

## 적응형 레이더를 위한 다중대역 혼합기에 관한 연구

고민호\* · 강세벽\*

## The Study on Multi-band Mixer for Adaptive Radar

Min-Ho Go\* · Se-Byeok Kang\*

## 요약

본 논문은 능동소자에 인가되는 게이트 바이어스 전압을 가변하여 X-, K- 및 Ka-대역 신호를 선택적으로 변환할 수 있는 다중대역 혼합기를 제안하였다. 제안한 다중대역 혼합기는 LO 전력 +6 dBm으로 구동하였고 X-대역의 경우, 게이트 바이어스 전압 -0.8 V에서 변환손실 -10 dB 특성, K-대역에서 게이트 바이어스 전압 -0.3 V에서 변환손실 -9 dB 특성, Ka-대역에서는 게이트 바이어스 전압 -0.2 V에서 변환손실 -7.0 dB 특성을 나타내었다. 모든 대역에서 1-dB 압축점 (P1dB)은 +0.5 dBm 특성을 나타내었다.

## ABSTRACT

This paper presents the multi-band mixer which converts a X-, K- and Ka-band adaptively by adjusting the gate-bias voltage of an active device. The proposed mixer presented a conversion loss of -10 dB at -0.8 V gate-bias voltage for X-band, a conversion loss of -9 dB at -0.3 V gate-bias voltage for K-band and for Ka-band, a conversion loss of -7 dB at -0.2 V gate-bias voltage under the LO power of +6.0 dBm. The 1dB compression point (P1dB) is +0.5 dBm for all band.

## 키워드

Adaptive Radar, Mixer, Multi-Band, Active Device  
적응형 레이더, 혼합기, 다중대역, 능동소자

## 1. 서론

4차 산업혁명 기술의 발전으로 종래의 적응형 레이더(Adaptive Radar) 보다 진보한 인공지능을 이용한 인지 레이더(Cognitive Radar)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-2]. 이러한 레이더 기술은 동시에 다기능의 전자적 조향이 가능한 AESA 레이더 (Active Electrically Scanned Array Radar)를 기반으로 다양

한 운용 환경에서 운용주파수/대역폭, 송신파형/출력, 펄스반복주기/펄스폭 및 신호처리 파라미터 등 레이더 파라미터를 적응적으로 변화시켜 최적의 탐지/추적 성능이 가능하도록 한다. 본 논문에서는 능동소자에 인가하는 바이어스 전압에 따라 특정 고조파 성분이 최대가 되는 특성을 이용하여 운용 주파수 대역을 변화시킬 수 있는 적응형 레이더를 위한 다중대역 혼합기를 제안한다.

\* 한화시스템 레이더체계3팀  
전문연구원 (sb.kang@hanwha.com)  
\* 교신저자: 한화시스템 레이더체계3팀  
• 접수일 : 2021. 10. 07  
• 수정완료일 : 2021. 11. 11  
• 게재확정일 : 2021. 12. 17

• Received : Oct. 07, 2021, Revised : Nov. 11, 2021, Accepted : Dec. 17, 2021  
• Corresponding Author : Min-Ho Go  
Radar System 3 Team, Hanwha Systems  
Email : minho0423.go@hanwha.com

## II. 동작원리

전계효과트랜지스터(MESFET) 능동소자의 비선형 성분 중에서 드레인 신호의 클램핑(Clipping)이 고조파 발생에 가장 큰 영향을 미친다. 클램핑된 출력 전압 파형이나 전류 파형이 비대칭적인 경우에는 짝수향 고조파 성분이 증가하고, 대칭일 경우는 홀수향 고조파 성분이 증가하는 특성을 갖는다[3]. 능동소자에 인가되는 게이트 바이어스 전압 조건을 조절하여 드레인 클램핑 파형을 변화시켜 짝수향 또는 홀수향 고조파 성분을 선택적으로 증가시킬 수 있다[4]. 그림 1은 게이트 전압에 따른 출력 고조파 특성을 나타내었다. 2차 짝수향 고조파 성분( $2\omega_{LO}$ )의 크기는 게이트 바이어스 전압  $-0.4\text{ V} \sim -0.3\text{ V}$ 에서 최대가 되고, 3차 홀수향 고조파 성분( $3\omega_{LO}$ )의 크기는  $-0.6\text{ V} \sim -0.5\text{ V}$ 에서 최대값을 갖는다. 반면에 기본파 성분( $\omega_{LO}$ )의 크기는 비교적 넓은 게이트 바이어스 전압  $-1.0\text{ V} \sim -0.4\text{ V}$  범위에서 2차 및 3차 고조파 성분보다 큰 특성을 갖는다.

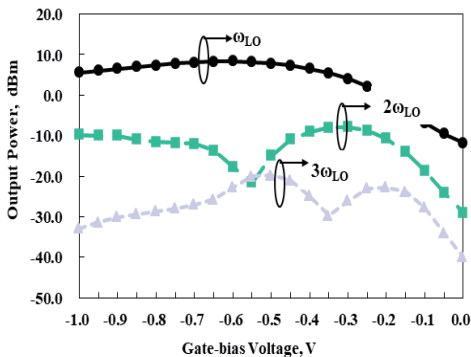


그림 1. 게이트 전압에 따른 출력 고조파 특성  
Fig. 1 Output harmonic generation as the gate bias

제안하는 다중대역 혼합기는 단일 능동소자의 게이트 전압을 선택적으로 적용하여 입력 RF 신호( $\omega_{RF}$ )와 국부 LO 신호( $\omega_{LO}$ )의 주파수 혼합으로 발생하는 출력 IF 신호( $\omega_{IF}$ )의 진폭 크기를 특정 운용 대역에서 최대가 되도록 하는 방식이다[5]. 즉, 운용 대역에 따라 게이트 바이어스 전압을 가변하여 혼합기를 기

본과 혼합기, 2차 및 3차 고조파 혼합기로 동작하게 한다. 그림 2는 다중대역 혼합기의 동작 원리를 설명하기 위한 것으로 X-대역에서는 게이트 바이어스 전압( $V_g$ )을 선택하여 기본파 LO 신호( $\omega_{LO}$ )가 크게 되어 출력 IF 신호( $|\omega_{LO} \pm \omega_{RF(X)}|$ )의 크기는 최대가 되는 기본파 혼합기, K-대역에서는 2차 LO 신호( $2\omega_{LO}$ )가 크게 되어 출력 IF 신호( $|2\omega_{LO} \pm \omega_{RF(K)}|$ )의 크기는 최대가 되는 2차 고조파 혼합기, Ka-대역에서는 3차 LO 신호( $3\omega_{LO}$ )가 크게 되어 출력 IF 신호( $|3\omega_{LO} \pm \omega_{RF(Ka)}|$ )의 크기는 최대가 되는 3차 고조파 혼합기로 동작한다. 각 운용 대역에서 발생하는 출력 IF 신호에서 RF 신호와 LO 신호의 합에 의한 고조파 성분들은 혼합기 출력의 저역통과필터(LPF)를 통해 억제되도록 한다. 게이트 커패시터( $c_g$ )와 드레인 커패시터( $c_d$ )는 각 단자로 유입되는 직류 신호를 차단하기 위하여 사용되며 실제 회로에서는 각 단자의 정합회로로 대체된다.

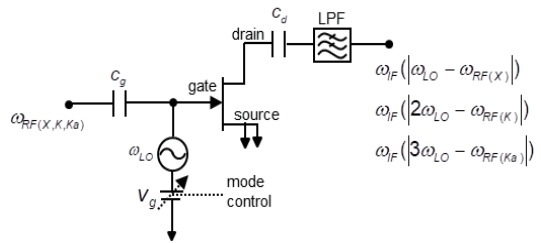


그림 2. 제안한 다중대역 혼합기 동작원리  
Fig. 2 Operation principal of the proposed multi-band mixer

## III. 설계

주파수 혼합기 설계를 위한 능동소자는 NEC사의 NE3210S01를 사용하였고, 제조사에서 제공하는 비선형 모델을 이용하였다. 주파수 혼합기는 국부 LO 신호에 의한 시변 비선형 특성을 갖기 때문에 각 단자의 대신호(large signal) 파라미터를 추출하여 설계해야한다[6]. 본 논문에서는 광대역 RF 및 LO 임피던스 정합 회로 구현의 한계로 각 단자에 요구되는 필터회로를 설계 후 HB(Harmonic Balance) 기법을 이용하여 원하는 성능을 만족하도록 정합회로 전송선로의

폭과 길이를 조절하였다[7].

그림 3은 RF 정합회로 및 IF 정합회로 특성을 나타내었다. RF 정합회로는 X-, K- 및 Ka-대역에서 대역저지 특성이 나타나지 않고 통과대역에서는 반사 손실이 최소가 되도록 전송선로로 구성하였다. IF 정합회로의 저역통과필터는 개방 스텐브의 길이와 각 스텐브 간의 거리를 최적화하여 IF 신호는 통과시키고 RF 및 LO 신호는 억압하도록 하였다. 특히 국부 LO 신호가 드레인으로 누설되어 초래되는 안정도 저하를 방지하기 위해 드레인 단자에 개방 스텐브를 적용하였다.

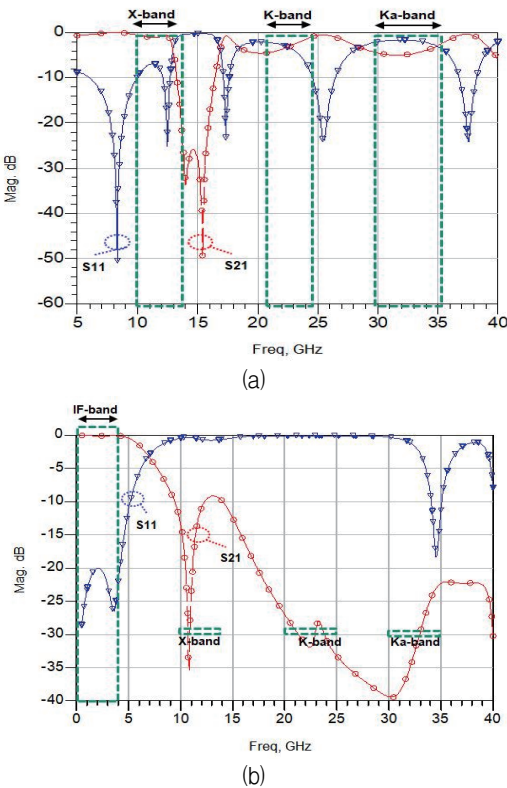


그림 3. 정합회로 특성 (a) RF 단자 (b) IF 단자  
Fig. 3 Matching circuit (a) RF port (b) IF port

LO 정합회로는 LO 신호의 고조파 성분들을 억압하기 위하여 대역통과필터를 적용하였다. X-대역에서 Ka-대역까지 넓은 RF 대역에서 안정도 확보를 위해 병렬 저항-커패시턴스로 구성된 안정화회로 (stability circuit)를 게이트 입력에 적용하였다. 안정적인 동작을 위해 발진 방지를 위한 안정화 회로를 정합회로와

바이어스 회로에 사용하였다. RF 입력 대역에서 각 단자의 필터회로, 게이트 바이어스 회로 및 소스단자의 비아홀은 EM 모멘텀 분석을 수행하였다[8]. 혼합기 회로 설계 및 분석은 Agilent사의 ADS(Advanced Design System)를 이용하였으며 설계 정확도를 높이기 위해 PCB 재질 정보, 능동소자의 비선형 파라미터 및 ADS에서 제공하는 수동소자 파라미터 라이브러리를 활용하였다. 그림 4는 설계한 다중대역 혼합기 회로도를 나타내었다.

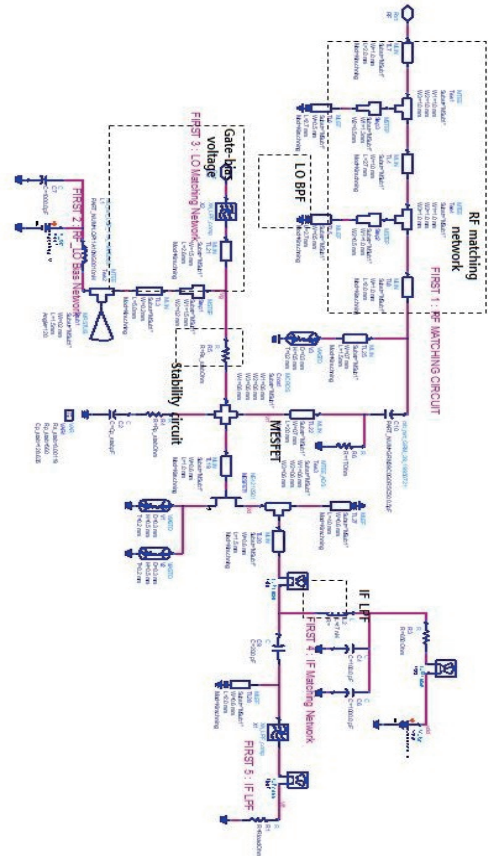


그림 4. 제안한 다중대역 혼합기 회로  
Fig. 4 Circuit diagram of the multi-band mixer

#### IV. 제작 및 실험

제작한 다중대역 혼합기 실물도를 그림 5에 나타내

었다. 제작에 사용한 PCB 기판은 유전율 2.17, 두께 0.5 mm, 도체 두께 18  $\mu\text{m}$ 의 테프론 기판을 이용하여 제작하였다. 측정 정확도를 확보하기 위하여 하우징 기구물을 제작하여 각 단자의 SMA 커넥터 및 전원/접지를 위한 핀을 기구물에 고정할 수 있도록 하였다. RF 단자와 LO 단자를 통한 신호 간섭을 최소화하기 위해 직교 방향이 되도록 배치하여 제작하였다.

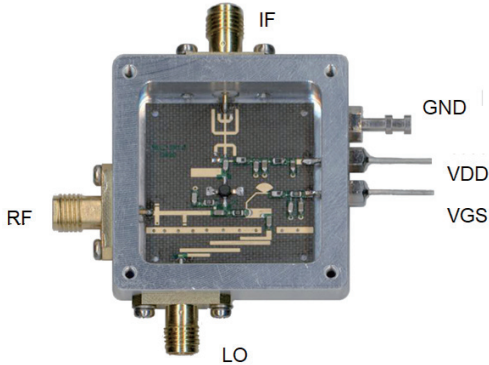


그림 5. 제작한 혼합기 실물도  
Fig. 5 Photograph of the fabricated mixer

그림 6은 LO 레벨 +6.0 dBm 구동 조건에서 게이트 바이어스 전압에 따른 대역별 변환손실 특성을 나타내었다. X-대역의 경우 게이트 바이어스 전압 -1.0 V ~ -0.8 V 범위의 핀치오프(Pinch-off) 영역과 게이트 바이어스 전압 -0.1 V ~ 0.0 V 범위의 순방향 바이어스 영역에서 -10 dB 변환손실 특성을 나타내고 있다. 순방향 바이어스 영역에서는 DC-RF 효율이 저하되고, 게이트 전류 증가로 인해 능동소자 손상 가능성이 있으므로 X-대역 동작을 위해서 게이트 바이어스 전압은 핀치오프 영역으로 선택하였다. K-대역은 게이트 바이어스 전압 -0.4 V ~ -0.3 V 범위에서 -9.0 dB 변환손실, Ka-대역은 게이트 바이어스 전압 -0.3 V ~ -0.2 V 범위에서 -7.0 dB 변환손실 특성을 나타내었다. 측정 결과를 통해 알 수 있듯이 운용 환경에 맞게 게이트 바이어스 전압을 가변하여 운용 주파수/대역을 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

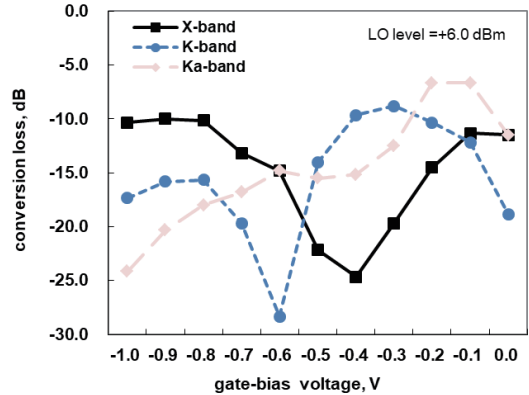


그림 6. 게이트 전압에 따른 변환손실 특성  
Fig. 6 Conversion loss performance with respect to gate-bias voltage

RF 전력 -30 dBm 주입 조건에서 LO 전력에 따른 다중대역 혼합기의 변환손실 특성을 그림 7에 나타내었다. X-대역은 게이트 전압 -0.8 V 조건에서 +1.0 dBm ~ +6 dBm LO 전력 범위에서 -10 dB 변환손실 특성을 나타내며, K-대역은 게이트 전압 -0.3 V 조건에서 +4.0 dBm ~ +7.0 dBm LO 전력 범위에서 -9.0 dB 변환손실을 갖는다. Ka-대역은 게이트 전압 -0.2 V 조건에서 +5 dBm 이상의 LO 전력에서 -7.0 dB 변환손실을 갖는다. 각 대역의 변환손실 특성을 고려하여 LO 전력은 +6.0 dBm으로 선택하였다.

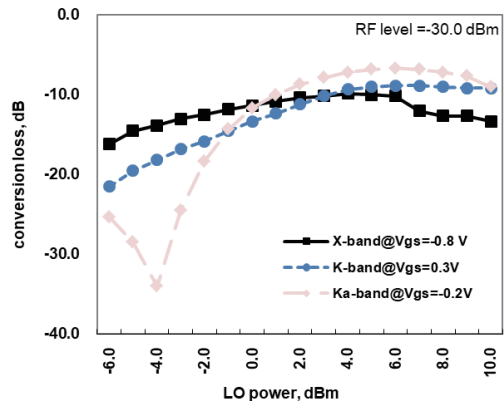


그림 7. LO 전력에 따른 변환손실 특성  
Fig. 7 Conversion loss performance with respect to LO power

그림 8은 RF 전력에 따른 다중대역 혼합기의 선형성 특성을 나타내었다. 측정 대역에 맞는 게이트 바이어스 전압으로 설정 후 RF 전력을 증가하면서 변환손실 특성을 측정하였다. 1-dB 압축점 (P1dB) 특성은 모든 대역에서 +0.5 dBm 특성을 나타내고 있다.

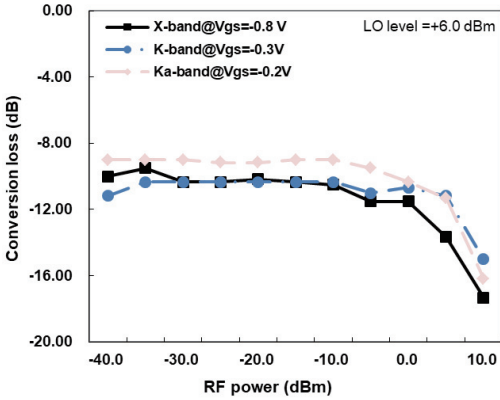


그림 8. RF 전력에 따른 변환손실 특성  
Fig. 8 Conversion loss performance with respect to RF power

그림 9는 Ka-대역에서 RF 주파수에 따른 변환손실 특성을 나타낸 것으로 33.50 GHz ~ 35.50 GHz 대역에서 변환손실 -7.0 dB ~ -8.0 dB 특성을 나타내었다. 측정 대역폭 2.0 GHz 내에서 1.0 dB 이내의 변환손실 변동으로 광대역 동작 특성을 나타내고 있다.

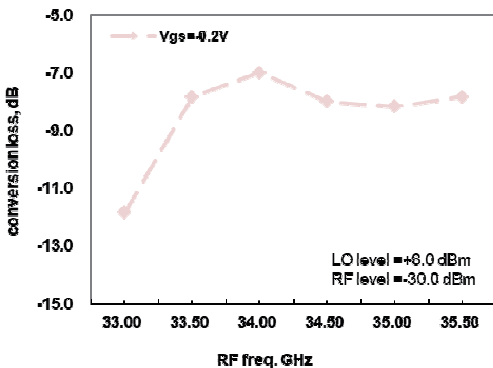


그림 9. Ka-대역에서 RF 주파수에 따른 변환손실 특성  
Fig. 9 Conversion loss performance with respect to RF frequency at Ka-band

표 1은 제안한 다중대역 혼합기의 특성을 다른 연구 결과물과 비교한 것으로 하나의 상용 능동소자를 이용하여 다중 대역 혼합기에 관한 연구 결과로는 현재까지는 유일하며, 상용 APD(Anti-Parallel Diode) 및 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)를 이용한 다중 대역 혼합기에 비해 설계 대역에서 낮은 변환손실 특성을 나타내고 있다.

표 1. 다중대역 혼합기 성능 비교  
Table 1. The comparison of multi-band mixer

Ref.	Band(GHz)	Device	Loss(dB)
This	X, K, Ka	SM FET	-10, -9, -7
[5]	X, K	SM APD	-10, -10
[7]	X, Ku, Ka	SM APD	-10, -10, -17
[9]	X, K	SM APD	-6.5, -16.6
[10]	16.5-33	MMIC	-10
[11]	18-26	MMIC	-11

- SM = Surfaced-mounted packaged

## V. 결 론

단일 능동소자의 게이트 바이어스 전압을 가변하여 X-, K- 및 Ka-대역에서 동작하는 다중대역 혼합기를 제안하였다. 다중대역 혼합기는 +6.0 dBm LO 전력에서 K-대역 동작 조건에서는 게이트 전압 -0.8 V에서 변환손실 -10 dB, X-대역 동작 조건에서는 게이트 전압 -0.3 V에서 변환손실 -9.0 dB 및 Ka-대역 동작 조건에서는 게이트 전압 -0.2 V에서 변환손실 -7.0 dB 특성을 나타내었다. 온도, 습도 등 운용 환경에서도 게이트 전압을 정밀하게 유지할 수 있는 방안에 대한 연구를 통해 적용형 레이더에 적용 가능할 것으로 사료된다.

## References

- [1] S. Haykin, "Cognitive radar: A way of the future," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 23, no. 1, Jan. 2006, pp. 30-40.
- [2] J. Jung and S. Park, "A Study on Adaptive Pattern Null Synthesis for Active Phased Array Antenna," *J. of the Korea Institute of*

*Electronic Communication Science*, vol. 16, no. 3, June 2021, pp. 407-416.

- [3] E. O'ciardha, "Generic-device frequency multiplier analysis a unified approach," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-48, no. 7, July 2000, pp. 1134-1141.
- [4] M. Go and S. Kang, "A New Third-Order Harmonic Mixer Design for Microwave Airborne Radar," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 15, no. 5, Oct. 2020, pp. 827-834.
- [5] J. Kim, Y. Joe, S. Kim, M. Go, and H. Park, "Design of Reconfigurable Mixer for Microwave Broadband Receiver," *J. of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 6, June 2015, pp. 533-539.
- [6] Y. H. Liew and J. Joe, "RF and IF ports Matching Circuit synthesis for a Simultaneous Conjugate-Matched Mixer Using Quasi-Linear Analysis," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 50, no. 7, Sept. 2002, pp. 2056-2062.
- [7] M. Go, H. Kim, S. Nah, and J. Kim, "A Dual-Mode Mixer for Multi-Band Radar Signal Reception," *J. of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 11, Nov. 2013, pp. 1047-1054.
- [8] J. Kim, I. Yoon, M. Go, and H. Park, "Design and Implementation of Broadband RF Amplifier for Microwave Receiver," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 10, no. 10, June 2015, pp. 665-67.
- [9] J. Park and M. Lee, "Harmonic Dual-Band Diode Mixer for the X- and K-Bands," *J. of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 1, Jan. 2021, pp. 64-70.
- [10] K. L. Deng, Y. B. Wu, Y. L. Tang, H. Wang, and C. H. Chen, "Broadband monolith GaAs-based HEMT diode mixer," *Proceeding of the 2000 Asia-Pacific Microwave Conference*, Sydney, Australia, 2000, pp. 1135-1138.
- [11] H. J. Wei, C. Meng, P. Y. Wu, and K. C. Tsung, "K-band CMOS sub-harmonic resistive

mixer with a miniature marchand balun on lossy silicon substrate," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 1, 2008, pp. 40-42.

## 저자 소개

### 고민호(Min-Ho Go)



1997년 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
2003년 LG이노텍 선임연구원  
2009년 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

2010년 인하대학교 차세대 항공전자통신 인력양성사업단 연구원

2010년 ~ 현재 한화시스템 수석연구원

※ 관심분야 : RFIC/MMIC, 레이다신호처리, 레이다시스템

### 강세벽(Se-Byeok Kang)



2012년 2월 한국해양대학교 전과공학과 졸업(공학학사)

2012년 2월 울제텍 연구원

2017년 4월 LS오토모티브 주임연구원

2019년 10월 ~ 현재 한화시스템 전문연구원

※ 관심분야 : 레이다신호처리, 레이다시스템