

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.4.129
JIIBC 2020-4-18

W-band 레이더 수신기용 온도보상회로 설계

Design of Temperature Compensation Circuit for W-band Radar Receiver

이동주*, 김완식*, 권준범*, 서미희**, 김소수**

Dongju Lee*, Wansik Kim*, Jun-Beom Kwon*, Mihui Seo**, Sosu Kim**

요약 본 논문에서는 W-대역 저잡음증폭기의 온도에 따른 이득 변동을 경감시킬 수 있는 온도보상회로를 기술하였다. 제안된 캐스코드 온도보상 바이어스회로는 공통-소스 저잡음증폭기의 게이트 바이어스를 자동으로 조절하여 소신호 이득의 변화를 억제한다. 설계된 회로는 100-nm GaAs pHEMT 공정 디자인킷으로 구현되었다. 제안된 바이어스 회로를 적용한 W-대역 저잡음증폭기의 시뮬레이션 이득값은 $-35\sim 71^{\circ}\text{C}$ 범위에서 20 dB 이상, ± 0.8 dB 내의 변동값을 보였다. 본 논문에서 제시한 회로는 레이더용 밀리미터파 수신기에 적용되어 안정적인 성능을 낼 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract In this paper, a temperature compensation circuit is presented in order to mitigate gain variability due to temperature in the W-band low-noise amplifier (LNA). The proposed cascode temperature compensation bias circuit automatically controls gate bias voltages of the common-source LNA in order to suppress variations of small-signal gain. The designed circuit was realized in a 100-nm GaAs pHEMT process. The simulated voltage gain of W-band LNA including the proposed bias circuit is >20 dB with gain variability less than ± 0.8 dB in the range of temperatures between -35 to 71°C . We expect that the proposed circuit contributes to millimeter-wave receivers for stable performances in radar applications.

Key Words : GaAs pHEMT, LNA, millimeter wave, MMIC, temperature compensation, W-band

1. 서론

밀리미터파 대역 중에서 W-대역 (75-110 GHz)은 파장이 짧고 넓은 동작주파수 대역을 가지므로 고해상도 탐지에 적합하며, RF 부품들의 소형화 및 경량화가 가능하여 방산분야에서는 주로 레이더 시스템 분야에서 활발하게 연구가 진행되고 있다^[1-5]. 레이더 송수신부를 구성하는 RF 부품인 MMIC (Monolithic Microwave Integrated

Circuit)의 경우 밀리미터파 대역에서는 수출면허계획에 의해 수입에 제한이 따르며, 부품단가가 높기 때문에 핵심 부품들의 적극적인 국산화를 통해 국내환경에 적합한 RF 송수신단의 개발이 요구된다.

밀리미터파 대역에서는 100-nm GaAs HEMT 공정을 활용한 저잡음증폭기 (Low-Noise Amplifier)들이 제안되었다^[6-7]. 특히 100-nm GaAs pHEMT 공정은 기존 150-nm GaAs 공정에 비해 W-대역에서 이득 및 잡

*정회원, LIG넥스원(주)

**비회원, 국방과학연구소

접수일자 2020년 6월 11일, 수정완료 2020년 7월 11일
게재확정일자 2020년 8월 7일

Received: 11 June, 2020 / Revised: 11 July, 2020 /

Accepted: 7 August, 2020

*Corresponding Author: dongju.lee@lignex1.com

Dept of RF Seeker R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

음지수 특성이 우수하며, mHEMT 공정보다 breakdown voltage가 높으므로 밀리미터파 수신부에 적합한 공정이 라고 할 수 있다. 다만 위 연구결과들의 주요 성능값은 외부온도가 변함에 따라 특성이 달라질 수 있다. 특히 고 이득 특성을 갖는 저잡음증폭기의 경우 고온에서 이득 및 잡음지수가 나빠질 수 있으며, 저온에서는 전류소모 및 이득이 커지므로 발전의 위험성이 존재한다. 온도에 따라 변화된 이득값은 중간주파수 단에서 이득을 조절하 여 보상할 수 있지만, 열화된 잡음지수를 보상하기는 어 려우므로 안정적인 레이더 시스템 운용을 위해서는 온도 에 둔감한 저잡음증폭기 설계가 필요하다.

증폭기에서 온도보상 방식으로는 크게 감쇄기를 이용 하는 방식과 증폭기의 바이어스를 조절하는 방식으로 나 눌 수 있으며, 밀리미터파 대역에서는 추가 삽입손실이 없으며 상대적으로 간단한 구조를 가지는 게이트 바이어 스 회로들이 제안되었다^[8-10].

본 논문에서는 100-nm GaAs pHEMT 공정을 이용 하여 W-대역 저잡음증폭기에 적용 가능한 온도보상회로 를 설계하였으며, 이득 변동을 줄이고자 하였다. 이를 위 해 같은 공정으로 W-대역 저잡음증폭기를 제작 및 측정 하여 특성을 사전 검증하여 설계에 반영하였다.

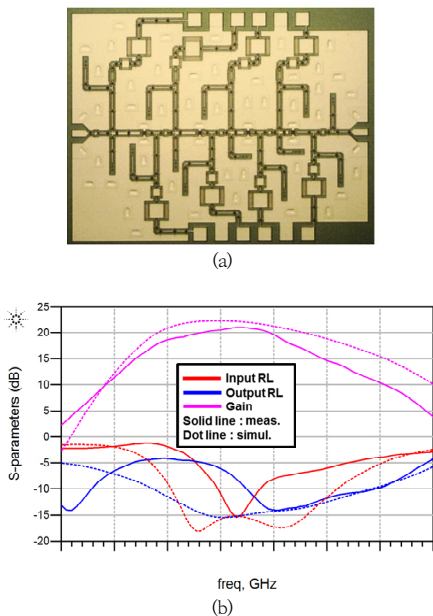


그림 1. 개발된 W-대역 저잡음증폭기 (a) 사진 (b) S-파라미터 측정결과
 Fig. 1. Fabricated W-band LNA (a) photograph (b) Measured S-parameter results

II. 온도보상회로 설계

1. W-대역 저잡음증폭기 MMIC

그림 1은 개발된 수신부용 W-대역 저잡음증폭기를 나타내고 있다. 목표 성능은 전압이득 20 dB 이상, 잡음 지수 5 dB 이하이며, 밀리미터파 대역에서 목표 이득을 달성하기 위해 4-stage 다단구조를 채택하였다. 높은 전압이득 및 낮은 잡음지수를 얻기 위해 $2 \times 25 \mu\text{m}$ 소자를 사용하였으며, Win Semiconductor의 6인치 100-nm GaAs pHEMT 공정을 이용하여 제작되었다. On-wafer probing 측정으로 얻은 s-parameter 결과는 W-대역 주파수에서 0 dB 이상, 중심주파수에서 20.5 dB 의 전압이득을 나타내고 있다.

표 1. W-대역 저잡음증폭기 측정결과

Table 1. Measurement results of the W-band LNA

	시뮬레이션	측정결과
전압이득	22 dB	20.5 dB
잡음지수	3.9 dB	3.3 dB
입력 P1dB	-12 dBm	-12 dBm

2. 온도보상회로 구조

저잡음증폭기의 온도보상 구조를 그림 2에 나타내었 다. 기준 게이트 바이어스 전압은 $V_{g1} = V_{g2} = -0.5 \text{ V}$, $V_{g3} = V_{g4} = -0.3 \text{ V}$ 이며, V_{g1} 및 V_{g2} 를 별도의 on-chip 온도보상회로에서 조절하여 온도 변화에 따른 증폭기의 이득 변동을 줄이고자 하였다. 저잡음증폭기의 앞 두 단은 트랜지스터 크기 및 게이트 전압이 동일하므 로 하나의 바이어스 회로로 전압 조절이 가능하며, 앞 두 단의 게이트 전압만 조절하여도 필요한 만큼의 이득조절 이 가능하다. V_{g3} , V_{g4} 및 드레인 전압은 출력단의 선형 성에 영향을 줄 수 있으므로 별도의 조절을 하지 않았다.

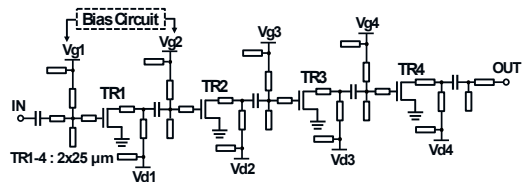


그림 2. W-대역 저잡음증폭기의 온도보상 구조

Fig. 2. Structure of the temperature compensation of W-band LNA

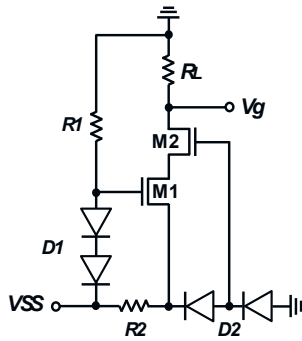


그림 3. 제안된 캐스코드 온도보상회로
 Fig. 3. Proposed cascode temperature compensation circuit

제안된 캐스코드 온도보상회로 구조를 그림 3에 나타내었다. 이 회로는 외부전원 VSS를 받아들여 Vg 전압을 출력하며, 저잡음증폭기의 게이트 바이어스 회로로 사용된다.

다이오드를 활용한 온도보상회로의 동작원리는 여러 문헌을 통해 보고되었다^{[8][10]}. 온도가 증가함에 따라 다이오드의 임계전압이 감소하여 R2에 걸리는 전압이 증가하므로 M1의 소스 전압이 증가하며, R1에 걸리는 전압 또한 증가하므로 M1의 게이트 전압이 줄어들어 M1의 Vgs가 줄어들게 된다. 즉, M1의 드레인 전류가 감소하므로 출력 Vg 값이 증가하여 고온에서 감소된 증폭기 이득을 보상할 수 있다. 온도가 감소할 경우 반대로 M1의 Vgs가 증가하므로 출력 Vg 레벨이 줄어들어 증폭기의 이득을 줄이는 방향으로 작용하게 된다.

제안된 온도보상회로는 기존방식과 달리 캐스코드 구조를 채택하였으며, 출력 임피던스가 높으므로 출력 Vg가 변하더라도 드레인 전류의 변동이 적고, 공통-소스 증폭기에 비해 같은 크기의 다이오드 사용시 더 큰 전압이득을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 온도변화에 따른 충분한 출력 Vg 값을 얻기 위해 다이오드 2개를 직렬로 연결하였으며 각 다이오드의 임계전압은 약 0.95 V이다. 이때 다이오드 D1 및 D2를 동시에 동작시키면서 M1에 적정 Vgs를 인가하기 위해 VSS는 -5 V로 선정하였다. M2의 게이트 바이어스는 그림 3과 같이 다이오드를 사용하여 인가하였으므로 별도의 저장분배 회로 등을 줄일 수 있으며, M2의 게이트 바이어스는 다이오드의 온도특성에 따라 변하므로 출력 Vg 변동에 기여할 수 있다는 장점이 있다.

III. 시뮬레이션 및 결과

그림 4는 설계된 온도보상회로의 DC 시뮬레이션 결과를 보여준다.

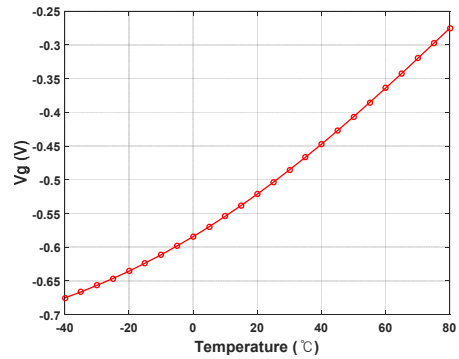


그림 4. 온도보상회로의 출력 전압
 Fig. 4. Output voltage of the temperature compensation circuit

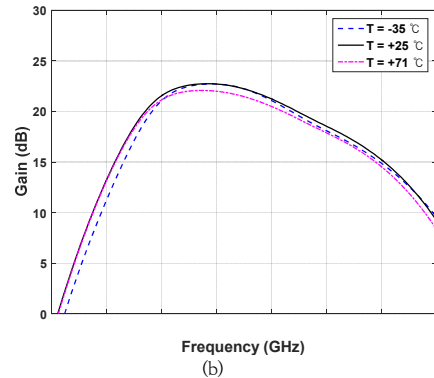
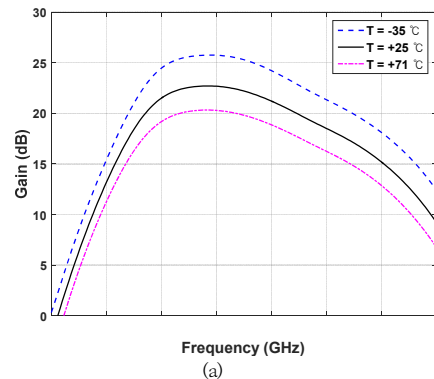


그림 5. 저잡음증폭기의 이득 시뮬레이션 결과:
 (a) 온도보상회로 미포함 (b) 온도보상회로 포함
 Fig. 5. Simulated gain results of the low-noise amplifier:
 (a) without temperature compensation circuit (b) with temperature compensation circuit

그림 4와 같이 기준 출력 전압이 $-0.5 \text{ V}@-25 \text{ }^\circ\text{C}$ 가 되도록 부하저항 R_L 을 조정하였으며, 다이오드 크기 및 R_1 , R_2 값을 조정하여 온도에 따른 그래프의 기울기 및 출력 전압을 조정하였다. 온도보상회로의 출력 전압은 비선형 특성을 가지므로, $-35 \sim +71 \text{ }^\circ\text{C}$ 온도 범위에서 저잡음증폭기의 이득 편차가 $\pm 1 \text{ dB}$ 이하가 되도록 최적화하였다. 이 때 온도보상회로의 출력전압 범위는 $-0.66 \sim -0.32 \text{ V}$ 이다.

저잡음증폭기의 이득 특성을 그림 5에 나타내었다. 저잡음증폭기의 이득 특성은 그림 5(a)와 같이 기준주파수에서 약 5.4 dB 의 이득변동이 존재한다. 온도보상회로 적용시 그림 5(b)와 같이 이득 변동을 줄일 수 있으며, 기준주파수에서 이득 변동은 약 0.76 dB 로 목표값인 $\pm 1 \text{ dB}$ 이내의 이득값을 달성하였다.

설계된 온도보상회로는 저잡음증폭기와 동일한 공정인 100-nm GaAs pHEMT 공정을 이용하여 제작되었으며, 그림 6는 제작된 회로의 레이아웃을 보여준다. 칩의 면적은 테스트용 DC 패드를 포함하여 $350 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 이다.

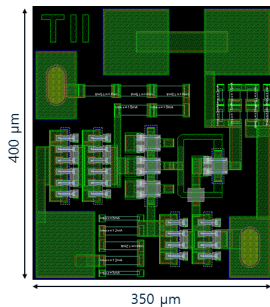


그림 6. 온도보상회로 레이아웃
Fig. 6. Layout of the temperature compensation circuit

IV. 결 론

본 논문에서는 100-nm GaAs pHEMT 공정을 활용하여 W-대역 저잡음증폭기에 적용 가능한 온도보상회로를 설계하였다. W-대역에서 추가손실이 있는 감쇄기 혹은 디지털 제어 방식 대신 다이오드의 온도특성을 활용한 게이트 바이어스 조절방식의 온도보상회로를 설계 및 적용하였다. 해당 회로가 적용된 W-대역 저잡음증폭기의 이득 변동을 $\pm 1 \text{ dB}$ 이내로 조절 가능함을 확인하였다.

References

- [1] Seokchul Lee *et al.*, "W-Band Multichannel FMCW Radar Sensor With Switching-TX Antennas", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 14, pp. 5572-5582, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2567450>
- [2] Wansik Kim *et al.*, "Development and Manufacture of W-band MMIC Chips and manufacture of Transceiver", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC)*, Vol. 19, No. 6, pp. 175-81, 2019. DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.6.163>
- [3] Young-Gon Kim *et al.*, "Transceiver Module for W-band Compact Radar", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC)*, Vol. 18, No. 2, pp. 27-32, 2018. DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.2.27>
- [4] Hong-Gu Ji, "Monolithic Integrated Amplifier for Millimeter Wave Band", *The Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS)*, Vol. 11, No. 10, pp. 3917-3922, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.10.3917>
- [5] Seonghan Ryu, "W-band Downconversion Mixer with Finline Transition for Intelligent Traffic System", *The Journal of KIIT*, Vol. 14, No. 10, pp. 37-42, 2016.
- [6] A. Dyskin, D. Ritter, and I. Kalfass, "Ultra wideband cascaded low noise amplifier implemented in 100-nm GaAs metamorphic-HEMT technology", *2012 International Symposium on Signals, Systems, and Electronics (ISSSE)*, Potsdam, pp. 1-4, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSSE.2012.6374348>
- [7] A. Bessemoulin *et al.*, "0.1- μm GaAs PHEMT W-band low noise amplifier MMIC using coplanar waveguide technology", *2014 1st Australian Microwave Symposium (AMS)*, Melbourne, VIC, pp. 1-2, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/AUSMS.2014.7017336>
- [8] K. Yamanaka *et al.*, "Ku-band low noise MMIC amplifier with bias circuit for compensation of temperature dependence and process variation", *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, 2002, pp. 1427-1430, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2002.1012123>
- [9] T. Yoshida, K. Takano, C. Y. Li, M. Motoyoshi, K. Katayama, S. Amakawa, and M. Fujishima, "CMOS power amplifier with temperature compensation for 79 GHz radar system", *IEEE APMC 2013*, pp. 239-241, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/APMC.2013.6695106>
- [10] S. Lee *et al.*, "W-band dual-channel receiver with active power divider and temperature-compensated circuit", *Electron. Lett.*, Vol. 52, pp. 850-851, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/el.2015.3781>

저 자 소 개

이 동 주(정회원)



- 2005년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
- 2008년 2월: 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 (공학석사)
- 2016년 8월: 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 (공학박사)
- 2016년 9월 ~ 현재: LIG넥스원(주) 선임연구원

• 주 관심분야 : mm-Wave MMIC 및 시스템 설계

김 완 식(정회원)

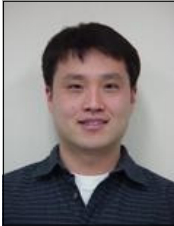


- 1991년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
- 1993년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2004년 2월: 건국대학교 정보통신공학과 (공학박사)
- 2001년 12월 ~ 2005년 7월: 고등기술연구원 책임연구원

• 2005년 8월 ~ 현재: LIG넥스원(주) 수석연구원

• 주 관심분야 : 초고주파 회로설계, 밀리미터파시스템, MMIC, 레이더 관련 센서시스템

권 준 범(정회원)



- 1997년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
- 1999년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원

• 주 관심분야 : 마이크로파 신호처리, 마이크로파 탐색기

서 미 희(비회원)



- 2006년 2월 : 고려대학교 물리학과(이학사)
- 2013년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
- 2013년 3월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원

• 주 관심분야 : 초고주파 탐색기 송수신기

김 소 수(비회원)



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

• 주 관심분야 : 초고주파 탐색기 시스템

※ 본 연구는 국방과학연구소 계약번호 UC170028FD에 의하여 지원된 과제로 수행되었습니다.