

## 드론용 W-대역 레이더 고도계

### W-Band Radar Altimeter for Drones

이용석 · 이권학 · 김준성 · 박재현 · 김병성 · 송림

Yong-Seok Lee · Gwon-Hak Lee · Jun-Seong Kim · Jae-Hyun Park · Byung-Sung Kim · Reem Song

#### 요 약

본 논문에서는 정확한 고도를 측정하기 위해 송·수신 주파수 차를 이용해 고도를 탐지할 수 있는 W-대역 FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더 고도계 시스템을 설계 제작하고, 상대 고도를 탐지하여 장애물과 충돌을 방지할 수 있는 고도제어 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘을 탑재한 레이더 고도계를 드론에 장착하여 비행시킨 결과, 입력 고도 대비 최대 약 3 % 오차의 실제 고도 제어를 실험적으로 보였다. W-대역 송·수신기에 사용한 칩은 65 nm CMOS 공정을 이용해 제작하였으며, 칩 상에 도파관 급전기를 내장하여 혼 안테나를 직접 구동하였다<sup>[1]</sup>. 이 레이더 고도계를 이용하여 흙, 잔디, 그리고 호수 상공에서의 하방 클러터 전력분포를 실측하고, 수분 함량에 따른 표면 측정 특성을 확인하였다.

#### Abstract

In this study, we propose a W-band frequency modulated continuous wave(FMCW) radar altimeter that can measure the altitude based on the frequency differences of transmitted and received signals. This W-band FMCW system is powered by an altitude control algorithm, which we propose to help prevent collisions of drones with obstacles in real deployment by measuring the relative altitude. It is shown that this algorithm enables the drone to be positioned within a 3 % error of altitude from the desired input height. The chip used in the W-band transmitter and receiver was fabricated using a 65-nm CMOS process, and a horn antenna was directly fed by incorporating an embedded waveguide feeder into the chip<sup>[1]</sup>. The clutter spectra observed in terrains including soil, grass, and calm lake water were measured and compared, confirming the reflectivity characteristics of various surfaces of different water contents.

Key words: Drone, Radar Altimeter, FMCW, W-Band Radar

#### I. 서 론

최근 들어 무인기의 장점이 부각되면서 유통, 물류, 우편 사업 등 다양한 분야에서 드론 응용 기술이 개발되고 있다. 공중에 드론이 많아질수록 도심에서 건물들 또는

다른 비행체와의 충돌사고가 발생할 위험이 커진다. 특히, 항공기와 다르게 드론은 300 m로 고도가 제한되어 있고, 실제 사용하는 고도는 이보다 낮기 때문에 주변 건축물과의 충돌 위험이 매우 크다. 드론의 충돌 사고를 예방하기 위해 정확한 고도제어가 필수적인데, 드론에 장착된

「이 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-차세대 공학연구자 육성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018H1D8A2031628).」

성균관대학교 정보통신대학(College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University)

· Manuscript received March 27, 2019 ; Revised April 10, 2019 ; Accepted April 24, 2019. (ID No. 20190327-030)

· Corresponding Author: Reem Song (e-mail: reemsong@skku.edu)

고도계는 주로 기압계를 이용하기 때문에 정밀도가 떨어지며, 무엇보다 해수면을 기준으로 절대고도를 측정하기 때문에 하방 장애물과의 상대 고도를 알 수 없다. 이에 비해, 레이더 고도계는 고주파 신호를 송신하여 반사되어 들어오는 수신 신호를 바탕으로 반사체 또는 반사 지면까지의 거리를 측정하기 때문에 상대 고도를 파악할 수 있다<sup>[2]</sup>. 현재 국내에서 FMCW 레이더 고도계에 관한 연구는 주로 C-대역에서 이루어진다. 파장에 비례해 안테나 크기가 결정되기 때문에 C-대역 레이더를 드론용으로 사용하기는 힘들다<sup>[3][4]</sup>. 본 논문에서는 드론용 W-대역 FMCW 레이더 고도계를 설계 제작하고, 지면과 일정한 고도를 유지해 장애물과 충돌을 방지할 수 있는 고도제어 알고리즘을 제안한다. 이 레이더 고도계를 이용하여 호수, 잔디, 흙에서의 수분함량에 따른 표면 측정 특성을 확인한다.

## II. 송·수신기 모듈 구성도

그림 1은 제작한 송·수신기 모듈이다. 도파관은 W-밴드용 WR-10 규격을 사용하였으며, 송·수신기 도파관 입구에 자체 제작한 칩을 부착했다. 칩에 대한 자세한 설명은 참고문헌[5], [6]에 있다. 송·수신기 칩은 on-chip 도파관 급전기를 내장하여 77 GHz 대역의 입·출력 신호를 급전기를 통해 도파관으로 전달하고, 전달된 출력 신호는 고이득의 혼 안테나를 통하여 방사된다. 모듈에 사용된 PLL은 ADF4158, IF AMP는 AD8421, VCO는 Crytek사의 CVC055CC이다<sup>[1]</sup>. 레이더 시스템의 주파수 대역은 76.44~

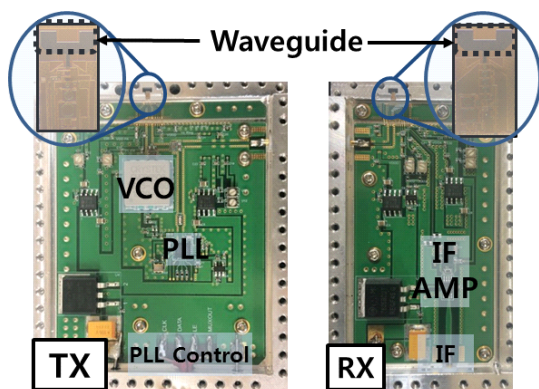


그림 1. W-대역 송·수신기 모듈<sup>[5]</sup>  
Fig. 1. W-band transmitter and receiver<sup>[5]</sup>.

77 GHz이며, 송신출력은 약 8 dBm이고, 수신이득은 약 30 dB이다. 실험에 사용한 혼 안테나의 이득은 24 dBi이며, 약 5°의 빔 폭을 갖는다.

## III. 드론용 레이더 고도계 시스템 구성

그림 2는 드론용 레이더 고도계 시스템 구성도이다. 8 V 배터리로 레이더 모듈에 전원을 공급한다. 레이더 고도계는 송·수신기, 아두이노, 라즈베리파이로 이루어져 있으며, 라즈베리파이는 PC와 WIFI로 연결되어 실시간으로 데이터를 송·수신할 수 있다. 파란색 점선은 아두이노를 이용한 신호처리 과정이다. 드론이 비행하는 동안 간단한 방식으로 신호처리하기 위해 12 Bit, 1 MS/s 샘플링 속도의 ADC를 제공하는 아두이노를 사용했다. 특히, 아두이노 라이브러리에서 제공하는 부동 소수점 FFT 대신 고정 소수점 방식을 사용해 FFT 시간을 단축했다. 노이즈 감쇠와 오류 검출을 줄이기 위해서 FFT 결과 5개의 평균을 취하고 임계점보다 높은 최대값을 목표물로 인지하는 CFAR 알고리즘을 사용하여 임계점보다 높은 최대 전력에 대해 고도 정보를 계산한다. 최종적으로 라즈베리파이에서 거리정보요청 신호를 보내면 계산된 고도를 라즈베리파이로 전달한다.

그림 3은 라즈베리파이에서 드론의 고도를 제어하는 알고리즘을 보여준다. 파란색 사각형은 각 스레드에서 수행되는 동작을 보여주며, 주황색 사각형은 키보드 인터럽

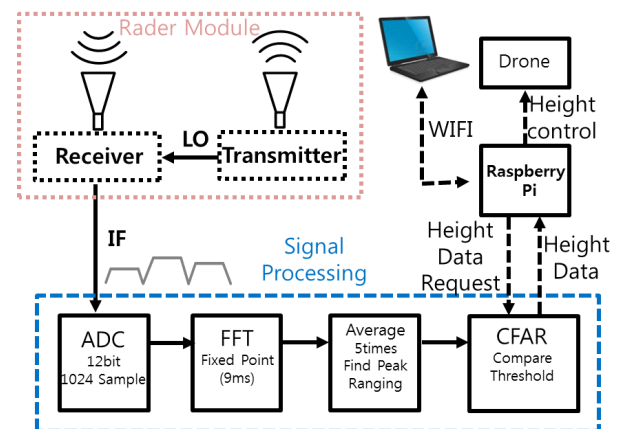


그림 2. 드론용 레이더 고도계 시스템 구성도  
Fig. 2. Diagram of the radar altimeter system.

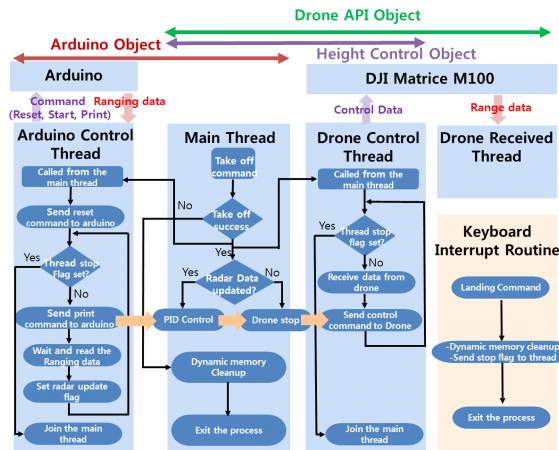


그림 3. 라즈베리파이에서 실행되는 고도제어 블록도  
Fig. 3. Altitude control block diagram running on raspberry pi.

트를 통한 프로그램 종료 과정을 나타낸다. 스레드는 총 4개의 병렬 구조이며, 3가지 객체가 공유되고 있어 스레드 간 데이터가 쉽게 접근될 수 있다. 메인 스레드는 드론에 이륙 명령을 내리고, 성공하면 나머지 3개 스레드를 호출한다. 그 뒤, 메인 스레드는 실시간으로 아두이노 제어 스레드로부터 받은 거리 정보를 이용하여 드론의 동작변수를 결정하고, 고도제어 객체를 통해 드론 제어 스레드로 전달한다. 고도제어 프로그램은 키보드 정지 루틴이 발동되면 드론을 착륙시키고 동적메모리를 초기화한다.

그림 4는 그림 2의 레이더 고도계 시스템을 DJI 사의 Matrice M100 드론에 장착한 사진이다.

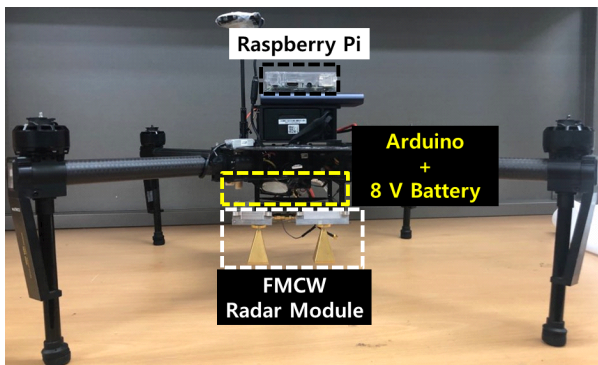


그림 4. Matrice M100에 장착한 레이더 고도계 시스템  
Fig. 4. Radar altimeter system mounted on Matrice M100.

#### IV. 드론용 레이더 고도계 시스템 측정

그림 5는 라즈베리파이와 WIFI로 연결된 PC에서 드론이 비행하는 동안 임의의 고도를 실시간으로 입력했을 때 레이더 측정으로부터 계산된 드론의 실제 고도이다.

측정은 총 60초 동안 수행했으며, 실시간으로 고도가 업데이트되는 평균 시간은 20 ms이고, 0.25 m/s 속도로 입력 고도 위치로 이동한다. 그림 5에서 보듯 입력 고도와 레이더 고도 사이에 최대 약 18 cm 오차가 나타나고 있다. 이는 레이더로 계산한 고도는 FFT 주파수에 대응되어 이산적으로 나타나기 때문(후술하는 주파수 동작조건에서 최대 이산 오차는 13.4 cm)에 연속적인 제어 입력 고도로 정확하게 수렴하는 것이 불가능해 나타나는 오차가 주 요인이다. FFT 결과에 대해 신호처리 보간법을 이용하면 이러한 오차는 개선될 수 있을 것으로 기대된다<sup>[7]</sup>. 나머지 오차 부분은 PID 제어 시 주어진 시간 내에 수렴되지 못하여 생긴 오차로 판단된다. 또한 그림 5에서 보듯이 드론이 하강하다 입력 고도로 유지되어야 하는 구간들에서는 그 이전 시점에서 드론이 내려가던 관성으로 인해 더 내려갔다가 회복하는 양상을 보이고 있다. 이러한 부수적인 문제들과 더불어, 건물 상공이나 나무와 같이 타겟 고도가 임의로 변하는 지역을 비행할 시에 대비하여 실시간으로 최단 거리 타겟으로부터 일정한 고도 오프셋을 유지하는 적응 비행 제어 알고리즘 역시 보완

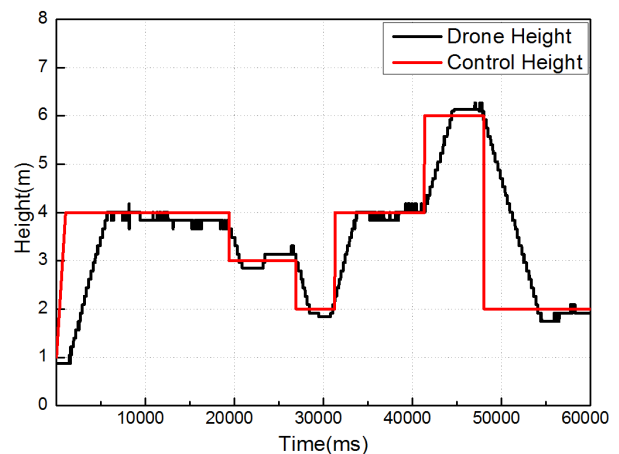


그림 5. 고도제어 측정 결과  
Fig. 5. Altitude control measurement result.

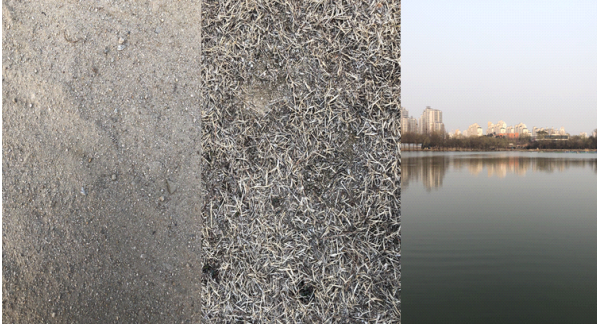


그림 6. 흙, 잔디, 호수 측정환경(수원시 일월공원)  
Fig. 6. Measurement environment of soil, grass, lake(Suwonsi Ilwol park).

되어야 할 부분이다.

개발된 고도 제어 가능 레이더를 이용하여 그림 6에서 보이는 흙, 잔디, 호수 세 가지 측정 환경에서 주파수에 따른 클러터 전력분포를 측정하였다.

그림 7은 드론의 내장 고도계를 이용하여 드론을 상공 28 m에 정지 비행시켰을 때, 드론에 장착된 레이더에 잡힌 클러터 측정 결과이다. 최대 전력은 IF 주파수 100 kHz에서 나타났으며, 레이더로 측정된 고도는 식 (1)에 근거하여 26.8 m로 나타났다. 내장 고도계의 부정확성과 상공의 바람 등의 영향으로 1.2 m의 오차가 나타난 것으로 판단되며, 레이더 고도계의 필요성을 입증한 경우로 보여진다<sup>[8]</sup>.

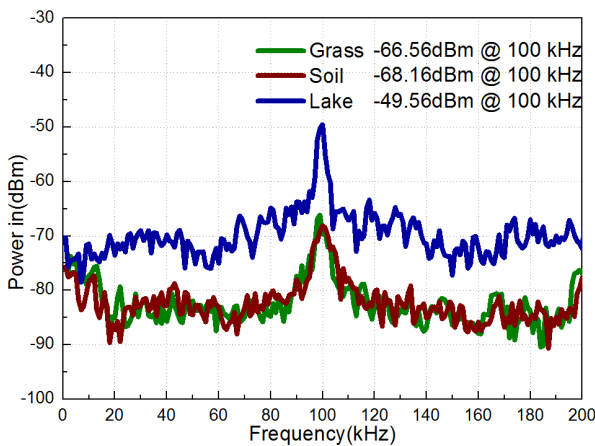


그림 7. 흙, 잔디, 호수 측정 결과  
Fig. 7. Measurement results of soil, grass, lake.

$$f_{IF} = \frac{2B}{cT}R \quad (1)$$

여기서  $R$ 은 지면으로부터의 고도,  $c$ 는 빛의 속도,  $T$ 는 FMCW의 sweep time,  $B$ 는 주파수 변조 대역폭을 나타낸다.

본 레이더의 경우  $T$ 는 1 msec이고,  $B$ 는 560 MHz이다. 최대치 전력은 IF 주파수 100 kHz에서 흙, 잔디, 호수의 경우 각각 -68 dBm, -66 dBm, -50 dBm가 측정되었다. 호수에서 전체적인 클러터 레벨이 올라간 것은 향후 연구가 더 필요한 부분이다.

표 1에서 수분 함유량이 많아질수록 유전율과 반사율이 증가하는 것을 볼 수 있다<sup>[10]</sup>. 식 (2)는 반사율과 RCS의 관계를 나타내며,  $\sigma$ 는 타겟의 RCS,  $\sigma_P$ 는 반사면적,  $\sigma_R$ 는 반사율,  $\sigma_D$ 는 지향성을 나타낸다<sup>[9]</sup>. 식 (2)로 반사율이 증가하면 RCS가 증가함을 알 수 있다.

$$\sigma = \sigma_P \times \sigma_R \times \sigma_D \quad (2)$$

식 (3)은 수신 전력을 나타내는데, RCS에 비례하여 클러터 전력이 증가함을 예상할 수 있고, 그림 7의 측정 결과에서도 보여진다.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (3)$$

위의 식에서  $P_r$ 은 수신전력,  $P_t$ 은 송신전력,  $\lambda$ 는 파장,  $G_t$ ,  $G_r$ 는 송수신 안테나 이득,  $R$ 은 거리이다.

표 2는 드론을 상승시키며 레이더로 측정한 드론 고도와 수신 전력의 변화를 측정한 결과이다. 일정한 크기의 표적을 측정하는 레이더는 탐지 거리가 두 배 증가할 때마다 수신 전력이 12 dB씩 감소하는 경향을 보이는데, 표 2의 측정결과는 이와 상이함을 알 수 있다. 이는 레이더

표 1. W-대역 유전율과 반사율<sup>[9],[10]</sup>

Table 1. Dielectric constants and reflectivities of W-band<sup>[9],[10]</sup>

W-band(100 GHz)			
Terrain type	Water content	Dielectric constant	Reflectivity
Soil	0.001	2.7+j0.02	7 %
Grass	0.132	3.7+j1.1	11 %
Lake	0.294	4.8+j2.8	18 %

표 2. 고도에 따른 수신 전력 측정 결과(잔디)

Table 2. Received power at peak IF at 4 different elevations.

Drone height [m]	Peak power [dBm]	Average SNR [dB]
5.6	-50	25.4
14.2	-57.8	24.1
24.4	-64.5	22.3
26.8	-66.5	20.5

고도계의 경우 고도가 상승함에 따라 수신 전력이 감소하지만, 유효 반사면적이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 주어진 SNR 대비 최대 탐지고도를 추정하기 위해서는 고도에 따른 유효 지상 반사면적 모델과 지상 클러터 모델에 대한 추가 연구가 필요하다.

## V. 결 론

본 논문은 W-대역 FMCW 레이더 시스템을 구성하여 고도 제어를 수행하고, 클러터의 수신전력을 측정하였다. 지상 고도 약 26.8 m에서 정지 비행 상태 중 흙, 잔디, 수면의 세 환경에 대해 클러터를 측정하였고, 측정 결과에서 보듯 지표면 영향에 따라 수분함량이 많을수록 그리고 유전율이 클수록 수신 전력이 증가함을 볼 수 있다<sup>[11]</sup>.

## References

- [1] 김동균, Cui Chenglin, 권오윤, 윤채원, 김병성, "77 GHz 차량용 레이더 간섭신호 발생기 설계," 한국전자과학회논문지, 27(9), pp. 865-871, 2016년 9월.
- [2] H. J. Hanson, R. Lindop, and D. Majstorovic, "Collision avoidance W-band FMCW radars in an altimeter application," *Electronic Warfare and Radar Division, Defence Science and Technology Organisation*, DSTO-TR-1939, Edinburgh, Aug. 2006.
- [3] 윤정숙, 곽희준, 김윤희, 신영중, 유기정, 유명중, "비행 시험을 통한 레이더 전파고도계 특성 분석," 대한원격탐사학회지, 29(1), pp. 81-94, 2013년 1월.
- [4] 유기정, 박홍원, 김윤희, "지형 및 안테나 빔폭에 따른 전파고도계의 고도측정오차 분석," 한국항공우주학회 학술발표회초록집, 2011년 4월, pp. 190-193.
- [5] 최성림, 김성균, 김준성, 김병성, "A 77 GHz transmitter using  $\times 28$  frequency multiplier in 65 nm CMOS," 한국전자과학회 하계종합학술대회논문집, 2016년 6월, 4(1), p. 192.
- [6] C. Cui, S. Kim, R. Song, J. Song, S. Nam, and B. Kim, "A 77-GHz FMCW radar system using on-chip waveguide feeders in 65-nm CMOS," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 11, pp. 3736-3746, Nov. 2015.
- [7] M. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, McGraw-Hill, 2005.
- [8] P. Hugler, M. Geiner, and C. Waldschmidt, "77 GHz radar-based altimeter for unmanned aerial vehicles," in *2018 IEEE Radio and Wireless Symposium(RWS)*, Anaheim, 2018, pp. 129-132.
- [9] E. C. Desk, *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*, Washington, Naval Air Warfare Center, 1997.
- [10] A. J. Gatesman, T. M. Goyette, J. C. Dickinson, R. H. Giles, J. Waldman, and J. Sizemore, et al., "Polarimetric backscattering behavior of ground clutter at X, Ka, and W-band," in *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XII*, Orlando, 2005, vol. 5808, pp. 428-439.
- [11] 신종철, 권순구, 오이석, 김세영, 전병태, "지표면 영향을 고려한 삼각 전파 반사기의 RCS 분석," 한국전자과학회논문지, 23(6), pp. 723-730, 2012년 6월.



이 용 석 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6977-7964>



2017년 2월: 호서대학교 전기공학과 (공학사)  
2017년 9월~현재: 성균관대학교 전자전  
기컴퓨터공학과 석사과정  
[주 관심분야] RFIC 레이더 시스템

박 재 현[성균관대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-8303-6273>



2016년 2월: 성균관대학교 반도체시스템  
공학과 (공학사)  
2016년 3월~현재: 성균관대학교 전자전  
기컴퓨터공학과 석박사 통합과정  
[주 관심분야] RFIC 레이더 시스템

이 권 학 [한국과학기술원(KAIST)/석사과정]

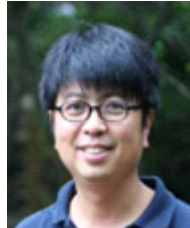
<https://orcid.org/0000-0002-9302-5834>



2019년 2월: 성균관대학교 반도체시스템  
공학과 (공학사)  
2019년 3월~현재: 한국과학기술원(KAIST)  
전기 및 전자공학부 석사과정  
[주 관심분야] RFIC 레이더 신호처리

김 병 성[성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-3084-6499>



1989년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공  
학사)  
1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공  
학석사)  
1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공  
학박사)  
1997년 3월~현재: 성균관대학교 정보통  
신대학 교수  
[주 관심분야] RFIC 설계, RF 소자모델링

김 준 성 [성균관대학교/석박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-0036-4034>



2014년 2월: 광운대학교 전자재료공학과  
(공학사)  
2014년 3월~현재: 성균관대학교 전자전  
기컴퓨터공학과 석박사 통합과정  
[주 관심분야] RFIC 레이더 시스템

송 림 [성균관대학교/연구교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7088-1777>



1997년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공  
학사)  
1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공  
학석사)  
2006년 8월: 미국 USC 전기공학부 (공학  
박사)  
2013년 5월~현재: 성균관대학교 정보통  
신대학 연구교수  
[주 관심분야] 밀리미터파 회로, 안테나 및 시스템