

FMCW 레이더의 다수 표적 탐지 알고리즘 제안

Multi-Target Detection Method Using FMCW and CW

윤재혁 · 유승오 · 양재원 · 이동주

Jaehyuk Yoon · Seongoh Yoo · Jaewon Yang · Dongju Lee

요 약

최근 레이더를 이용하여 표적을 실시간으로 탐지하고, 표적의 거리, 속도, 각도 정보 등을 추출하는 방법에 대해 많은 연구가 진행되고 있다^{[1]~[3]}. 기존 주파수 변조 방식의 연속 신호 레이더는 하나의 표적을 탐지할 때 펄스 레이더에 비해 높은 거리 해상도와 높은 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, 이하 SNR)를 장점으로 갖는다. 하지만, 다수 표적이 존재하는 경우, 반사 신호의 도플러 효과에 의해 고스트 표적(Ghost target)이 발생하며, 오탐지(false detection) 문제를 발생시킨다. 본 논문에서는 기본적인 주파수 변조 연속 신호(frequency modulation continuous waveform, 이하 FMCW)와 연속 신호(continuous waveform, 이하 CW)를 이용한 방식을 소개하고, 제안하는 FMCW와 CW의 신호 처리 방식을 이용하여 다수 표적을 분리 탐지하고, 고스트 표적 신호를 제거하는 기법을 소개한다.

Abstract

Recently, many researches have been conducted on a method of extracting target distance, velocity, and angle information from a radar by detecting a target in real time. Conventional frequency-modulated continuous signal radars have the advantage of higher distance resolution and higher signal-to-noise ratio than pulse radar when detecting a single target. However, when multiple targets are present, Ghost targets are created by the Doppler effect of the reflected signal and cause a false detection problem. In this paper, we introduce a basic frequency modulated continuous signal and a continuous signal method, and introduce a technique for detecting multiple targets and removing Ghost target signals through the proposed FMCW and CW signal processing methods.

Key words: Multi-Target, FMCW, CW, Detection, Radar

I. 서 론

유도무기 및 총포탄약 비행시험에서 이벤트 및 자탄 분리 등 다수 표적 계측이 필요한 시험요구조건이 발생되고 있다. 기존의 탐지 방식들은 차량의 이동환경에 맞추어 설계된 방식으로써 FMCW의 한 주기 내에서 거리

및 속도 변화가 없다는 가정 하에 검증되어 왔다. 하지만, 유도무기 및 총포탄약 비행시험의 경우 FMCW의 한 주기 내에서 표적의 거리 및 속도 변화가 크기 때문에 개선된 처리방식이 필요하다.

FMCW 신호는 기본적으로 톱니(sawtooth), 삼각(triangular), 부등변 사각(trapezoid) 형태의 파형을 이용한다. 여기서

「이 연구는 국방과학연구소(Agency for Defense Development) 연구비로 연구되었음.」

국방과학연구소 5기술연구본부(The 5 R&D Institute, Agency for Defense Development)

· Manuscript received November 12, 2019 ; Revised January 6, 2020 ; Accepted January 14, 2020. (ID No. 20191112-120)

· Corresponding Author: Jae-Hyuk Yoon (e-mail: jh_yoon@add.re.kr, kgandtmac@gmail.com)

각 파형들은 고유한 한계점을 갖는다. 톱니파의 경우, 신호처리를 통해 얻은 거리 프로파일을 추적하고, 추적된 거리 프로파일을 FFT(Fast Fourier Transform) 연산하여 속도 값을 구하는 방법을 사용한다. 하지만, 장거리 및 고속 표적은 톱니파의 변조 주기를 무한정 줄일 수 없기 때문에 적용하기 어렵다. 삼각파의 경우, 고속 신호에도 적용이 가능하나, 상승 첩(up-chirp)과 하강 첩(down-chirp) 간에 발생하는 고스트 표적 신호를 제거하기 어려워 다수 표적 상황에 적용하기 어렵다. 부등변 삼각파형 또한 거리 정보와 속도 정보가 혼재되어 속도가 같은 다수 표적에 의한 고스트 표적을 제거하기 어렵다.

FMCW 파형을 단독으로 사용할 경우, 앞서 설명한 문제점들을 해결할 수 없으므로 새로운 탐지 방식이 필요하다. 먼저, 기존의 다수 표적 탐지 알고리즘을 소개하고, 유도무기 및 총포탄약 비행시험에 맞는 환경에서 사용할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 제안된 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 검증 결과를 소개한다.

II. FMCW 레이다 배경이론

일반적으로 FMCW 레이다의 다수 표적 탐지 알고리즘은 크게 두 가지로 나뉜다. 연속된 고속 톱니파를 이용하는 방식과^[4], 기울기가 다른 FMCW를 송신하여 다수 표적 신호를 구별하는 방식이 있다^[5].

첫 번째 방식인 고속 톱니파를 이용하는 경우, 그림 1과 같이 짧은 주기를 갖는 톱니파 형태의 FMCW 신호를 연속으로 송수신하여 얻은 거리 프로파일을 생성한다. 변조 주기는 속도 해상도를 높이기 위해선 CPI(Coherent Pulse Interval) 내에 최대한 많은 거리 프로파일을 생성해야 하

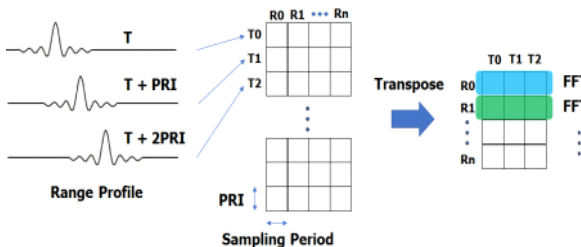
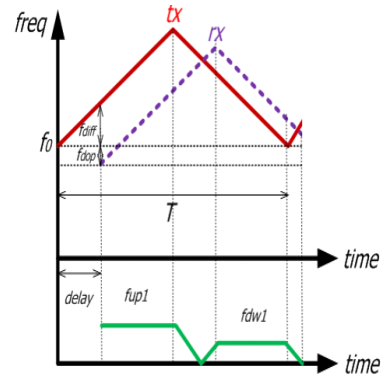


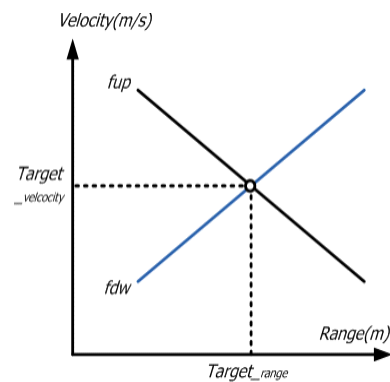
그림 1. 다수 고속 톱니파를 이용한 탐지방식
Fig. 1. Detection method using fast sawtooth waveform.

며, 짧은 PRI(Pulse Repetition Interval)를 갖는 톱니파를 사용한다. 주로 PRI는 수십 μs 내에서 설정하며, 상대적으로 짧은 거리, 낮은 속도를 갖는 표적 신호 탐지에 적합하며, 고속 표적을 탐지하기에 시간적으로 어려움이 있다. 장거리 표적 신호를 얻기 위해 긴 PRI를 사용할 경우, CPI 시간동안 같은 거리에 표적 신호가 존재하지 않고 이동하기 때문에 속도 정보를 얻을 수 없게 된다. 또한 FFT 연산의 반복횟수가 많아지기 때문에 연산량이 많아지는 단점이 있다.

두 번째 방식인 기울기가 다른 삼각파를 이용하는 경우, 그림 2(a)와 같이 표적이 하나일 때 기울기가 다른 삼각 FMCW를 통해서 총 4개의 거리, 속도 정보가 포함된



(a) 기울기가 다른 FMCW를 이용한 탐지방식
(a) Detection method using various slope FMCW



(b) 데이터 결합을 통해 표적 거리-속도 획득
(b) Acquisition of range-velocity with data association

그림 2. FMCW를 이용한 기존 탐지 방식
Fig. 2. Convention detection technique of FMCW.

비트주파수를 검출한다. 각 비트주파수를 첫 번째 삼각파의 업 비트 주파수 f_{up1} , 다운 비트 주파수 f_{dw1} , 변조 주기 $T1$, 두 번째 삼각파의 업 비트 주파수 f_{up2} , 다운 비트 주파수 f_{dw2} , 변조 주기 $T2$, 중심 주파수 f_0 , 도플러 주파수 f_{dop} , 거리에 따른 주파수 차이 f_{diff} 라고 정의하고, 각 비트 주파수를 이용하여 데이터 결합함으로써 그림 2(b)의 그래프로 표현할 수 있고, 이를 통해 표적의 거리 및 속도 값을 구할 수 있다. 이 연산은 앞선 고속 톱니파를 이용하는 방식에 비하여 상대적으로 연산량이 적은 점과 PRI를 길게 가져감으로써 장거리 표적을 추적 시 높은 SNR값을 가질 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 이 방법 또한 다수 표적 추적을 할 때 같은 거리에 있는 표적 간에 구분하기 어렵다는 단점이 있으며, 속도가 빠른 표적의 경우 긴 PRI 시간동안 축적된 FFT 결과에 의해 비트 주파수의 피크 점 검출에 어려움을 야기한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점들을 보완하고, 장거리 및 고속의 특징을 갖는 유도무기 및 총포탄약 시험에서 다수 표적을 탐지하는 알고리즘을 제안한다.

먼저 III장에서는 제안하는 다수 표적 탐지 알고리즘을 설명하고, IV장에서는 시뮬레이션을 통한 탐지 알고리즘 성능 검증 결과를 소개하며, V장을 통해 결론 및 향후 연구 진행방향을 보여주하고자 한다.

III. 제안된 다수 표적 탐지 알고리즘

본 장에서는 제안된 탐지 알고리즘을 설명한다. 기본적으로 삼각 FMCW 파형을 이용한 단일 표적의 거리-속도 정보를 획득하는 방식을 설명하고, 제안된 파형을 소개한 후 다수 표적 탐지 방식을 기술한다.

기본적인 기울기가 항상 같은 삼각파의 경우, 그림 2(a)의 f_{diff} 와 f_{dop} 를 이용하여 비트 주파수를 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{cases} f_{up} = f_{diff} + f_{dop} \\ f_{dw} = f_{diff} - f_{dop} \end{cases} \quad (1)$$

도플러 주파수와 속도의 상관관계는 식 (2)로 정의된다. c 는 빛의 속도(m/s), v 는 표적의 상대 속도(m/s)이다.

$$f_{dop} = \frac{2vf_0}{c} \quad (2)$$

삼각 FMCW의 기울기를 이용하여 f_{diff} 를 정리하면 식 (3)으로 정의할 수 있다.

$$f_{diff} = \frac{B^* \tau}{T/2} = \frac{4BR}{cT} \quad (3)$$

여기서 τ 는 왕복시간(s)이며, $2R/c$ 로 정의된다. B 는 변조 대역폭(Hz), R 은 거리(m)이다.

식 (1)에 식 (2)와 식 (3)을 대입하여 R 과 v 에 관한 식으로 정리하면 식 (4)와 같이 표현되며, 두 식을 v 에 관한 식으로 다시 정리하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= \frac{cT}{8B}(f_{dw} - f_{up}) \\ v &= \frac{c}{4f_0}(f_{dw} + f_{up}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$v = \frac{1}{f_0} \left(\frac{cf_{up}}{2} - \frac{2B}{T} \right) \quad (5)$$

상기 설명된 방식을 이용하여 단일 표적의 거리-속도 정보를 구할 수 있으나, 다수 표적의 경우 표적의 개수가 N 개일 때 N^2 만큼 표적 후보가 생성되기 때문에 적용하기가 어렵다. 예를 들어 그림 3과 같이 표적 신호가 두 개인 경우, f_{up} , f_{dw} 에 의해 고스트 표적을 포함하여 총 4개의 표적 후보가 생성되기 때문이다. 검정색 선이 표적 1에 대한 비트 주파수이고, 빨간색 선이 표적 2에 대한 비

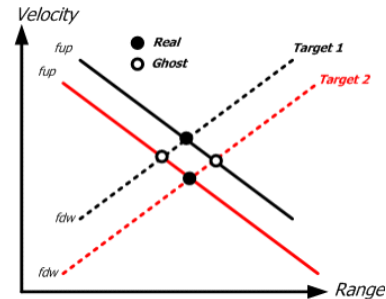


그림 3. 2개 표적이 존재할 때
Fig. 3. The case of two target in the beam.

트 주파수이다. 기울기가 다른 두 개의 톱니파와 하나의 연속파를 혼합하여 이용하는 방식을 제안하며, 그림 4를 통해서 사용되는 파형을 확인할 수 있다. 제안된 파형을 이용하여 각 그래프의 교점을 찾는 방식으로 다수 표적을 분리 탐지할 수 있다.

톱니파에 적용하기 위해 식 (4)의 두 식을 R 에 대한 수식으로 정리하면 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$R = \frac{cT}{4B}(f_{up} - f_{dop}) \quad (6)$$

두 표적에 대한 파형 구성 및 비트 주파수 그리고 도플러 주파수 신호를 그림 4와 같이 얻을 수 있으며, 이렇게 얻어진 값을 식 (6)에 대입하면 그림 5와 같은 그래프로 표현할 수 있다. 하지만, 그림 5의 그래프에서 거리 혹은 속도의 모든 값을 비교하여 교점을 찾아내는 것은 많은 연산량이 필요하고, 실시간 처리하는데 어려움이 있다. 그러므로 연속파와 주파수 변조파 중 상대적으로 SNR값이 높은 연속파에 의해 분리 탐지된 표적만 제한적으로 연산을 수행하는 방식을 제안한다.

두 표적의 거리 및 속도를 각각(320 m, 700 m/s), (360 m, 705 m/s)으로 설정하고, 파형은 표 2와 같이 사용하였

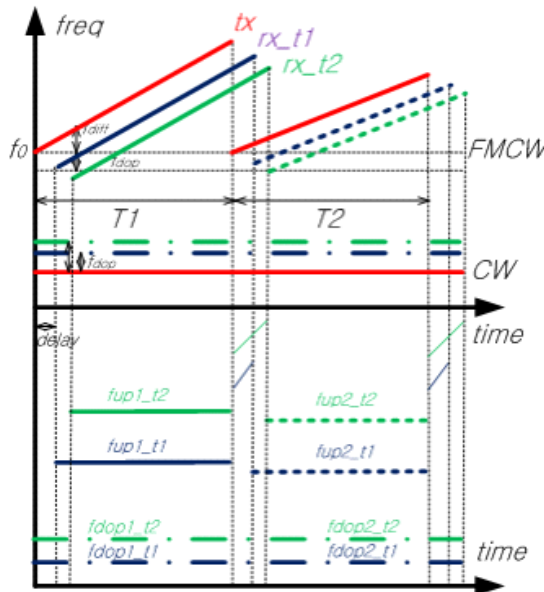


그림 4. 제안된 기울기가 다른 삼각파 및 연속파 구성
Fig. 4. Proposed configuration of waveform.

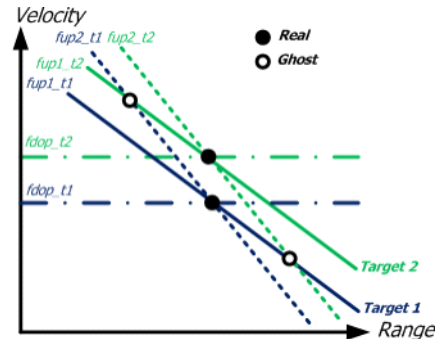


그림 5. 두 표적 조건에서 주파수 수신 결과
Fig. 5. The result of received signal with two targets.

을 때, 표 1과 같이 연속파(CW)를 통해 얻은 도플러 주파수(f_{dop})를 기준으로 2개의 표적을 분리 탐지할 수 있다. 탐지된 두 개의 f_{dop} 값 중 하나의 값을 식 (6)에 대입하

표 1. 두 표적 신호 탐지 예
Table 1. Example of two target detection.

Detected target	CW	FMCW		R	Comparison	Result
	f_{dop} (kHz)	B (MHz)	f_{up} (kHz)	(m)		
Target #1 f_{dop_t1} (699.9 m/s)	48.9992	50	f_{up1_t1}	319.5	$f_{up1_t1} - f_{up2_t1}$	0
			57.5031		$f_{up1_t1} - f_{up2_t2}$	39.1
			f_{up1_t2}	358.9	$f_{up1_t2} - f_{up2_t1}$	39.4
			70.6414		$f_{up1_t2} - f_{up2_t2}$	0.3
		40	f_{up2_t1}	319.5	Minimum value $f_{up1_t1} - f_{up2_t1}$	
			36.2155			
			f_{up2_t2}	358.6	$R=319.5m$	
			46.6348			
Target #2 f_{dop_t2} (704.9 m/s)	49.3492	50	f_{up1_t1}	320.5	$f_{up1_t1} - f_{up2_t1}$	0.4
			57.5031		$f_{up1_t1} - f_{up2_t2}$	39.4
			f_{up1_t2}	359.9	$f_{up1_t2} - f_{up2_t1}$	39
			70.6414		$f_{up1_t2} - f_{up2_t2}$	0
		40	f_{up2_t1}	320.9	Minimum value $f_{up1_t2} - f_{up2_t2}$	
			36.2155			
			f_{up2_t2}	359.9	$R=359.9m$	
			46.6348			

고, 주파수 변조파(FMCW)로부터 얻어진 비트 주파수(f_{up})값을 차례로 대입하여 각 경우에 대한 거리 값(R)을 계산한다. 그 후, 얻어진 R 값을 서로 비교하여 가장 작은 차이 값을 갖는 경우의 R 값을 표적의 거리 값으로 정의한다.

높은 가속도를 갖는 표적의 경우, $T1$ 와 $T2$ 사이에 속도(f_{dop})의 변화가 생기게 되며 R 값을 연산할 때 오차를 발생시킨다. 이러한 오차를 제거하기 위해 도플러 주파수의 기울기를 통해 얻은 가속도 값을 이용하여 하나의 표적에 대한 $T1(f_{dop1})$ 과 $T2(f_{dop2})$ 주기 내 속도를 따로 구하여 적용함으로써 오차를 최소화하였다.

IV. 실험 결과

모의실험의 표적은 자탄이 분리되는 탄을 기준으로 요구조건을 선정하였으며, 다수 표적에 대한 요구조건은 현재 군에서 운용 중인 155 mm OOO 탄을 기준으로 최대 표적 개수 8개, 최대 거리 10 km, 분리 이후 최대 순간속도 1,500 m/s로 설정하였다. 모의실험의 매개변수는 표 2를 통해서 확인할 수 있으며, 가상 표적에 대한 거리, 속도 설정 값 및 모의실험 결과는 표 3을 통해서 확인할 수 있다. 표 3의 결과는 잡음이 없는 상태에서의 결과이며, SNR 15 dB 환경에서 시뮬레이션해 보았을 때 탐지된 거리, 속도에 오차가 발생할 뿐 8개의 표적이 분리 탐지됨을 확인할 수 있었다.

III 장에서 설명한 다수 표적 탐지 알고리즘을 LabVIEW로 구현하여 모의실험 수행한 결과, 그림 6과 같이 가상

표 2. 모의실험 매개변수
Table 2. Simulated parameters.

Parameters		Value	Unit
FMCW #1	B	50	MHz
	Period	5	msec
FMCW #2	B	40	MHz
	Period	5	msec
Resolution of velocity		0.5	m/s
Center frequency	FMCW	10.501	GHz
	CW	10.500	

표 3. 표적의 거리 및 속도 설정 값

Table 3. Simulated range-velocity setting.

	Virtual target info.		Simulation results	
	Range (m)	Velocity (m/s)	Range (m)	Velocity (m/s)
Target #1	10,000	200	9,999.82	199.979
Target #2	9,900	300	9,899.38	299.978
Target #3	9,800	500	9,797.82	499.979
Target #4	9,700	700	9,698.83	699.988
Target #5	9,600	750	9,598.74	749.991
Target #6	9,500	900	9,497.79	899.994
Target #7	9,400	1,100	9,398.77	1,099.99
Target #8	9,200	1,500	9,197.73	1,499.98

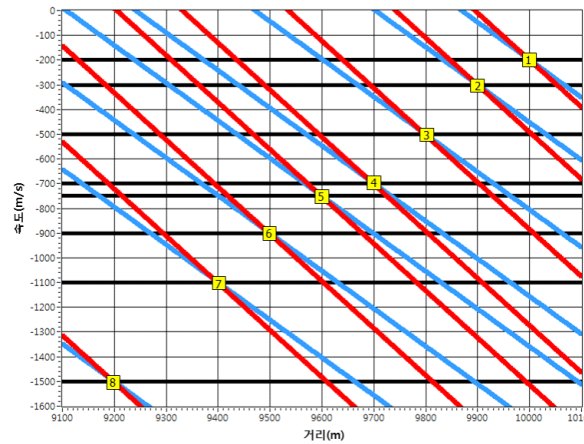


그림 6. LabVIEW를 이용한 다수 표적 조건에서 모의실험 결과
Fig. 6. The results of simulation for multi-target using LabVIEW.

표적에 의한 그래프를 획득할 수 있었다. 그림 6의 빨간 선은 50 MHz 대역폭 FMCW 신호의 비트 주파수에 의한 그래프, 파란선은 40 MHz 대역폭 FMCW신호의 비트 주파수에 의한 그래프, 검은선은 CW신호에 의한 도플러 주파수이다.

V. 결 론

본 논문에선 실제 군에서 사용되는 다탄두 무기의 이밴트 및 자탄 분리 등에서 발생하는 거리, 속도 조건을 기준으로 다수 표적을 분리 탐지하는 방법을 제안하였다.

LabVIEW 언어를 기반으로 다수의 가상 표적의 거동 정보를 설정하고, 신호처리를 통해 제안된 다수 표적 탐지 기술을 검증하였다. 현재 제작 중인 시제 레이더를 이용해 실제 상황에서 제안된 알고리즘을 검증하고, 유도무기 및 총포탄약 시험에서 사용할 계획이다.

References

- [1] W. Wang, J. Du, and J. Gao, "Multi-target detection method based on variable carrier frequency chirp sequence," *Sensor*, vol. 18, no. 10, p. s18103386, Oct. 2018.
- [2] E. Hyun, Y. S. Jin, and J. H. Lee, "A pedestrian detection scheme using a coherent phase difference method based on 2D range-Doppler FMCW radar," *Sensors*, vol. 16, no.

1, p. s16010124, 2016.

- [3] M. Kronauge, H. Rohling, "New chirp sequence radar waveform," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 4, pp. 2870-2877, Oct. 2013.
- [4] W. Sediono, "Method of measuring Doppler shift of moving targets using FMCW maritime radar," in *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALe)*, Bali, 2013, pp. 378-381.
- [5] E. Hyun, J. H. Lee, "A method for multi-target range and velocity detection in automotive FMCW radar," in *2009 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, St. Louis, MO, Oct. 2009, pp. 1-5.

윤 재 혁 [국방과학연구소/선임연구원]

<http://orcid.org/0000-0002-7124-5879>



2012년: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
2014년: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2014년~2016년: National Instruments Engineer
2016년~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더, RF 회로, 신호처리 등

양 재 원 [국방과학연구소/선임연구원]

<http://orcid.org/0000-0002-2553-2033>



2011년: 서울과학기술대학교 전자공학과 (공학사)
2014년: 서울과학기술대학교 전자공학과 (공학석사)
2014년~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더, RF 회로, 신호처리 등

유 승 오 [국방과학연구소/선임연구원]

<http://orcid.org/0000-0003-0855-8247>



2010년: 충남대학교 전자전파정보통신공학과 (공학사)
2012년: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2012년~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더, RF 시스템 등

이 동 주 [국방과학연구소/연구원]

<http://orcid.org/0000-0002-3398-5024>



2015년: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
2017년: 중앙대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2017년~현재: 국방과학연구소 연구원
[주 관심분야] 레이더, RF 시스템, 안테나 등