

W 대역 레이다 시스템을 위한 하향 변환 Q-Boosting 믹서 설계

Design of Down-Conversion Q-Boosting Mixer for W-Band Radar Systems

송재혁¹ · 임정택² · 이재은³ · 손정택⁴ · 김준형⁵ · 백민석⁶ · 이병찬⁷ · 박종성⁸ · 이은규⁹ · 김철영¹⁰Jae-Hyeok Song¹ · Jeong-Taek Lim² · Jae-Eun Lee³ · Jeong-Taek Son⁴ · Joon-Hyung Kim⁵ ·
Min-Seok Baek⁶ · Byeong Chan Yi⁷ · Jong Seong Park⁸ · Eun-Gyu Lee⁹ · Choul-Young Kim¹⁰

요 약

본 논문은 W 대역 하향 변환 믹서에 관한 내용을 다룬다. 이 믹서는 65 nm bulk CMOS 공정을 이용하여 설계 및 제작되었다. 믹서는 double balanced 구조로 수동형으로 설계되어 전력 소모가 없으며, RF와 LO 입력 전압을 증폭하기 위해 LC 공진을 활용한 Q-factor 부스팅 정합 회로와 변환된 IF 신호를 정확히 분리하기 위한 RC 필터 회로를 포함한다. 제작된 믹서는 RF 및 DC 패드를 포함한 크기가 0.614×0.25 mm²이며, 측정 결과 77~81 GHz 대역에서 8 dB 이상의 입력 반사 손실, -5.5 dB의 최대 변환 이득, 그리고 37.3 dB의 RF-IF 격리도를 달성하였다.

Abstract

This paper discusses the design of a W-band down-conversion mixer, fabricated using a 65-nm bulk CMOS process. The mixer employs a passive double-balanced structure, resulting in no power consumption. It includes LC matching circuits for RF and LO input voltage amplification via resonance and RC filter circuits for precise IF signal separation. The manufactured mixer measured 0.614×0.25 mm², including RF and DC pads. Measurement results showed input return losses of more than 8 dB, a maximum conversion gain of -5.5 dB, and RF-IF isolation of 37.3 dB at 77 - 81 GHz.

Key words: Down-Conversion, Passive Mixer, Radar, Receiver, W-Band

I. 서 론

W 주파수 대역(75~110 GHz)은 넓은 주파수 대역과 높은 분해능을 제공하여 고속 무선 통신 및 고성능 레이다 시스템을 위한 주요 대역으로 사용되고 있다. CMOS

공정의 발전으로 인해, W 대역에서의 회로를 저비용 고 집적으로 제작할 수 있게 되었으며, 최근에는 차량용 및 초정밀 레벨 센서를 위한 근거리 레이다(SRR, short range radar) RFIC에 관한 연구가 77~81 GHz 주파수 대역에서 진행 중이다^{[1],[2]}. 레이다 시스템의 송수신기에서 하향 변

「본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-004).」
충남대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungnam National University)

1: 박사과정(<https://orcid.org/0000-0003-3736-2753>), 2: 박사과정(<https://orcid.org/0000-0002-2698-6942>),

3: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0001-6616-6503>), 4: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0003-4794-5813>),

5: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-6873-9034>), 6: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-3651-4498>),

7: 학사과정(<https://orcid.org/0009-0001-9103>), 8: 학사과정(<https://orcid.org/0009-0007-5828-499X>),

9: 박사후연구원(<https://orcid.org/0000-0002-3835-2226>), 10: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-5532-7399>)

· Manuscript received October 7, 2023 ; Revised October 24, 2023 ; Accepted October 31, 2023. (ID No. 20231007-083)

· Corresponding Author: Choul-Young Kim (e-mail: cykim@cnu.ac.kr)

환 믹서는 초고주파(RF, radio frequency) 신호를 이용해 감지된 목표에 대한 정보를 처리하기 위해 중간주파수(IF, intermediate frequency) 신호로 변환하는 핵심 회로이다. 하향 변환 믹서의 성능은 변환 이득, 국부 발진기(LO, local oscillator)의 구동 레벨, 잡음지수(NF, noise figure) 전력 소비 사이에 절충이 필요하며, 우수한 선형성과 높은 단자 간 격리도가 요구된다^{[3][4]}.

본 논문에서는 W 대역 FMCW(frequency modulation continuous wave) 레이더 수신기에 적용 가능한 하향 변환 믹서의 설계 결과를 제시한다. 설계된 믹서는 입력 전압을 증폭하기 위해 인덕터와 커패시터의 공진을 이용한 정합 회로로 포함하며, 동일 위상 직교(IQ, inphase/ quadrature) 믹서로 확장하여 가능하다.

II. 하향 변환 믹서 설계

그림 1은 FMCW 레이더 시스템의 IQ 수신단 블록도 예시이다. RF 단자로 수신된 신호는 저잡음 증폭기를 거쳐 증폭된 후 LO 신호와 혼합되어 IF 주파수로 하향 변환된다. IQ 믹서를 사용한 수신기는 단일 믹서만을 사용한 구조 비교하여 대상의 속도, 위치 및 도플러 처리(Doppler processing)를 통한 이동 방향과 관련된 정보를 쉽게 추출할 수 있는 장점을 가지며, 영상 주파수(image frequency)를 억제할 수 있다. 이를 위해서는 동일 위상의 RF 신호와 다상(poly-phase) LO 신호가 필요하며, I와 Q 신호를 출력하기 위해 두 개의 믹서가 필요하다. LO 입력단에서 다상 신호를 생성하기 위한 회로가 있다면, 두 개의 IQ 믹서는 같은 구조의 믹서가 사용된다. 따라서, 우수한 수신기 개발을 위해 단일 하향 변환 믹서의 최적화 및 소형

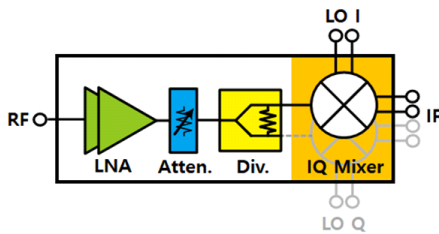


그림 1. FMCW 레이더를 위한 IQ 수신단 블록도
Fig. 1. Block diagram of the IQ receiver for FMCW radar.

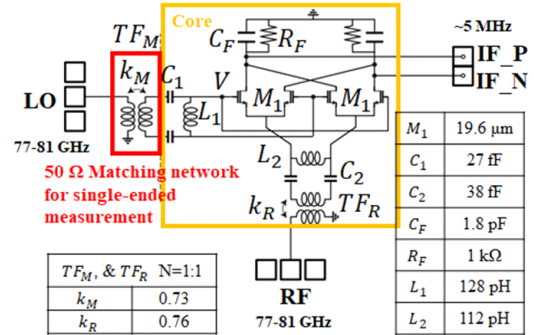


그림 2. 하향 변환 믹서의 회로도
Fig. 2. Schematic of the down-conversion mixer.

화하는 것이 필요하다.

그림 2는 설계한 하향 변환 믹서의 회로도를 나타낸다. 믹서는 77~81 GHz의 RF와 LO 신호 입력으로부터 최대 5 MHz까지의 IF 신호로 하향 변환한다. 설계에 사용된 소자는 인덕터(L)와 변압기(TF)를 제외하고 공정에서 제공하는 PDK(process design kit)를 사용하였다. W 대역에서는 소자의 연결에 필요한 선로 사이와 실리콘 기판과 금속 사이에서 발생하는 기생 소자의 값의 영향이 크다. 이를 반영하기 위해 전자기장(EM, electromagnetic) 시뮬레이션을 이용하였다. 그림 3은 설계된 L과 TF의 EM 구조이다. 평면형 인덕터 구조를 사용하였으며, TF의 경우 다층 1:1 변압기 구조를 사용하였다. RF와 LO는 각 50 Ω 과 차동 100 Ω 정합을 했으며, 각 정합 회로는 LC 공진을 이용해 동작 주파수에서 전압 증폭을 얻는 Q-factor 부스팅 기술이 적용되었다^[5]. 특히, RF 정합 회로는 변압기 TF_R 를 이용해 정합 회로를 최적화하였다. 측정을 위해

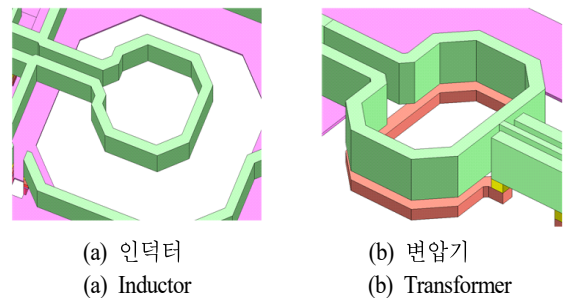


그림 3. EM 구조
Fig. 3. EM structure.

단일 입력을 차동 LO 신호로 변환하기 위해 변압기 TF_M 을 사용하여 50 Ω 정합하였다.

IF 출력은 RF, LO 신호와 원치 않는 고주파 성분을 제거하기 위해 RC 필터를 적용하였다. 필터는 여유를 고려하여 목표 IF 주파수인 5 MHz 보다 넓은 차단 주파수를 갖도록 결정하였다.

III. 측정 결과

그림 4는 65 nm bulk CMOS 공정을 이용해 제작된 믹서의 현미경사진이다. 측정을 위해 추가된 차동-단일 LO 정합 회로를 제외한 크기는 $0.39 \times 0.144 \text{ mm}^2$ 이다. 그림 5는 믹서 측정을 위한 환경을 나타낸다. 신호 발생기와 W 대역 주파수 확장기를 이용하여 RF와 LO 신호를 인가하였으며, 오실로스코프를 통해 IF 출력을 확인하였다.

그림 6은 S 파라미터 측정 결과이고, 그림 7은 입력 신호를 변화하며 오실로스코프로 측정한 IF 출력을 이용해

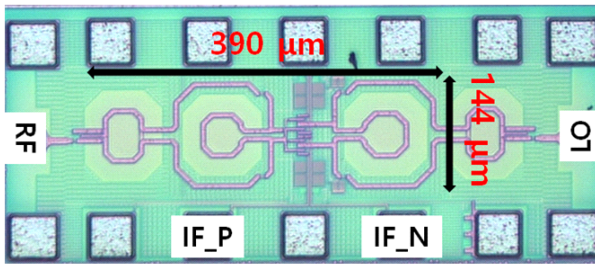


그림 4. 제작된 하향 변환 믹서의 현미경사진
Fig. 4. Microphotography of the down-conversion mixer.

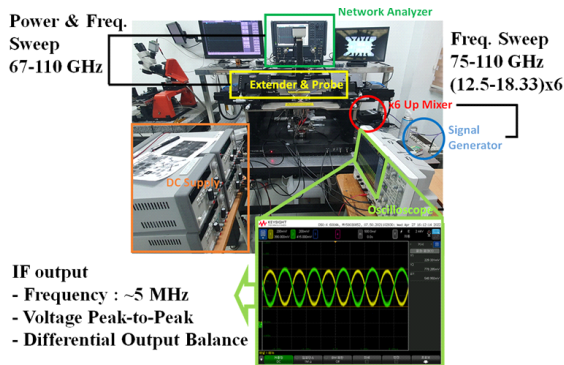


그림 5. 측정 환경
Fig. 5. Measurement environment.

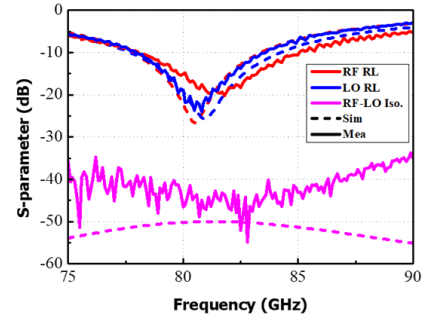
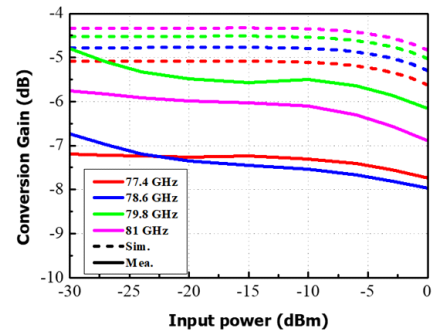
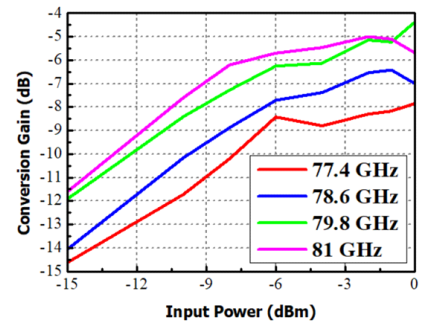


그림 6. S 파라미터 측정 결과
Fig. 6. Measurement result of S-parameter.



(a) RF



(b) LO

그림 7. 입력 전력에 대한 변환 이득
Fig. 7. Conversion gain to input power.

계산한 변환 이득을 나타낸다. 77~81 GHz 대역에서 RF와 LO 입력 반사 손실은 8 dB 이상이며, RF-LO 격리도는 37.3 dB 이상이다. LO 입력 정합은 시뮬레이션과 거의 일치하는 것과 달리 RF 입력 정합은 고주파로 이동하였다. 이에 따라 변환 이득은 77~81 GHz 대역에서 고주파 쪽은 시뮬레이션과 거의 일치하나 저주파 쪽은 감소하였다.

표 1. 하향 변환 믹서 성능 비교

Table 1. Comparison with other works.

Ref.	This work	[3]	[4]	[2]
Tech.	65 nm CMOS	65 nm CMOS	65 nm CMOS	90 nm CMOS
Topology	LCL Q-boosted MN	TML	Inductance gm-boosted	TML, Marchand Balun
Freq. [GHz]	77~81	75~90	75~81	75~85
Conv. gain [dB]	-5.5~-7.5	5	1.6	-1~1.5
LO power [dBm]	>-9	0	-5	5
RF-LO Iso. [dB]	>37.3	>33	>38	>43.5
IP1dB [dBm]	0	2.5	-16.2	-9
IIP3 [dBm]	9*	13.2	-6.6	2.7
NF [dB]	9.6*	N/A	13	23.3
P _{dc} [mW]	0	12	12	13
Type	Passive	Active	Active	Active
IF buffer	N	Y	N	Y
Area [mm ²]	0.056	0.14	0.31	0.62

* Simulation results

표 1은 설계한 믹서와 기존 연구 간의 성능 비교를 나타낸다. 제작된 믹서는 수동형 믹서로 전력을 소모하지 않고, 능동 믹서와 IF 구동 증폭기를 포함하지 않음에도 높은 변환 이득을 갖는다.

IV. 결 론

본 논문에서는 W 대역 레이더 시스템의 IQ 수신단을 위한 하향 변환 믹서를 1P9M 65nm bulk CMOS 공정을 사용하여 설계 및 제작하였다. 설계된 믹서는 입력 전압 증폭을 위해 LC 공진 정합 회로를 사용하였다.

References

- [1] R. Huang, C. W. Chiang, C. J. Liang, Y. Kim, Y. C. Kuan, and M. C. F. Chang, "A W-band 4-GHz BW multiuser interference-tolerant radar with 28-nm CMOS front ends," *IEEE Solid-State Circuits Letters*, vol. 3, pp. 414-417, Sep. 2020.
- [2] S. Trotta, M. Wintermantel, J. Dixon, U. Moeller, R. Jammers, and T. Hauck, et al., "An RCP packaged transceiver chipset for automotive LRR and SRR systems in SiGe BiCMOS technology," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 3, pp. 778-794, Mar. 2012.
- [3] H. Duan, J. Chen, M. Wang, H. Wei, Q. Zhang, and H. Quan, "High linearity wide band passive mixer for Ku-band applications in a 180nm CMOS technology," in *2022 7th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems(ICICM)*, Xi'an, Oct. 2022, pp. 565-569.
- [4] Y. Liu, Y. Fang, and H. Gao, "A 60 GHz down-conversion passive mixer in 65 nm CMOS technology," in *2021 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, Nanjing, May 2021, pp. 1-3.
- [5] H. M. Oh, J. S. Kim, J. T. Lim, and C. Y. Kim, "A 2.4-GHz high conversion gain passive mixer using Q-boosted π -type LCL matching networks in 90-nm CMOS," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 27, no. 8, pp. 736-738, Aug. 2017.