

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.1.123>
JIIBC 2023-1-18

MMIC 기반 Ka대역 주파수합성기 및 수신기 개발

Development of the Ka-band Frequency Synthesizer and Receiver based on MMIC

서미희*, 정해창*, 나경일*, 김소수*

Mihui Seo*, Hae-Chang Jeong*, Kyoung-Il Na*, Sosu Kim*

요약 본 논문에서는 Ka대역 소형 레이더용 주파수합성 MMIC(FS MMIC)와 수신 MMIC를 개발하고 개발된 MMIC를 기반으로 소형화 된 Ka대역 주파수합성기와 수신기를 개발하였다. FS MMIC와 기저대역 신호를 수신하는 WR(wireless-receiver) MMIC는 65 nm CMOS 공정으로 제작하였고, Ka대역 신호를 수신하는 FE(front-end) MMIC는 150 nm GaN 공정으로 제작하였다. FS MMIC를 바탕으로 개발된 주파수합성기의 출력신호를 이용하여 Ka 대역 신호에 대한 주파수선형변조 파형과 펄스 파형을 측정하고 송신 파형 생성 가능성을 확인하였다. FE MMIC 및 WR MMIC로 구성된 수신기의 성능은 이득 80 dB 이상, 잡음지수 6 dB 이하, OP1dB 10 dBm 이상으로 측정되었다. 측정결과를 통해 본 논문에서 개발된 주파수합성기, 수신기는 Ka 대역 소형 레이더에 적용 가능한 것으로 판단된다.

Abstract In this paper, the frequency synthesis(FS) MMIC and the receive MMICs were developed for a Ka-band compact radar. Also a compact Ka-band frequency synthesizer and a receiver were developed based on those MMICs. The FS MMIC and the wireless-receiver(WR) MMIC to receive the baseband frequency were manufactured by a 65 nm CMOS process and the front-end(FE) MMIC to receive the Ka-band frequency was manufactured by a 150 nm GaN process. Linear frequency modulation waveform and pulse waveform for the transmit signal were measured by output signal of frequency synthesizer. The measured performance of developed receiver including the FE MMICs and the WR MMIC were ≥ 80 dB gain, ≤ 6 dB noise figure and ≥ 10 dBm at OP1dB. The measurement results of the developed frequency synthesizer and the receiver including the manufactured MMICs showed that they could be applied to Ka-band compact radar.

Key Words : CMOS MMIC, frequency synthesizer, GaN MMIC, Ka-band, receiver

*정희원, 국방과학연구소
접수일자 2022년 9월 16일, 수정완료 2023년 1월 16일
게재확정일자 2023년 2월 3일

Received: 16 September, 2022 / Revised: 16 January, 2023 /
Accepted: 3 February, 2023
*Corresponding Author: seomihui@add.re.kr
Agency For Defense Development, Korea

I. 서 론

최근 무선통신·차량용 레이더 등의 다양한 분야에서 RF 소자의 활용이 증가하고 있다. 향후 무인기나 드론에 탑재^{[1],[2]}를 위한 소형 레이더의 수요도 높아질 것으로 예측된다. 다만 기존의 RF 부품을 별도 기판에 고밀도로 집적화하는 HMIC(Hybrid Microwave Integrated Circuits)는 제작에 오랜 시간과 고비용이 요구되어 양산에 불리할 뿐만 아니라, 최근 요구되고 있는 시스템의 소형화, 경량화에 적합하지 않다.

반면, MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuits)는 능동소자와 수동소자를 하나의 반도체 기판 위에 일괄공정으로 제작하는 고주파 집적회로이다. 이 기술은 한 번에 다량의 회로 제작이 가능하므로, RF 시스템의 저가화, 소형화에도 유리하다. 따라서 최근 밀리미터파 대역의 반도체 회로 연구도 활발히 이루어지고 있으며^{[3]-[6]}, 그에 발맞춰 반도체 설계 및 공정 기술력 역시 급격히 성장하고 있다. 본 논문에서는 이러한 추세에 따라 Ka대역 레이더에 적용 가능한 송수신기의 소형화를 위해 주파수합성 MMIC와 수신 MMIC를 개발하고, 이를 이용하여 주파수합성기와 수신기를 개발하였다.

II. Ka대역 고집적 MMIC 설계 및 제작

Ka대역 소형 레이더용 송수신기를 위한 주파수합성(FS : Frequency synthesis) MMIC 및 수신 MMIC를 개발하였다.

PLL(Phase-Locked Loop)기반으로 Ka대역 신호를 생성하는 FS MMIC는 그림 1(a)과 같이 디지털 회로와 아날로그 회로로 구성된다. 그에 따라 두 회로를 하나의 칩에 집적화하기 위해 CMOS MMIC로 설계하였으며, 65 nm CMOS 공정을 활용하여 그림1(b)와 같이 제작하였다. FS MMIC의 디지털 회로는 SPI 통신기능, 주파수합성 프로파일 생성 기능 및 PLL 제어 기능을 수행한다. 아날로그 회로는 디지털 회로의 제어를 통해 PLL에서 발생시킨 Ku대역 신호를 2배배하여 Ka 대역의 송신신호 FTX 혹은 수신기의 국부발진신호 FLO를 생성하고 전력을 증폭시키는 역할을 한다.

그림 2는 FS MMIC의 성능 측정 결과이다. 그림 2(a)와 같이 PLL의 주파수 제어 신호에 따라 Ka대역 신호가 $-17 \text{ dBm} \pm 1.5 \text{ dB}$ 이내의 일정한 전력으로 출력되었다. 또한, 제어 신호를 통해 펄스 파형 및 선형 주파수 변

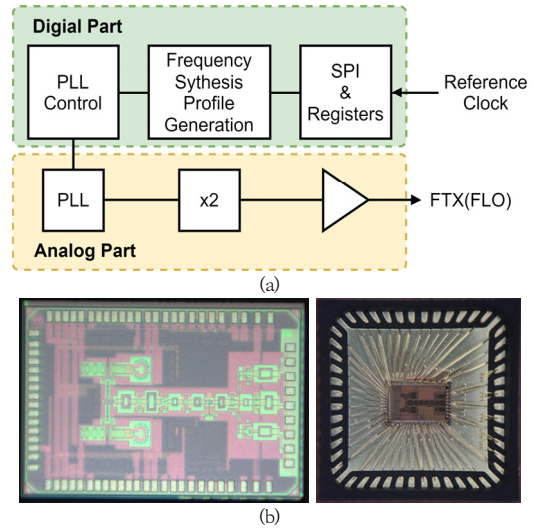


그림 1. FS MMIC (a)블럭도와 (b)칩 형상 (좌: bare chip, 우: 패키지 된 칩)
 Fig. 1. (a)Block diagram and (b) photographs(left : bare chip, right : packaged chip) of FE MMIC

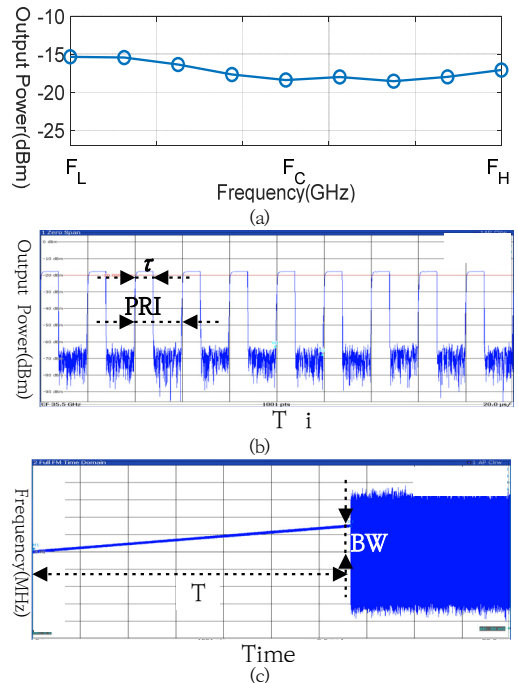


그림 2. FS MMIC의 (a)주파수 제어에 따른 FTX 신호 스펙트럼, (b) 40% 듀티비에서 펄스파형, (c)선형변조파형 측정 결과
 Fig. 2. Measurement results of (a) FTX spectrum according to the frequency control, (b) pulse waveform at 40% duty ratio, (c) linear frequency modulation waveform of FS MMIC

조 파형(LFM : linear frequency modulation)을 생성이 가능함을 확인하였다. 그림 2(b)는 PRI 시간동안 τ 의 펄스폭을 갖는 펄스 파형 생성 결과이며 그림 2(c)는 T 시간 동안 생성한 BW 대역폭의 LFM 파형 측정 결과이다. 다만, CMOS 공정 칩의 한계로 펄스 ON/OFF에 따른 상승 시간 및 하강시간이 각각 473 nsec, 187 nsec로 측정되어 짧은 펄스폭 파형 생성에 어려움이 있을 것으로 판단된다. 상승, 하강 시간 동안 전력이 선형적으로 증가하는 사다리꼴의 펄스가 생성된다고 가정하면 3.3 usec 이하의 펄스폭에 대해서 펄스 평균전력이 약 10% 이상 오차가 발생할 것으로 예상된다.

다음으로 Ka 대역 수신기에 적용 가능한 수신 MMIC를 개발하였다. 개발된 수신 MMIC는 Ka 대역 신호를 저잡음 증폭시키고, 고전력 입력으로부터 수신기를 보호하는 FE(Front-end) MMIC와 주파수 하향 변환 및 추가 이득을 제공하는 WR(Wireless Receiver) MMIC로 구성되며, 측정된 MMIC 각각의 성능은 표 1과 같다.

본 논문에서는 하나의 안테나로 송수신을 하는 레이더 시스템에 적용 가능한 송수신기를 개발하는 것을 목표로 하며, 그에 따라 송신 구간에 수신기로 누설되는 전력에 대해 수신기를 보호할 수 있는 설계가 필요하다. 따라서 FE MMIC는 Ka 대역 신호를 저잡음 증폭할 뿐만 아니라 고입력 전력에 대해서도 동작할 수 있어야 한다. FE MMIC는 고전력 특성이 우수한 GaN MMIC로 설계되었으며, 150 nm GaN 공정으로 그림 3과 같이 제작되었다. 측정된 FE MMIC의 잡음지수 4.5 dB \pm 0.3 dB 이내, 이득은 22.4 dB \pm 1.3 dB 이내로 Ka대역 수신기에 적용할 수 있음을 확인하였다(그림 4).

측정된 출력 1 dB 압축점 OP1dB는 약 10 dBm인 FE MMIC의 고입력 전력에 대한 생존성 시험을 수행한 결과는 표 2와 같다. 2개의 칩으로 시험하였으며, 두 칩 모두 40 % 듀티비의 펄스 신호의 입력전력에 관계없이 출력전력이 유사한 것을 확인하였다. 이는 입력전력이 증가함에 따라 포화입력전력 이상에서 LNA의 이득이 낮아짐을 의미한다. 또한 고입력 시험 이후 0 dBm 입력에 대해 시험을 재수행 한 결과, FE MMIC가 정상적으로 동작하였다. 따라서 FE MMIC는 -12 dBm의 입력 1 dB 압축점 IP1dB보다 50 dB 이상 높은 전력이 입력되어도 정상 동작이 가능한 것으로 판단할 수 있다.

수신기에서 Ka대역 신호를 기저대역으로 주파수하향 변환 하고, 추가 이득을 제공하기 위해 WR MMIC는 그림 5와 같이 개발하였다. WR MMIC는 소형 레이더의 적용을 고려하여 4 채널을 한 칩으로 집적화하고, 디지털

표 1. 개발된 FE MMIC 및 WR MMIC 성능 측정 결과
 Table 1. Measurement results of the developed FE MMIC and WR MMIC(크기)

구분	성능항목	측정결과(dB)
FE MMIC	잡음지수	4.3 ~ 4.8
	이득	21.1 ~ 23.7
WR MMIC	잡음지수	16.1 ~ 19.7
	최대 이득	52.4 ~ 54.7
	최소 이득	0.5 ~ 1.0
	채널 간 격리도	30 ~ 41

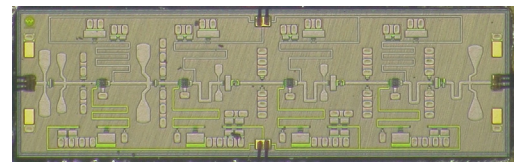


그림 3. FE MMIC 형상
 Fig. 3. Photograph of FE MMIC

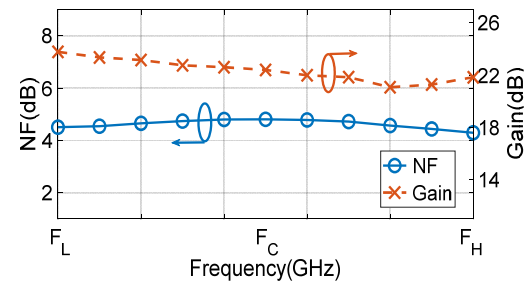


그림 4. FE MMIC 잡음지수 및 이득 측정결과
 Fig. 4. Measured noise figure and gain of FE MMIC

표 2. 송신 듀티비 40% 조건에서 FE MMIC의 생존성시험 결과
 Table 2. Survivability test results of FE MMIC at 40% transmission duty ratio

구분	입력전력(dBm)	출력전력(dBm)
Chip 1	0	19.22
	36	18.87
	39.5	18.87
Chip 2	0	21.83
	36	22.24
	39.5	21.45

이득제어 기능을 포함시키기 위해 65 nm CMOS 공정으로 제작되었다(그림 5(b)). WR MMIC는 표적과 레이더 사이의 거리에 따라 변화하는 표적 신호의 입력전력에 대한 출력전력이 WR MMIC의 포화영역 이내가 되도록 이득을 제어하는 기능을 포함하였다. 추가적으로 각 채널 사이에서 발생하는 신호 간 간섭을 최소화하기 위해 채널 간 격리도를 30 dB 이상 확보하도록 하였다.

그림 6은 대역 내에서 측정된 WR MMIC의 최대 이득과 잡음지수로 각 채널 또는 주파수에 따라 편차가 존재한다. 그러나 소형 레이더를 운용할 때는 운용 전 단계에서 주파수합성기의 점검신호를 통해 수신기의 각 채널 및 주파수에 대한 이득 보정이 수행되므로 동일 주파수에서 약 3 dB 수준의 편차는 수용 가능한 수치이다. 또한 수신기의 잡음지수는 수신기 초단의 FE MMIC에 지배적이므로 WR MMIC의 잡음지수 편차는 수신기의 출력 잡음 준위에 미치는 영향성이 매우 낮다. 따라서 개발된 WR MMIC는 Ka 대역 소형 수신기에 적용 가능한 것으로 판단된다.

추가적으로 개발된 FS MMIC, FE MMIC, WR MMIC의 신뢰성 확보를 위해 정전파괴 시험(ESD : Electrostatic Discharge)을 수행하였다. GaN, CMOS 소자에 각각 250 V, 2000 V 전압에 대한 사람에 의한 정전기(HBM : Human Body Model) 영향성을 확인하였으며, 250 V 전압에 대해 방전에 의한 회로파괴(CDM : Charged Device Model) 시험을 하였다. 정전기 시험 후 MMIC의 각 출력핀 ESD 보호회로의 I-V 곡선이 그림 7과 같이 정상범위로 측정되었다. 또한, 시험 후에도 각 MMIC의 RF 동작 특성에 이상이 없음을 확인하였다.

ESD 해당 결과를 통해 본 논문에서 개발된 MMIC는 정전기 환경에 강건함을 알 수 있다.

III. Ka 대역 주파수합성기 및 수신기 설계/제작

앞서 개발된 FS MMIC, FE MMIC 및 WR MMIC를 바탕으로 Ka 대역 소형 레이더용 주파수합성기 및 수신기를 개발하였다(그림 8).

그림 9는 Ka대역 소형 레이더의 블럭도이다. 주파수합성기의 FS MMIC에서 생성된 Ka대역 신호는 송신기에서 증폭되어 순환기를 거쳐 안테나를 통해 송신된다. F _{pilot} 신호는 송신 전 수신기의 각 채널을 점검하는데

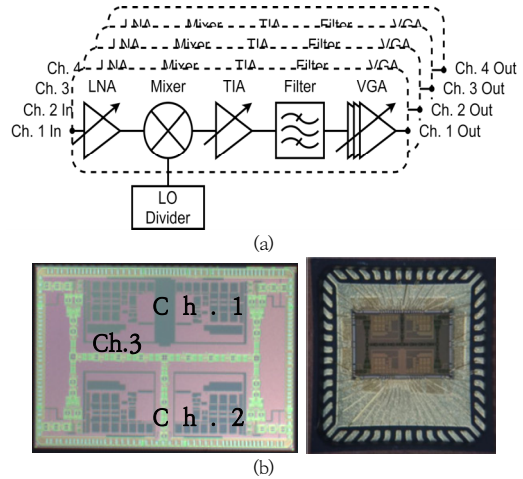


그림 5. WR MMIC (a)블럭도와 (b)칩 형상 (좌 : bare chip, 우 : 패키지 된 칩)
 Fig. 5. (a) Block diagram and (b) photographs(left : bare chip, right : packaged chip) of FE MMIC

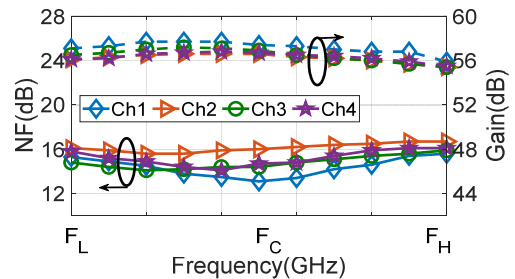


그림 6. WR MMIC 잡음지수 및 이득 측정 결과
 Fig. 6. Measured noise figure and gain of WR MMIC

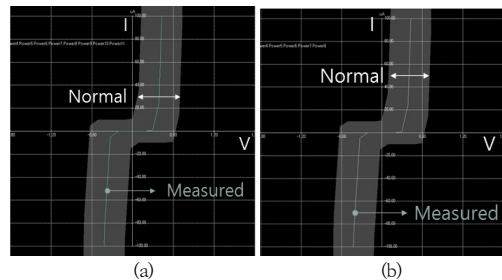


그림 7. ESD 시험 후 I-V 측정 결과 (a) FS MMIC, (b) WR MMIC
 Fig. 7. Measurement result of I-V curve after the ESD test (a) FS MMIC, (b) WR MMIC

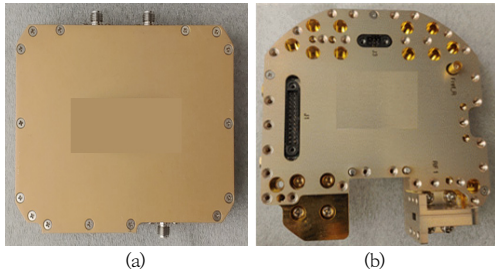


그림 8. 개발된 (a) 주파수합성기, (b) 수신기
 Fig. 8. Developed (a) frequency synthesizer, (b) receiver

사용되는 신호로 안테나를 거쳐 수신기의 각 채널로 입력되며 FTX 신호 송수신 중에는 차단된다. Ftce는 레이더 성능시험을 위해 점검장비에서 활용되는 신호이다. 송신된 신호는 표적을 맞고 반사되어 안테나를 통해 수신된다. 각 채널로 입력된 수신신호는 FE MMIC를 통해 저잡음 증폭되고 WR MMIC를 거쳐 IF 주파수로 하향 변환되어 출력된다.

FS MMIC를 기반으로 개발된 주파수합성기의 크기는 110 mm × 80 mm × 25 mm 로 기존의 DDS 기반 Ka대역 소형 레이더의 주파수합성기^[7]에 비해 소형화하여 제작되었다. 주파수합성기에서는 FS MMIC 이외에도 상용 증폭기 및 감쇄기를 이용하여 각 신호에서 필요한 전력으로 출력되도록 하였다. 또한 주파수합성기의 펄스 ON/OFF 스위치 속도를 높이기 위해 상용 스위치를 이용하여 그림 10의 펄스 파형을 생성하도록 하였다. 제어

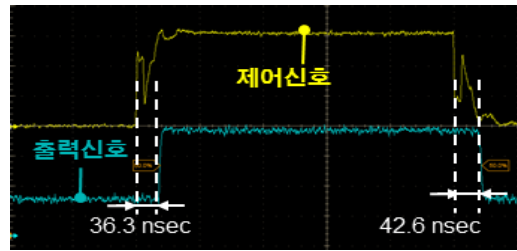


그림 10. 주파수합성기에서 생성된 펄스 파형
 Fig. 10. Generated pulse signal by frequency synthesizer

신호에 대해 측정된 상승/하강 시간은 4.2 nsec / 9.1 nsec, 상승/하강 지연시간은 36.3 nsec / 42.6 nsec이다.

수신기는 그림 9에서 나타난 바와 같이 신호를 수신하고 증폭시키는 역할을 하는 FE MMIC, WR MMIC와 주파수하향 변환을 위한 국부발진신호 LO를 제공하는 FS MMIC로 구성된다. 추가적으로 송신 구간에 수신기로 누설되는 전력에 의한 출력신호를 열잡음 준위로 낮추기 위한 스위치1과 레이더 운용 파형에 따라 협대역 필터를 통과할 수 있도록 SPDT 스위치를 사용하였다. 또한, OP1dB가 1.2 ~ 1.9 dBm인 WR MMIC의 후단에 상용 증폭기를 추가하여 수신기의 동적영역을 넓히도록 하였다.

기존 레이더에서는 4개의 채널에 대해 각각 증폭기, 혼합기, 스위치, 감쇄기 등의 소자를 이용하여 수신기를 제작하였으므로, 사용되는 소자의 수가 많아 주파수에 따라 밀리미터파수신기, 중간주파수신기로 나누어 제작

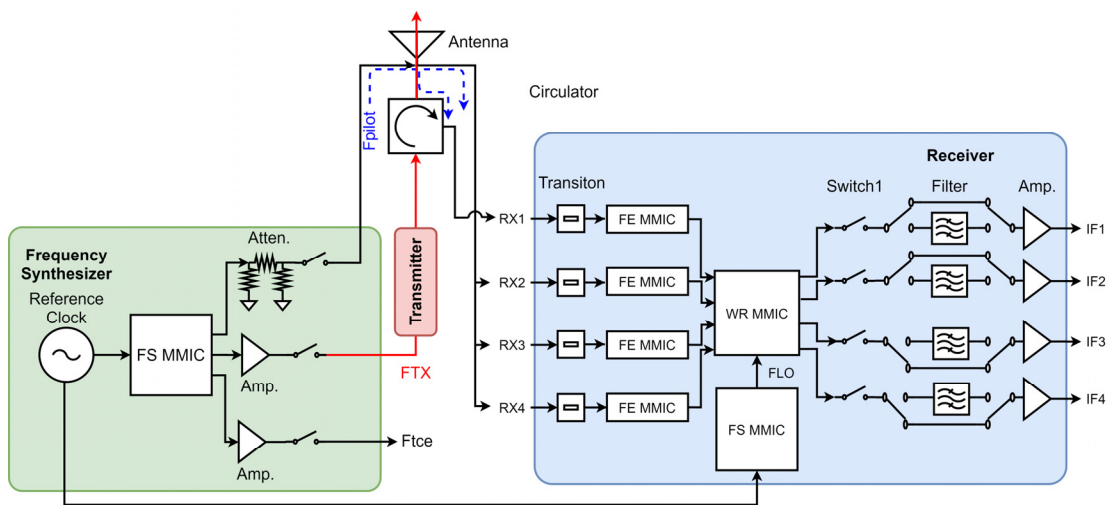


그림 9. Ka대역 소형 송수신기 블럭도
 Fig. 9. Block Diagram of Ka-band compact radar

표 3. 개발된 수신기 성능측정 결과

Table 3. Performance measurement results of the developed receiver

	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch4
최대입력전력(dBm)	> 39	> 39	> 39	> 39
잡음지수(dB)	< 6	< 6	< 6	< 6
최대 이득(dB)	82.0	83.8	83.0	77.0
최소 이득(dB)	23.7	25.8	22.8	24.0
이득 제어폭(dB)	3.0	3.0	2.8	2.9
OP1dB(dBm)	12.6	12.1	12.0	11.6

하였다^[8]. 반면, 본 논문에서 개발된 수신기는 FE MMIC와 WR MMIC 및 일부 상용 소자를 이용해서 101.2 mm × 106.7 mm × 17.5 mm 크기의 하나의 모듈에서 밀리미터파수신기, 중간주파수수신기의 기능을 모두 구현하였다.

개발된 수신기의 대표적인 성능결과를 표 3에 정리하였다. 앞서 언급한 바와 같이 수신기 앞단에는 고전력에 생존성이 높은 GaN소자의 FE MMIC를 적용하였다. 이때 0 dBm 이상의 입력전력에 대한 FE MMIC 출력전력은 18 dBm 이상으로 CMOS 소자인 WR MMIC의 IP1dB에 비해 매우 높다. 따라서 본 논문에서는 송신누설구간에서 GaN LNA의 게이트 전압을 변경하여 이득을 최소화하도록 하였다. 이 경우 39.5 dBm의 입력전력이 GaN LNA에 인가되었을 때, 출력전력이 WR MMIC의 입력전력 준위 범위인 -3 dBm 이하로 낮아지는 것을 확인하였다.

수신기의 입력단은 Ka대역 안테나와의 조립을 고려하여 도파관 형태로 제작되었다. 따라서 수신기 내의 FE MMIC와 도파관 형태의 입력단의 인터페이스를 위해 모드 변환기를 제작하였다. 모드 변환기의 삽입손실 및 모드 변환기와 FE MMIC 사이의 임피던스 매칭에 의한 손실을 고려하면 FE MMIC 앞단에서 손실은 약 0.5 dB이다. 앞서 측정한 MMIC 성능을 반영하여 각 MMIC의 잡음지수가 가장 안 좋은 조건인 FE MMIC의 잡음지수와 이득 4.8 dB, 22.4 dB, WR MMIC의 잡음지수와 이득 19 dB, 53.6 dB와 후단의 스위치 및 증폭기의 이득 및 손실을 포함하면 수신기의 총 잡음지수는 5.9 dB 이하이다.

수신기의 최대이득은 80.5 dB ± 3.5 dB 이내, 최소 이득은 24.3 dB ± 1.5 dB 이내이며, 3 dB 간격으로 제어가 이득제어가 가능함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Ka대역 소형 레이더용 주파수합성 MMIC, 수신 MMIC를 개발하고, 개발된 MMIC를 기반으로 소형화 Ka 대역 주파수합성기, 수신기를 개발하였다. 개발된 주파수합성 MMIC와 수신 MMIC 중 주파수 하향변환을 담당하는 WR MMIC는 디지털 회로와 아날로그 회로를 한 칩에 집적화하기 위해 CMOS 공정을 활용하여 개발하였다. 특히 WR MMIC는 4개의 채널을 한 칩에 집적화하여 기존 소형 레이더의 중간주파수수신기와 밀리미터파수신기를 한 모듈로 통합하였다. 수신 MMIC 중 Ka대역 신호의 저잡음 증폭을 담당하는 FE MMIC는 고입력인 송신누설전력에 강건한 특성을 위해 GaN공정을 활용하여 개발하였으며, 대역 내에서 잡음지수 및 이득은 각각 4.3 dB ~ 4.8 dB, 21.1 dB ~ 23.7 dB이다.

또한, 개발된 MMIC들을 바탕으로 소형 주파수합성기, 수신기 모듈을 제작하였다. 주파수합성기 성능시험을 통해 송신신호 생성을 위한 주파수 선행변조파형 및 펄스파형을 확인하였다. 수신기의 성능시험을 통해 수신신호 저잡음 증폭기능, 주파수 하향변환기능 및 고입력전력으로부터 수신기 보호 기능이 구현된 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 개발된 MMIC 기반 주파수합성기, 수신기는 Ka대역 소형 레이더에 적용할 수 있으며, 본 기술은 소형 레이더의 소형화, 저가화에 기여할 것으로 판단된다.

References

- [1] B. S. Kim, "Development of miniaturized 3-D radar sensor for collision avoidance and autonomous flight of drones : Final Project Report(TRKO202000007476)", SungKyunKwan University, College of Information and Communication Engineering(2018).
- [2] Y. S. Kwon, Y. H. Kim, S. T. Kim, J. W. Song, "Ground analysis algorithm for the delivery drone equipped underneath with a radar", Proceedings of 2020 Conference on Information and Control Systems, pp.49-50, Oct. 2020.
- [3] Wansik Kim, Jooyoung Jung, Younggon Kim, Jongpil Kim, Mihui Seo, Sosu Kim, "Development and Manufacture of W-band MMIC Chip and manufacture of Transceiver", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 19, No. 6, pp. 175-181, Dec. 2019. DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.6.175>.
- [4] Jun-pyo Lee, Dong-yeol Yang, Byung-sung Kim,

"Design of a Ka-Band Receiver Using 28-nm CMOS Process", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 33, No. 5, pp. 410-413, May. 2022.

- [5] Corrado Floran, Pier Andrea Traverso, Alberto Santarelli, "A Ka-Band MMIC LNA in GaN-o-Si 100-nm Technology for High Dynamic Range Radar Receivers", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 31, No. 2, pp. 161-164, Feb 2021.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.3047152>
- [6] Miyoung Lee, "A design of Low Phase Noise Low Power CMOS Quadrature VCO", The Journal of KIIT, Vol.17, No.12, pp. 39-45, Dec. 2019.
 DOI: <https://doi.org/10.14801/jkiit.2019.17.12.39>
- [7] Se-Hwan An, Man-Hee Lee, Hong-Rak Kim, "Multi-Function Compact Frequency Synthesizer for Ka Band Seeker", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 27, No. 10, pp. 926-934, Oct 2016.
 DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2016.27.10.926>
- [8] Seong Sik Yang, Ju Hyun Lim, Sung chan Song, "Design and Fabrication of the Ka-Band Receive Module for Millimeter Wave Seeker", The Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 49, No. 1, pp. 78-84, Jan 2012.

저 자 소 개

서 미 희(정회원)



- 2006년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학사)
- 2013년 2월: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원
- 주 관심분야: 초고주파 레이더 시스템, 초고주파 송수신기

정 해 창(정회원)



- 2008년 2월: 충남대학교 전자전파 정보통신공학과 (공학사)
- 2010년 2월: 충남대학교 전자전파 정보통신공학과 (공학석사)
- 2013년 8월: 충남대학교 전자전파 정보통신공학과 (공학박사)
- 2013년 9월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원

<주 관심분야: 초고주파 능동회로 및 시스템>

나 경 일(정회원)



- 2004년 2월: 경북대학교 센서공학과(공학석사)
- 2009년 3월: (프) 그로노블 공대 전자공학과(공학박사)
- 2010년 5월 ~ 2013년 8월: 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2013년 9월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원

• 주 관심분야: 신호처리, 반도체 설계, 소형 레이더 시스템

김 소 수(정회원)



- 1993년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1996년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2014년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1996년 1월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원

• 주 관심분야: 초고주파 소형 레이더 시스템

※ 이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 수행된 연구 결과임