. 4차 저대역 필터(LPF, low pass filter)와 3 단의 이득 가변이 가능한 가변 이득 제어 증폭기(PGA, programmable gain amplifier)로 구성이 되어 있는데 PGA와 LPF에 (DCOC, DC offset

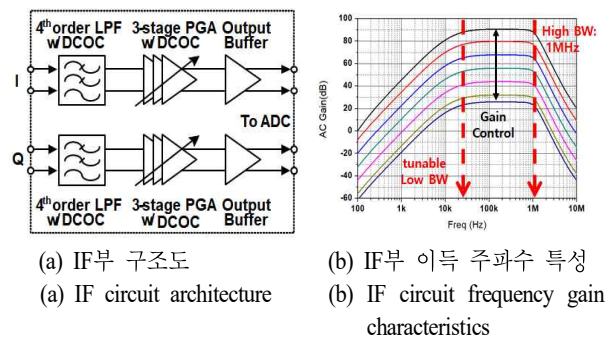


그림 2. IF 회로부 구조도 및 이득의 주파수 특성
Fig. 2. IF circuit architecture and Frequency gain characteristics.

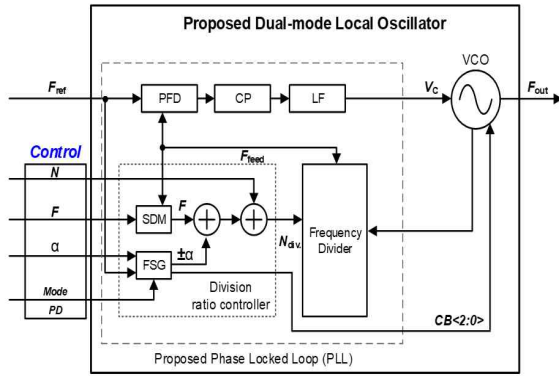


그림 3. 주파수 합성기의 구조
Fig. 3. Frequency synthesizer architecture.

cancellation) loop 회로가 있어 그림 2(b)와 같이 DC 성분의 제거도 가능하면서 high pass와 같은 특성을 얻는다. 레이더에서는 거리에 따라 $1/R^4$ 으로 수신 신호 크기가 감소하며, 원거리는 신호가 너무 작아 이득을 크게 해야 하고, 가까운 거리는 너무 크게 들어와 수신기 포화가 우려되므로 신호 크기를 줄여야 할 필요가 있는데, 40 dB의 기울기를 갖는 high pass와 같은 특성을 이용해 보상되는 STC 기능을 수신기 회로에 집적하였다. 수신기의 최종단은 12-bit의 pipeline 구조의 ADC를 적용하여 수신단의 dynamic range와 고해상도를 위한 충분한 SNR이 확보될 수 있도록 하였다.

2-3 송신기 및 주파수 변조기 회로 설계

RF 송신기 회로는 DA와 PA로 구성되어 있는데 DA는

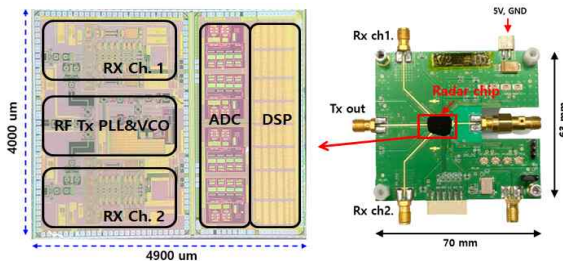
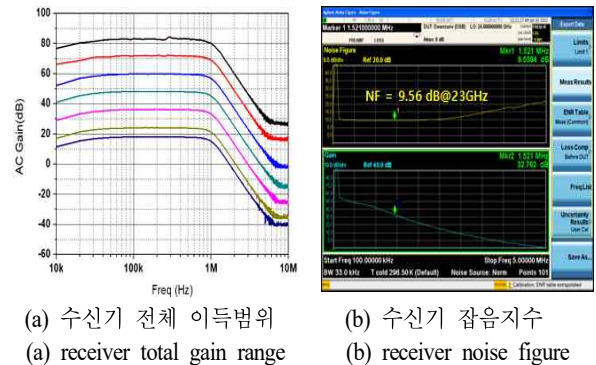


그림 4. 제작된 FMCW radar 송수신 IC와 시험보드
Fig. 4. Manufactured FMCW radar transceiver IC and test board.

입출력에 차동의 on-chip transformer를 사용하여 설계되었고 PA는 differential to single의 on-chip transformer를 이용하여 50 옴 정합을 추가 인덕터 없이 쉽게 하고 DC 블록과 외부 balun을 제거하였다. 각 증폭기의 회로는 gain-boost를 위한 cross coupled 구조의 공통 소스 증폭기 구조를 선택하여 이득과 선형성에 최적화하였고 출력은 P1 dB 기준으로 9.4 dBm으로 설계하였다. FMCW 레이더를 위한 변조 주파수 생성 회로는 기존의 직접 디지털 합성기(DDS, direct digital synthesizer)와 PLL 및 multiplier 등이 필요한 복잡한 구조 대신 단일의 저전력 F-PLL 기반 주파수 변조 신호 발생기를 설계하였다. 그림 3은 제안된 F-PLL 기반 변조 주파수 생성 회로의 블록 다이어그램이다. 일반적인 PLL부와 전압 제어 발진기(VCO, voltage controlled oscillator)로 구성된다. 생성된 변조 LO 신호는 RF splitter를 이용하여 2채널 수신 단과 송신 단으로 출력된다.

III. 측정 결과

그림 4는 설계, 제작된 K-band FMCW radar 송수신 IC와 시험 보드의 사진이다. 65 nm RF CMOS 공정으로 제작되었고 IC의 크기는 4×4.9 mm이다. 제작된 송수신 IC 수신기의 전체 이득이 그림 5(a)와 같이 최대 83 dB에서 최소 18 dB로 12 dB의 step을 보여 주고 있으며, 최소 이득 step은 1 dB로 설계하여 65 dB의 이득제어로 장거리와 근거리 탐지가 모두 가능하다. 수신기의 잡음지수는 그림 5(b)와 같이 23 GHz에서 9.56 dB로 측정이 되었다. 그리고 낮은 대역에서는 STC 기능이 있어 high pass filter와 같



(a) 수신기 전체 이득범위
(a) receiver total gain range
(b) 수신기 잡음지수
(b) receiver noise figure

그림 5. 수신기 전체의 이득 범위 및 잡음지수
Fig. 5. Receiver total gain range and noise figure.

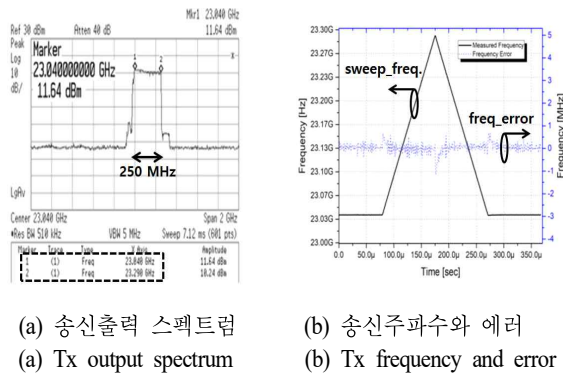


그림 6. 송신출력 스펙트럼 및 송신주파수 에러
Fig. 6. Tx output spectrum, Tx frequency and error.

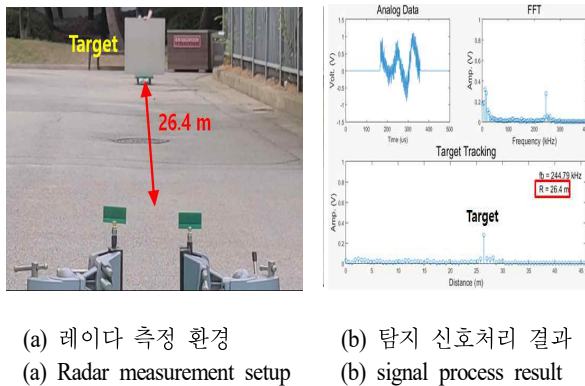


그림 7. 레이더 측정환경 및 신호처리 결과
Fig. 7. Radar measurement setup and signal process result.

표 1. 트랜시버 IC 비교표

Table 1. Comparison table of transceiver IC.

Ref.	Frequency (GHz)	Technology	Function	RX Gain (dB)	TX Output Power(dBm)	Power Consumption(mW)	Area (mm ²)
[1]	24	0.13 μ m CMOS	1TX-2RX PLL, 1Chip	19	9	142	1.2 \times 1.4
[2]	24	0.13 μ m CMOS	1TX-1RX 2Chip	35.7	13.3	495	TX:1.9 \times 1.4 RX:1.8 \times 0.9
[3]	15	55 nm CMOS	1TX-1RX STC, 1Chip	104	9.12	138	5.84
[4]	24	55 nm CMOS	1TX-2RX PLL, 1Chip	64	11	860	7.84
[5]	24	65 nm CMOS	1TX-2RX PLL, STC, 1Chip	100	13.3	220	4.84
This Work	23	65 nm CMOS	1TX-2RX PLL, STC, ADC, 1Chip	83	11.64	174	19.6

은 특성을 보이고 있으며 대역폭의 가변이 가능하도록 설계되어 있다. IF 단에서 1 m는 17.36 kHz에 해당하며, 1 MHz는 57.6 m에 해당한다. 제안한 Radar IC의 IF단 Cut-off 주파수는 1 MHz이며, 수백 m 수준의 거리 확장은 IF단 대역폭을 제어하여 확장이 가능하다. 그림 6(a)는 FMCW radar 송수신 IC를 이용하여 제작된 시험 보드의 송신기 출력을 측정한 결과이며, chirp 시간을 96 μ s로 하여 23.04~23.29 GHz의 250 MHz 변조 대역폭에 대하여 측정을 수행하였다. 측정 결과 23.04 GHz에서 최대 11.64 dBm의 출력을 확인하였다. 그림 6(b)는 시간에 따른 주파수와 주파수 에러를 나타내고 있으며 레이더 수신신호를 반복적으로 수신하여 평균 또는 적분을 통하여 에러를 낮출 수 있다. RCS가 상당히 큰 크기 1 m²의 강철판을 반사판으로 활용하여 측정하였고 9.3 dBi의 안테나 이득을 갖는 1 \times 4 배열 안테나를 사용하였다. 최대 탐지 거리는 26.4 m으로 측정하였으며, 최소 탐지 거리는 0.6 m이다. 거리 오차는 0.3 m이다. 그림 7(a)는 실험 환경을 보여주고 있고, 그림 7(b)는 Matlab으로 적분, FFT, CFAR(constant false alarm ratio) 등 일련의 신호처리까지 수행하여 tracking의 결과를 보여준다. 송수신 IC 전력 소모는 1.2 V 전원에서 145 mA로 매우 작은 전력으로 탐지 센서 및 고도계의 구현이 가능함으로 보여준다. 표 1은 K-band 트랜시버 IC의 성능 비교표이다^{[1]~[5]}.

IV. 결 론

본 논문에서는 CMOS 65 nm 공정 기반 드론에 필요한 초소형 K-Band FMCW Radar 송수신 IC를 제안하였다. 주파수 변조 범위는 23.04~23.29 GHz이며, STC 회로를 집적하여 탐지 거리 별 손실 차이를 보상하여 감도를 자동으로 유지하였다. 최대 송신 출력 전력은 11.64 dBm이며, 강철판을 이용한 시험을 통해 FMCW Radar IC의 탐지 거리는 최대 26.4 m, 최소 0.6 m이다. 전력 소모는 145 mA @ 1.2V으로 저 전력 동작이 가능하며, RF, IF 주파수 변조기, STC, ADC까지 모두 집적된 Radar IC로 저 전력 및 소형화가 가능하여 드론 활용으로 적합할 것 보인다.

References

- [1] S. K. Kim, C. Cui, B. S. Kim, and S. Y. Kim, "A fully-integrated low power K-band radar transceiver in 130nm CMOS technology," *Journal of Semiconductor Technology and Science*, vol. 12, no. 4, pp. 426-432, Dec. 2012.
- [2] G. Pyo, J. Yang, H. Ku, C. Y. Kim and S. Hong, "K-band FMCW radar CMOS front-end ICs with 13.3 dBm output power," in *2014 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, Tampa, FL, Jun. 2014, pp. 79-82.
- [3] K. H. Yoo, J. Y. Yoo, M. C. Park, Y. S. Eo, "Single antenna radar sensor with FMCW radar transceiver IC," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 8, pp. 632-639, Aug. 2018.
- [4] Y. P. Su, C. Y. Huang, and S. J. Chen, "A 24-GHz fully integrated CMOS transceiver for FMCW radar applications," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 56, no. 11, pp. 3307-3317, Nov. 2021.
- [5] G. H. Ko, S. J. Moon, S. H. Kim, J. G. Kim, and D. Baek, "Fully integrated 24-GHz 1TX-2RX transceiver for compact FMCW radar applications," *Sensors*, vol. 24, no. 5, p. 1460, Feb. 2024.

곽 준 혁 [실리콘알엔디(주)/연구원]

<https://orcid.org/0009-0005-4942-1935>



2021년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)

2020년 8월~2023년 9월: (주)빅텍 기업부설연구소 연구원

2023년 9월~현재: 실리콘알엔디(주) 연구원

2024년 3월~현재: 광운대학교 전자공학

과 석사과정

[주 관심분야] RF CMOS 집적회로 설계, FMCW 레이더, RF System 등

박 동 욱 [광운대학교/공학박사]

<https://orcid.org/0000-0003-0782-534X>



2015년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)

2017년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)

2017년~2019년: Point2 Technology Inc. 연구원

2020년~2023년: 실리콘알엔디(주) 연구원

2020년~2024년: 광운대학교 전자공학과(공학박사)

2024년~현재: Point2 Technology Inc. 연구원

[주 관심분야] RF CMOS 집적회로 설계, UWB 레이더 등

김 홍 희 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3853-1811>



2013년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
2015년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2015년 3월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] UWB 레이더 센서, FMCW 레이더 센서, 레이더 고도계, RF 회로 및 시스템, 초고주파 회로 등

주 현 준 [LIG넥스원/팀장]

<https://orcid.org/0000-0002-5042-0906>



2009년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2020년 2월: 고려대학교 전기전자컴퓨터공학과 (공학석사)
2009년 1월~현재: LIG넥스원 미사일시스템핵심기술연구소3팀 팀장
[주 관심분야] 신호처리, RF 등

송 승 준 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0009-0442-8892>



2023년 2월: 한국항공대학교 전자및항공전자공학과 (공학사)
2023년 3월~현재: LIG넥스원 선임연구원
[주 관심분야] FMCW 레이더 센서, 레이더 고도계, 신호처리 등

백 동 현 [중앙대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-0675-1115>



2007년 3월~2011년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 조교수
2011년 3월~2017년 3월: 중앙대학교 전자전기공학부 부교수
2007년 3월~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 교수
[주 관심분야] 밀리미터파 회로설계

전 재 우 [LIG넥스원/기술위원]

<https://orcid.org/0009-0008-4508-5251>



2007년 2월: 경북대학교 전기전자컴퓨터공학부 (공학사)
2006년 12월~현재: LIG넥스원 기술위원
[주 관심분야] FMCW 레이더 센서, 레이더 고도계, 신호처리 등

김 영 진 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9207-9403>



1997년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2002년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2002년~2006년: 삼성전자 선임연구원
2006년~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보공학부 교수

[주 관심분야] RF System, RF and Analog Circuit

어 윤 성 [광운대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4508-6672>



1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학사)

1995년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학석사)

2001년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (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