THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2013 Sep.; 24(9), 936~943.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2013.24.9.936 ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

77 GHz 차량용 레이더 시스템 설계

Design of 77 GHz Automotive Radar System

남형기 · 강현상 · 송의종 · Chenglin Cui · 김성균 · 남상욱* · 김병성

Hyeong-Ki Nam · Hyun-Sang Kang · Ui-Jong Song · Chenglin Cui · Seong-Kyun Kim · Sang-Wook Nam* · Byung-Sung Kim

요 약

본 논문에서는 76.5~77 GHz 대역 차량용 장거리 주파수 변조 연속파 레이더 응용을 위한 단일 채널 레이더 시스템의 설계와 측정 결과를 보인다. 송신기는 상용 GaAs MMIC를 사용하였고, 수신기는 65 nm CMOS 공정을 사용해 설계한 회로를 사용하였다. 제작된 하향 변환 수신 칩은 -8 dBm의 낮은 LO 전력으로 동작하기 때문에, 송신출력에서 -19 dB 방향성 결합기를 사용하여 믹서를 구동하였다. 모든 MMIC는 WR-10 도파관이 형성되어 있는 알루미늄 지그 위에 실장하였으며, 마이크로스트립-도파관 급전기를 통해 혼 안테나를 구동하여 실험하였다. 제작된 레이더 시스템의 크기는 80 mm×61 mm×21 mm이고, 출력 전력은 10 dBm, 위상 잡음은 1 MHz 오프 셋에서 -94 dBc/Hz, 그리고 수신기의 변환이득은 12 dB이다.

Abstract

This work presents the design and measured results of the single channel automotive radar system for 76.5 ~77 GHz long range FMCW radar applications. The transmitter uses a commercial GaAs monolithic microwave integrated circuit(MMIC) and the receiver uses the down converter designed using 65 nm CMOS process. The output power of the transmitter is 10 dBm. The down converter chip can operate at low LO power as -8 dBm which is easily supplied from the transmitter output using a coupled line coupler. All MMICs are mounted on an aluminum jig which embeds the WR-10 waveguide. A microstrip to waveguide transition is designed to feed the embedded waveguide and finally high gain horn antennas. The overall size of the fabricated radar system is 80 mm×61 mm×21 mm. The radar system achieved an output power of 10 dBm, phase noise of −94 dBc/Hz at 1 MHz offset and a conversion gain of 12 dB. Key words : 77 GHz Car Radar, FMCW Radar System, Millimeter-Wave Module

I.서 론

차량용 레이더는 레이더를 차량에 장착하여 전후 방 및 측방의 주변 환경에 관한 정보를 운전자에게 제공하고, 필요한 경우에는 차량을 제어하여 운전자 의 안전한 주행을 돕는 데 응용되는 핵심기술이다^[1]. 충돌 방지 전방 감시 레이더는 적응형 정속 주행 장치(adaptive cruise control)에 필수적이며, 이 장치 는 송수신 신호 간의 주파수 차이를 이용해 거리를 측정하고, 도플러 주파수 천이 효과를 이용하여 상

[「]이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-046474).」

[「]이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0083495).」

성균관대학교 IT융합학과(Department of IT Convergence, Sungkyunkwan University)

^{*}서울대학교 전기정보공학부(Department of Electrical and Computer & Engineering, Seoul National University)

[·] Manuscript received July 19, 2013 ; Revised August 12, 2013 ; Accepted August 26, 2013. (ID No. 20130719-069)

[·] Corresponding Author : Byung-Sung Kim (e-mail : bskim@ece.skku.ac.kr)

대 속도를 측정한다. 원거리 측정용 레이더는 150 m 거리까지 측정을 목표로 하며, 이러한 충돌 방지 시 스템은 수많은 교통사고를 줄일 수 있다^[2]. 여러 장 점에도 불구하고, 차량용 레이더 센서의 보급이 미 미한 것은 핵심 부품인 밀리미터파 IC 및 패키징 가 격이 여전히 고가이기 때문이다.

현재 원거리 레이더의 동작 주파수에 맞는 77 GHz 대 레이더 센서는 주로 화합물 반도체 소자를 이용해 만들고 있기 때문에, 전력 소모가 크고 집적 도가 낮아 패키징 비용이 증가하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에는 실리콘 계 열의 소자를 이용해 공정 비용을 낮추고, 집적도를 올려 패키징 비용을 줄이는 연구가 진행되고 있다. 유럽 및 미국에서는 SiGe HBT 공정을 이용한 레이 더 송수신 칩을 개발하여 상용화 단계에 진입한 반 면, 일본 및 국내에서는 CMOS 소자를 이용한 연구 를 진행 중이다. CMOS 공정을 이용할 경우, 원하는 성능을 얻기 위해서는 최첨단 공정과 정확한 설계 라이브러리를 이용해야 하기 때문에 국내에서도 주 로 고가의 해외 파운더리를 이용해 연구를 진행하고 있다.

이러한 연구의 일환으로 본 논문에서는 송신 칩 은 기존의 화합물 반도체를 이용하고, 수신 칩은 소 자 성능과 설계 라이브러리의 정확도는 떨어지나, 상대적으로 저렴한 국내 CMOS 공정을 이용해 레이 더 센서를 제작한 결과를 제시한다. 논문의 구성은 다음과 같다. II 절에서는 레이더 시스템을 구성하는 능동 회로에 대해 설명하고, III 절에서는 이 칩들을 연결하기 위한 수동 소자 및 패키징 구조에 대해 설 명한다. IV 절에서는 위의 내용을 바탕으로 제작한 레이더의 측정 결과를 기술하고, V 절에서 결론을 제시한다.

Ⅱ. 능동 회로 설계

그림 1은 본 논문에서 제작한 레이더 센서의 구조 이다. 송신부 및 IF 증폭단, PLL은 상용 칩을 사용하 였다. 송신부는 UMS사의 13 GHz VCO(CHV2270)와 주파수 6 체배기를 내장한 전력 증폭기(CHU3377)를 사용하였다. CHU3377의 최대 출력은 15 dBm이다. PLL은 Analog Device 사의 ADF 4158를, IF amp는



그림 1. 77 GHz 차량용 레이더 시스템 구성도 Fig. 1. Block diagram of 77 GHz automotive radar system.

Analog Device 사의 AD8253을 사용하였다. 기준 주 파수는 256 MHz이다. 송신부는 +5.5 V 공급 전압에 서 470 mA, -5.5 V 공급 전압에서 30 mA의 전류를 소비한다.

수신부는 삼성 65 nm CMOS 공정을 이용해 제작 한 단일 칩 하향 변환 IC를 사용하였다. UMS사의 77 GHz 수신 칩은 저잡음 증폭기와 주파수 혼합기가 별도의 칩으로 구성되어 패키징이 복잡하고, 양의 전압원과 음의 전압원이 필요하며, 전력 소모도 크 다. 본 연구에서 제작한 수신 칩을 사용하면 전력 소 모가 적고, 패키징이 단순해지는 장점이 있다. 그림 2는 본 연구에서 사용한 수신 칩의 전체 회로도이다. 저잡음 증폭기는 3단 공통 소스 증폭기로 구성되어 있다. 정합 부분과 부하로 전송선로를 이용하였다. 각단의 임피던스 정합을 위해 인덕터를 사용하였다. 주파수 혼합기에서는 변환 이득을 높이고, 스위칭 단의 잡음을 낮추기 위하여 직렬 전송선로를 트랜스 컨덕턴스 단과 스위칭 단 사이에 사용하였다. 저잡 음 증폭기 및 주파수 혼합기 각각에 대한 자세한 동 작 원리 및 설계 내용은 참고문헌 [5], [6]에 기술되 어 있으며, 본 논문에서 사용한 수신 칩은 참고문헌 의 저잡음 증폭기와 주파수 혼합기를 일체화한 것이 다. 그림 3(a)는 수신 칩의 입력 전력에 대한 이득이 며, 그림 3(b)는 LO 전력의 크기에 대한 이득 변화이다. 최적 성능은 -8 dBm LO 전력에서 변환 이득은 21 dB로 나타났다. P1 dB는 -23 dBm이다. 잡음지수는 장비의 부족으로 직접 측정하지 못하였으며, 시뮬레



(a) Circuit schematic of the receiver



(b) 제작한 수신 칩의 현미경 사진(b) Microphotograph of the fabricated receiver

- 그림 2. 65 nm CMOS 공정을 이용해 설계한 하향 변 환 수신 칩
- Fig. 2. Down conversion receiver using 65 nm CMOS process.

이션 결과에 따르면 열잡음에 의한 잡음지수는 11 dB이고, 플릭커 코너 주파수는 10 MHz이다. 1.2 V 전압원으로 동작하며, 소모 전류는 22 mA이다. 플릭 커 코너 주파수가 높은 이유는 설계에 사용한 소자 자체의 플리커 코너 주파수가 높기 때문이다. 동일 미세 공정의 소자를 사용해도, 플릭커 잡음은 제조 사에 따라 10배 이상 차이가 나기 때문에 향후 좀 더 낮은 플릭커 잡음을 갖는 소자를 사용하면 코너 주 파수를 1 MHz까지 낮출 수 있을 것으로 기대된다.

공기 중 레이더 송수신 전력 손실은 식 (1)로 나타 난다⁽³⁾.

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G_T G_R \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \tag{1}$$

이 식에서 σ 는 RCS(Radar Cross Section)로 중형차 의 경우 약 30 m² 이다^[4]. R은 표적과의 거리, λ 은 중 심주파수의 파장, G_T 는 송신안테나의 이득, G_R 는 수 신 안테나의 이득, P_T 는 송신 전력, P_R 은 수신 전력 을 나타낸다. 24 dBi의 이득을 갖는 상용 혼 안테나



Fig. 3. Performance of the down conversion receiver.

를 송수신 안테나로 사용하고, 최대 탐지거리를 150 m로 가정하면, 송신기 출력이 10 dBm일 때 중형차 로부터 반사된 수신 전력은 -95 dBm이다. 이를 바 탕으로 식 (2)에 의해 수신기의 잡음 지수 NF_{tot} 를 구 할 수 있다. 수신기 출력단에 필요한 최소 SNR_{min} 을 16 dB로 가정하고^[10], IF 단의 FFT 해상도 대역폭 을 BW_{FFT} 는 1 kHz로 고정할 때, 최소 수신가능 전력 $P_{Rx,min}$ 이 -95 dBm이 되기 위한 수신기의 잡음지 수 NF_{tot} 은 다음 식에 의해 33 dB가 된다.

$$P_{Rx,\min} = -174 + NF_{tot} + 10\log B W_{FFT} + SNR_{\min}$$
(2)

플릭커 코너 주파수를 기준으로 수신기의 잡음

지수는 IF 주파수가 낮아짐에 따라 10 dB/dec로 증가 한다. FMCW 레이더에서는 표적의 거리가 수신기의 IF 주파수로 나타나며, 거리가 멀어질수록 IF 주파수 가 증가한다. 즉, 거리가 가까운 표적의 반사 신호에 대해서는 IF 주파수가 낮아 수신기의 잡음지수가 높 은 반면, 반사 신호 전력이 크고, 표적의 거리가 멀 어지면 잡음지수는 감소하는 반면, 반사전력도 감소 하는 특성이 나타난다. IF 주파수는 표적과의 거리 에 대해 선형적인 관계를 가지므로, 표적과의 거리 가 감소함에 따라 잡음지수는 플릭커 잡음의 영향으 로 10 dB/dec로 증가하는 반면, 수신 전력은 거리의 4제곱에 반비례하므로 40 dB/dec로 증가한다. 따라 서, 최대 거리에서 수신기의 SNR이 가장 낮게 나타 나게 된다. FMCW 레이더에서 주파수 활주(sweep) 대역폭을 500 MHz, 활주 시간을 1 ms로 가정할 경 우 150 m 전방의 표적은 500 kHz의 IF 주파수를 갖 게 되며, 본 연구에서 제작한 수신기의 잡음지수 계 산치는 24 dB이므로 앞에서 구한 최대 잡음지수 33 dB보다 낮음을 알 수 있다.

Ⅲ. 수동 회로 및 패키지 설계

본 논문에서 제작한 레이더 시스템 모듈은 혼 안 테나를 사용한다. 따라서, 마이크로스트립 도파관 급전기가 필요하며, 송수신 칩의 패드에서 마이크로 스트립 선로까지 본딩을 포함한 정합회로와 전력증 폭기 출력에서 수신기의 LO를 구동하기 위한 방향 성 결합기가 필요하다. 마이크로스트립 선로는 상대 유전율 2.2, 두께 5 mil을 갖는 Rogers Duroid RT-5880 기판을 사용하였으며, 마이크로스트립 도파관 급전기 구조는 후방 단락 구조로서 도파관의 한 방 향으로 방사할 수 있도록 하고, 임피던스 정합을 위 한 변환기를 추가하여 설계하였다^[7]. 그림 4는 설계 된 마이크로스트립 도파관 급전기 구조와 시뮬레이 션 결과를 나타낸다. 급전기는 WR-10 도파관의 모 든 주파수 대역에서 높은 전달 특성을 보이고, 77 GHz에서 최소 반사손실을 나타낸다.

송신 전력증폭기는 MMIC에 후면 비아가 있어 기 존의 UMS사에서 제공하는 설계지침에 따라 신호 패 드에서 마이크로스트립 선로까지 단일 본딩으로 연 결하였다. 실리콘 수신 칩은 저잡음 증폭기 입력단



그림 4. 마이크로스트립 도파관 급전기 Fig. 4. Microstrip to waveguide feeder.

및 LO 공급단에 77 GHz 신호가 입력되어야 한다. 실리콘 공정은 후면 비아가 없기 때문에 칩상의 GSG(Ground-Signal-Ground) 패드에서 마이크로스트 립 선로로 변환이 필요하며, 듀로이드 기판의 비아 공정이 어렵고 매우 크기 때문에, 비아 공정 없이 접 지 확보를 위해 듀로이드 기판의 마이크로스트립 선 로를 GSG의 3가지 선로로 구성하여 가운데 선로는 신호 선로로 사용하고 신호선로의 양 옆의 선로를 접지 선로로 구성하는 방식이다. 이때 본딩 와이어 제작의 오차를 고려하여 접지선로를 반파장 더 길게 구성하였다. 이는 참고문헌 [8]에 나오는 구조와 유 사한 변환 구조이다.

수신 칩을 동작시키기 위한 LO는 송신 전력증폭 기의 출력에 방향성 결합기를 이용하여 공급받는다. 앞장에서 언급했듯이 수신부의 LO 구동 전력은 -10 ~-6 dBm까지 유사한 특성을 갖기 때문에 출력단 전력을 9~13 dBm까지를 가정하고, -19 dB 방향성



(a) 방향성 결합기 단면

(a) A single section directional coupled line coupler



(b) Geometry of directional coupled line coupler



(0) 영양성 실험가 개필대하신 실과

(c) Simulation result of directional coupled line coupler

그림 5. 방향성 결합기

Fig. 5. Directional coupled line coupler.

결합기를 사용하여 공급하였다^[9]. 결합기의 디자인 파라미터는 W=0.38 mm, S=0.18 mm, L=0.71 mm이 고, 각각의 위치는 그림 5(b)에 나타난다. 방향성 결 합기의 단면도는 그림 5(a)와 같고, 시뮬레이션 결과 는 그림 5(c)에 나타내었다. 방향성 결합기의 출력 전력 손실은 0.6 dB이고, 하향 변환 혼합기로의 결합 전력은 19 dB 감쇄되어 입력된다. 방향성 결합기의 isolation 포트는 50 Ω 종단되어야 하나, ₩ 밴드에서 는 실제 50 Ω 종단이 어렵기 때문에 도파관 프로브 를 달아 개방 도파관으로 종단하였다.

Ⅳ. 레이더 시스템 모듈 제작 및 측정 결과

그림 6은 제작된 77 GHz 레이더 모듈이다. 레이 더 모듈 크기는 80 mm×61 mm×21 mm이다. IF 출력, 위상 고정 루프의 기준 주파수 입력, 데이터 입력 단 자는 외부 장비와 연결되어 있고, 도파관 끝에는 24 dBi 이득을 갖는 두 개의 상용 표준 혼 안테나를 연 결할 수 있도록 구성되어 있다.

그림 7은 테스트를 위한 송신부의 측정 구성도이 다. 송신부는 별도의 송신 모듈을 만들어 전력증폭 기 출력과 LO 구동 전력을 확인하였다. 패키징된 송 신부의 최종 출력 전력은 10 dBm이고, 방향성 커플 러의 전력 결합비율은 -20.5 dB로 추가적인 손실



그림 6. 제작된 레이더 모듈 Fig. 6. Fabricated radar module.



그림 7. 송신기 측정 구성도 Fig. 7. Measurement setup for the transmitter.

1.5 dB가 발생하였다. 그림 9는 송신부의 위상 잡음 을 나타낸다. 위상 고정 루프(PLL)의 위상 잡음은 1 MHz 오프셋에서 -94 dBc/Hz로 확인되었다. 제작된 CMOS 수신 칩은 웨이퍼 테스트에서 20 dB의 변환 이득을 갖는데 비해, 모듈 평가에서는 12 dB 이득을 갖는 것으로 확인되었다. 이러한 이득 저하는 제작 한 듀로이드 기판의 제작 해상도가 낮아 정확한 패 턴이 형성되지 않고, 수작업으로 진행한 본딩 위치 가 정확하지 않아 수신 칩에서 마이크로스트립 선로 로의 부정합으로 인해 LO 구동 전력의 감소 및 저잡 음 증폭기의 입력 손실과 더불어 모듈 제작과정에서 도파관을 완벽하게 밀폐하지 못하여 발생하는 손실 과 도파관에서 Chip Pad로 천이과정에서의 손실이 발생했기 때문으로 판단된다.

그림 10은 40 dB 이득을 갖는 IF 증폭기를 포함하 여 제작한 레이더 모듈의 측정 결과이다. 그림 10(b) 는 송신 신호를 주기 2.5 ms로 76.5 GHz에서 77 GHz 까지 선형 변조했을 때, 약 80 m 떨어진 표적을 나타



그림 8. 송신기 출력 측정





그림 9. 송신기 위상 잡음 측정 Fig. 9. Measurement phase noise of the transmitter.



(a) 실측정 사진(a) Measurement set up



그림 10. 거리 측정 Fig. 10. Range measurement.

내는 IF 스펙트럼이다. 이때 IF 전력은 -42 dBm이 고, 주파수는 약 105 kHz로 표적까지의 거리에 해당 하는 IF 주파수가 검출됨을 확인할 수 있다. 식 (1)에 따르면 77 GHz에서 중형 차량 기준으로 80 m 거리 표적의 공간 손실은 약 -142 dB이다. 하지만 실제 수신 전력을 기준으로 계산한 손실은 계산값보다 10 dB 더 발생하였다. 이는 표적의 RCS 값의 차이와 지 표 반사 등의 측정 상황에서 발생한 것으로 추정된 다. IF 증폭단을 포함한 전체 수신기의 이득이 52 dB 이므로 주파수 분석기의 잡음이 측정 스펙트럼의 잡 음에 미치는 영향은 미미하다. 측정된 스펙트럼으로 부터 구한 최종 출력 신호의 SNR은 1 kHz 기준으로 신호전력의 최대값만을 고려하여 환산할 경우 2.5 dB가 된다. 레이더 신호처리에 필요한 최소 SNR인 16 dB가 확보되는 거리는 신호전력이 거리가 가까 워지며, 12 dB/oct로 증가하므로 플릭커 잡음을 무시 할 경우 약 37 m 근방임을 알 수 있다. 유효 탐지 거 리가 감소한 가장 큰 이유는 실리콘 칩의 CPW 출력 에서 마이크로스트립 선로 사이에 발생한 추가 손실 이다. W 밴드 대에서 좀 더 정밀한 기판 제작 기술 과 플립칩 실장 기술을 도입함으로써 상기 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

V.결 론

본 논문에서는 77 GHz 차량용 레이더를 설계하였 다. 송신부는 상용 칩을, 수신부는 65 nm CMOS 공 정을 이용하여 제작한 칩을 사용하였다. 단일 CMOS 수신 칩을 사용함으로써 mm 파 패키징 요소를 줄이 고, 전력 소모를 줄일 수 있었다. 향후 송수신부를 CMOS 기술로 일체화하고, 플립 칩과 같은 정밀한 기술을 사용하여 패키징 손실을 최소화하면 저전력 으로 동작하는 저가의 장거리 탐지 레이더를 구현할 수 있을 것으로 예측된다.

References

- 장지영, 남상욱, "차량용 레이더 기술의 최근 발 전 동향", 전자공학회지, 37(5), 2010년 5월.
- [2] Jri Lee, Yi-An Li, Meng-Hsiung Hung, and Shih-Jou Huang, "A fully-integrated 77-GHz FMCW radar transceiver in 65 nm CMOS technology", *IE-EE J. Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 12, pp. 2746-2756, 2010.
- [3] David. K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics 2nd Ed., Addison Wesley, 1989.
- [4] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, New York: McGraw Hill, 2001.
- [5] Seong-Kyun Kim et al, "A 77 GHz low LO power mixer with a split self-driven switching cell in 65 nm CMOS technology", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 22, no. 9, pp. 480-482, 2012.
- [6] 김준영, Chenglin Cui, 김성균, 김병성, "65 nm CMOS 공정을 이용한 77 GHz LNA 설계", 한국 전자파학회논문지, 24(9), pp. 915-921, 2013년 9 월.
- [7] Robert E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, IEEE Press, 1990.
- [8] G. Zheng, et al., "Wideband coplanar waveguide RF probe pad to microstrip transitions without via holes", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 13, no. 12, pp. 544-546, 2003.
- [9] Ching-Ian Shie, et al., "Transdirectional coupled-line couplers implemented by periodical shunt capacitors", *IEEE Trans. Microwave. Theory Tech.*, vol. 57, no. 12, pp. 2981-2988, 2009.
- [10] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, New York: McGraw Hill, 2001.

남 형 기



2012년 2월: 광운대학교 전파공학 과 (공학사) 2012년 3월~현재: 성균관대학교 IT 융합학과 석사과정 [주 관심분야] 레이더 시스템 설계, 안테나 설계

김 성 균



2007년 2월: 성균관대학교 정보통신 대학 (공학사) 2009년 2월: 성균관대학교 정보통신 대학 (공학석사) 2013년 2월: 성균관대학교 정보통신 대학 (공학박사) [주 관심분야] RFIC 설계

강 현 상



2011년 2월: 광운대학교 전파공학 과 (공학사) 2013년 2월: 성균관대학교 IT융합학 과 (공학석사) 2013년 2월~현재: 삼성전자 연구원 [주 관심분야] 안테나 설계, 레이더 시스템

남 상 욱



1981년 2월: 서울대학교 전자공학 과 (공학사)

1983년 2월: 한국과학기술원 전자공 학과 (공학석사)

1989년: Electrical Engineering at the University of Texas at Austin (공 학박사)

1990년~현재: 서울대학교 전기공학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파 능동/수동 회로 설계, 안테나 및 전파전파, 전자파 수치 해석 등

송 의 종



2011년 2월: 성균관대학교 정보통신 대학 (공학사) 2013년 2월: 성균관대학교 이동통신 전력전자공학과 (공학석사) 2013년 2월~현재: 삼성전기 연구원 [주 관심분야] RFIC 설계

김 병 성



1989년 2월: 서울대학교 전자공학 과 (공학사) 1991년 2월: 서울대학교 전자공학 과 (공학석사) 1997년 2월: 서울대학교 전자공학 과 (공학박사) 1997년 3월~현재: 성균관대학교 정

[주 관심분야] RFIC 설계, RF 소자 모델링

Chenglin Cui



2009년 7월: Nanjing Univ. of Posts and Telecommunications 정보통신 공학과 (공학사) 2011년 8월: 성균관대학교 정보통신 대학 (공학석사) 2011년 9월~현재: 성균관대학교 정 보통신대학 박사과정

[주 관심분야] RFIC 설계