

협대역 레이다 시스템에서 표적의 고해상도 거리 측면도 형성에 관한 연구

조병래*¹, 김종만*², 김찬홍*³, 홍성원**

A Study on High-Resolution Range Profile Construction for Target in Narrowband Radar Systems

Byung-Lae Cho*¹, Jong-Mann Kim*², Chan-Hong Kim*³, and Sung-Won Hong**

요 약

본 논문에서는 협대역 레이다 시스템에서 표적의 고해상도 거리 측면도를 형성하고, 표적의 산란점 구별이 용이하도록 하는 품질 향상 기법을 제안하였다. Sparse한 주파수 환경에서 획득된 데이터를 시간 영역 상관(Time-Domain Correlation) 방법을 이용하여 표적의 고해상도 거리 측면도가 획득된다는 것을 확인하였다. 또한 제한된 거리 셀 내에서 여러 개의 산란점이 존재하는 표적의 경우 산란점 구별이 용이하지 않았다. 이를 개선하기 위하여 획득된 데이터를 선별적으로 제외하여 거리 측면도를 형성한 후 고해상도 거리 셀 별로 최소값을 선택하는 방법을 제안하였으며, 시뮬레이션을 통해 제안 방법으로 해상도 및 부엽준위가 향상된 거리 측면도를 획득할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

This study proposes the construction method of the high-resolution range profile for target in narrowband radar systems and the quality improvement method of it. Using Time-Domain Correlation method, it was confirmed that the high-resolution range profile (HRRP) aspect of target was acquired from the data obtained in sparse frequency environment. Moreover, in the case of a target in which multiple scattering points are present within a limited range cell, it was not easy to distinguish the scattering points. To improve it, we propose a method to select the minimum value for each HRRP cell after forming the HRRP aspect of selectively excluding acquired data. Then we conformed by simulation that the proposed method was able to obtain the high-resolution range profile with the improved resolution and sidelobe level.

Keywords

high-resolution range profile, time-domain correlation method, narrowband radar, sparse frequency environment

* 국방과학연구소 책임연구원
- ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0002-9160-3362>(교신저자)
- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0002-0616-639X>
- ORCID³: <http://orcid.org/0000-0002-7877-1521>
** 국방과학연구소 선임연구원
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0000001-9509-0691>

· Received: Jul. 08, 2010, Revised: Jul. 24, 2020, Accepted: Jul. 27, 2020
· Corresponding Author: Byung-Lae Cho
Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, DaeJeon, 34186, Korea.
Tel.: +82-42-821-2073, Email: chobl@add.re.kr

1. 서론

많은 레이더 시스템들이 군사적이나 산업적 목적으로 여러 분야에 적용되어지고 있다. 레이더는 주야 및 기상 조건에 상관없이 표적을 탐지하는 장점이 있다[1][2]. 수신된 레이더 신호에는 표적에 대한 정보를 포함하고 있으며, 1차원 산란점 분포들은 표적 인식 등 연구 분야에 활용된다[3].

1차원 레이더 특성(Signature) 중의 하나인 고해상도 거리 측면도(HRRP, High-Resolution Range Profile)는 표적의 서로 다른 산란점들의 거리 정보가 포함되어 있는 위상상의 합으로 표현되어 산란점의 위치와 크기 정보를 나타낸다[4]. 협대역 레이더 시스템에서 획득되는 거리 측면도는 낮은 거리 해상도로 인하여 표적의 여러 산란점을 구별할 수 없다. 협대역 레이더 시스템에서 고해상도 거리 측면도를 획득하기 위한 방법으로 주파수 호핑을 이용하는 방법들이 소개되고 있다[5][6]. 해당 표적에 대한 주파수별 RCS(Radar Cross Section) 데이터로부터 1차원 역 디지털 푸리에 변환(IDFT, Inverse Discrete Fourier Transform)을 통하여 쉽게 고해상도 거리 측면도를 형성할 수 있다[4].

그러나 외부의 간섭이나 전파 교란(Jamming) 신호 등에 의하여 주어진 대역폭에 해당하는 RCS 데이터를 수집하지 못할 경우가 발생하며, 기존의 역 디지털 푸리에 변환을 수행하여 고해상도 거리 측면도를 획득할 경우 부엽 레벨이 증가하고 신호왜곡 등이 발생할 수 있다[4]. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 압축 센싱(Compressive sensing) 이론 기반의 sparse 복원 알고리즘을 적용하는 연구들이 활발히 수행되고 있다[4][7].

그러나 실제 협대역 레이더가 운용되는 주파수 대역에 제한이 있어, 주파수 호핑 기법을 사용하여 RCS 데이터를 수집하더라도 획득되는 데이터의 개수가 적다. 또한 레이더가 운용되는 환경에 따라 주파수 호핑을 일정한 간격으로 수행하지 못할 수도 있다. 이럴 경우 실시간 처리를 요구하는 레이더 시스템에서는 앞서 언급한 복원 알고리즘을 적용할 수 없다. 본 논문에서는 주파수 자원이 열악한 환경에서 운용되는 협대역 레이더 시스템에서 표적의 고해상도 거리 측면도를 획득할 수 있는 방법에 대

해 제안하였다. 제안한 방법은 외부 간섭이나 전파 교란 등 sparse한 주파수 환경에서 고해상도 거리 측면도를 획득하기 위하여 시간 영역 상관 방법을 적용하는 것이다. 또한 제한된 자원 하에서 거리 측면도의 품질을 향상시키기 위하여 특정 데이터를 임의적으로 제외하여 고해상도 거리 측면도를 여러 개 형성하여, 해상 거리 픽셀 값 중 최소값을 선택하는 방법도 제안하였다.

2장에서는 주파수 호핑 기법을 통해 고해상도 거리 측면도를 획득하는 방법을 소개하고, 3장에서는 시뮬레이션 결과들을 보여준다. 4장에서는 시뮬레이션 결과로부터 결론을 도출한다.

II. 협대역 레이더 시스템에서 표적의 고해상도 거리 측면도 획득 방법

2.1 표적의 고해상도 거리 측면도 획득 방법

그림 1은 협대역 레이더 시스템에서 표적의 고해상도 거리 측면도를 획득하기 위한 계단 주파수 개념도를 보여주고 있다. 1개의 버스트(Burst) 내의 펄스들은 중심 주파수를 호핑하며 송수신하여 표적 신호를 수집한다. 각 펄스 별 대역폭은 동일하거나, 주파수 가용 환경에 따라 상이하더라도 무관하다. 중심 주파수는 각 펄스 별 대역폭보다는 같거나 작도록 하여 호핑하도록 설계한다.

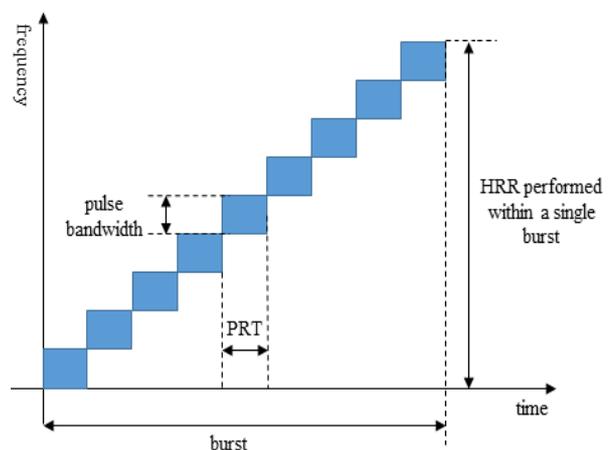


그림 1. 측정을 위해 설계된 계단 주파수 버스트 파형의 묘사도.

Fig. 1. A graphical depiction of the step frequency burst waveform designed for the measurement campaign

1개의 버스트 내 수신 신호들은 NCI(Non-Coherent Integration) 및 CFAR(Constant False Alarm Rate) 프로세싱을 통해 표적 유무를 판단한다. 각 펄스 별 대역폭이 상이하더라도 샘플링 주파수를 동일하게 설정하여 거리 셀 단위가 동일하게 설정한다. CFAR 프로세싱을 통해 탐지된 표적에 대해서 그림 2와 같이 해당 거리 셀에 대한 I/Q 데이터를 활용하여 역 디지털 푸리에 변환 또는 시간 영역 상관(TDC, Time Domain Correlation) 방법[8]을 활용하여 표적에 대한 고해상도 거리 측면도를 획득할 수 있다.

각 펄스 별 대역폭이 모두 동일하고 중심 주파수 호핑 간격이 동일할 경우 역 디지털 푸리에 변환을 통하여 쉽게 고해상도 거리 측면도를 형성할 수 있으며, 만약 중심 주파수 호핑 간격이 일정하지 않을 경우에는 식 (1)과 같이 시간 영역 상관 방법을 활용하여 고해상도 거리 측면도를 획득할 수 있다.

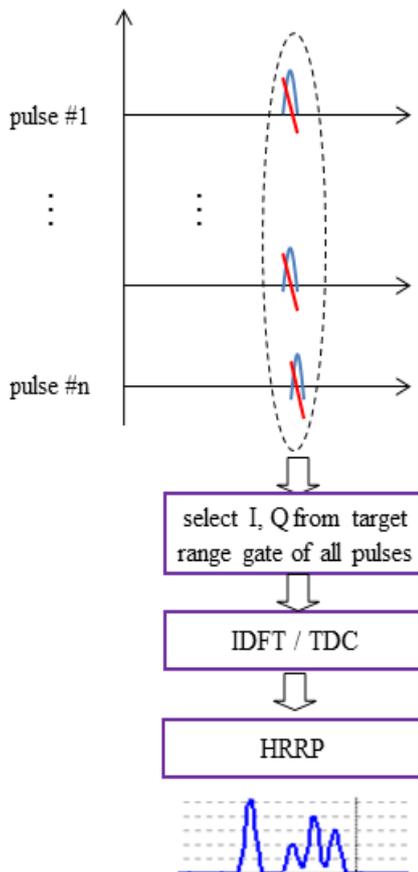


그림 2. 표적에 대한 고해상도 거리 측면도 획득 개념도.
Fig. 2. A concept diagram of HRRP acquisition for target

$$R_{TDC}(\Delta r_i) = \int_{\omega} s(\omega, r_0) \exp\{j\omega t_i\} d\omega \quad (1)$$

$$t_i = \frac{2}{c}(r_0 + \Delta r_i)$$

여기에서 s 는 수신된 신호이며 ω 는 각 주파수이다. r_0 는 NCI를 통해 획득된 거리 프로파일 상에서 탐지된 표적의 거리 정보이며, Δr_i 는 r_0 내 표적의 위치를 나타낸다.

2.2 고해상도 거리 측면도의 품질향상 기법

일반적으로 운용되는 레이다 시스템의 가용 주파수 대역은 여러 시스템들과의 간섭 등을 고려하여 제한적으로 사용된다. 이러한 환경에서 고해상도 거리 측면도의 해상도는 필연적으로 제한된다. 또한 특정한 대역에서는 사용이 불가하거나 제밍 등에 의해 이용이 제한될 수도 있다.

본 논문에서는 이러한 환경에서 고해상도 거리 측면도의 품질을 향상시키는 방법에 대해 그림 3과 같이 제안하였다.

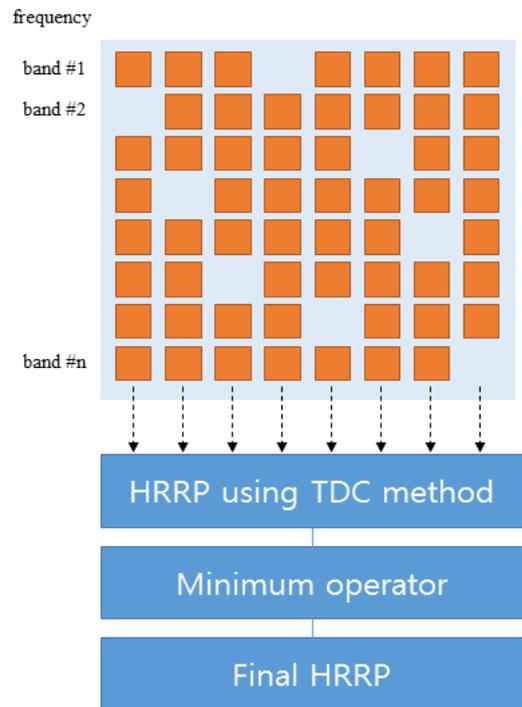


그림 3. 고해상도 거리 측면도 품질향상 기법 개념도.
Fig. 3. A concept diagram of quality improvement for HRRP

먼저 1개 버스트에서 획득된 n 개 펄스 데이터에 대해서 임의적으로 특정 펄스 데이터를 제외하고 고해상도 거리 측면도를 형성한다. 제외되는 특정 펄스 데이터가 중복되지 않도록 하여 여러 번 수행한다. 이렇게 형성된 고해상도 거리 측면도를 각 거리 픽셀별로 최소값을 선택하여 품질이 향상된 최종 고해상도 거리 측면도를 얻을 수 있다.

참고 문헌 [9]의 전방관측 영상레이더에서 영상 품질을 향상시키기 위한 방법은 임의적으로 안테나 데이터를 선택하여 여러 장의 영상을 만들어 영상의 픽셀별로 최소값을 획득하는 것이다. 이와 유사하게 특정 펄스 데이터를 제외할 경우 표적 정보는 그대로이나 부엽특성이나 잡음 특성이 변화하는 특성을 활용하였다.

III. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 데이터를 이용하여 제안한 알고리즘의 검증은 수행하였다. 시뮬레이션에서 주파수 대역은 S대역, 각 펄스 별 대역폭은 20MHz ~ 30MHz로 가변되도록 설정하였으며, 전체 대역폭은 300MHz로 하였다. 고해상도 거리 측면도를 획득하기 위한 펄스 수 n 은 12로 설정하였다. 펄스별 획득된 데이터의 거리 해상도는 5~7.5m이며(펄스별 대역폭에 따라 상이함), 그림 2에 제시된 방법을 통해 획득된 고해상도 거리 측면도에서의 해상도는 0.5m이며, 고해상도 거리 측면도의 거리셀 단위는 0.015m가 되도록 하였다. NCI를 통해 표적이 탐지되어야 하므로 SNR은 탐지가 될 수 있도록 충분히 크게 설정하였다. 부엽 특성을 향상시키기 위하여 hamming 윈도우를 적용하였다.

그림 4는 시뮬레이션을 통해 단일 산란점을 가지는 표적에 대한 고해상도 거리 측면도를 보여주고 있다. 그림 4에서 푸른 색 실선은 재밍이 발생하지 않았을 경우 획득한 고해상도 거리 측면도이며, 검은색 점선은 특정 주파수 대역(12개 대역 중 5번째 대역)을 사용하지 못하여 시간 영역 상관 방법을 사용하여 획득한 고해상도 거리 측면도이다. 붉은색 실선은 획득하지 못한 주파수 대역에 대한 데이터 값을 (선형) 내삽법[10]을 이용하여 예측한 후 획득

한 고해상도 거리 측면도이다.

그림 5는 시뮬레이션을 통해 다중 산란점을 가지는 표적에 대한 고해상도 거리 측면도를 보여주고 있다. 그림 5에서 푸른 색 실선은 재밍이 발생하지 않았을 경우 획득한 고해상도 거리 측면도이며, 검은색 점선은 특정 주파수 대역(12개 대역 중 5번째 대역)을 사용하지 못하였을 경우 획득한 고해상도 거리 측면도이다. 붉은색 실선은 획득하지 못한 주파수 대역에 대한 데이터 값을 (선형) 내삽법을 이용하여 예측한 후 획득한 고해상도 거리 측면도이다.

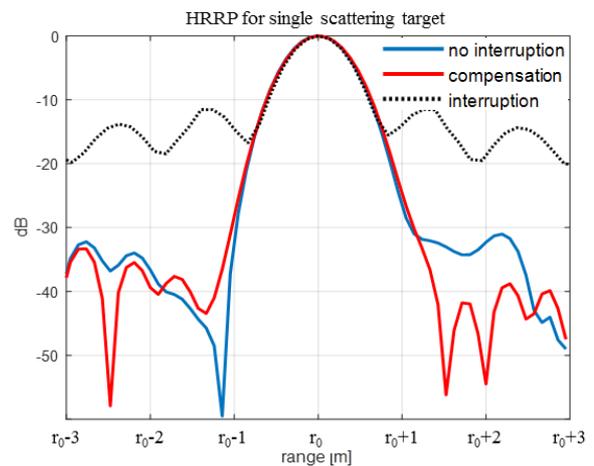


그림 4. 재밍 환경에서 단일 산란 표적에 대한 고해상도 거리 측면도.

Fig. 4. HRRP for single-scattering target in a jamming environment

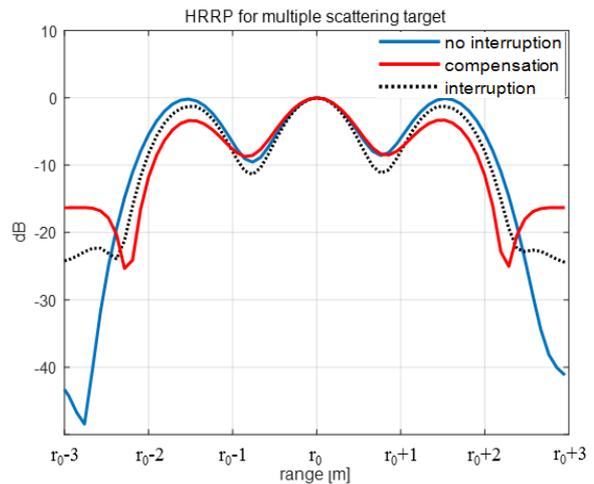


그림 5. 재밍 환경에서 다중 산란 표적에 대한 고해상도 거리 측면도.

Fig. 5. HRRP for multiple-scattering target in a jamming environment

단일 산란점을 가지는 표적의 경우 선형 내삽법 만으로도 충분히 보상이 되는 것을 그림 4에서 확인할 수 있다. 그러나 다중 산란점을 가지는 표적의 경우 내삽법을 활용한 보상 전·후의 고해상도 거리 측면도 결과는 거의 유사함을 알 수 있다.

그림 6은 다중 산란점을 가지는 표적에 대하여 고해상도 거리 측면도 품질 향상 기법을 적용한 결과이다. 그림 6에서는 그림 5와 비교하여 표적의 신호 크기를 10dB 작게 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6에서 붉은색 실선은 제안된 알고리즘을 적용하였을 경우 획득한 고해상도 거리 측면도이다. 기존 고해상도 거리 측면도와 비교하여 표적의 산란점 구별이 훨씬 용이하며, 본 시뮬레이션에서는 해상도의 경우 약 20% 향상되었으며 부엽준위는 4dB 이상 낮아지는 것을 확인하였다.

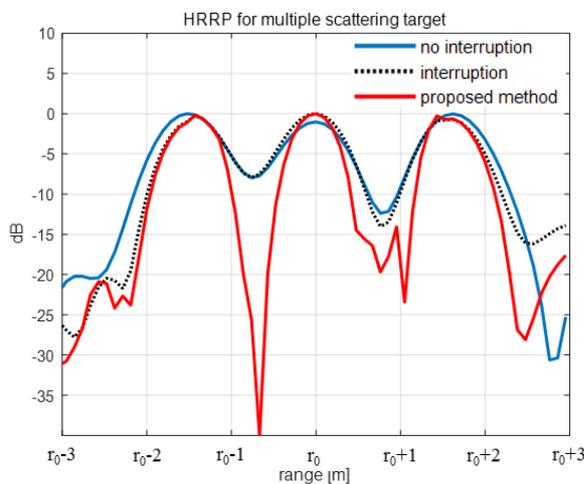


그림 6. 재밍 환경에서 다중 산란 표적에 대한 고해상도 거리 측면도 품질 비교.

Fig. 6. Comparison of HRRP for multiple-scattering target in a jamming environment

IV. 결 론

본 논문에서는 협대역 레이다 시스템에서 표적의 고해상도 거리 측면도를 획득하기 위한 파형 및 형성 방법을 제안하였다. 또한 고해상도 거리 측면도의 품질을 향상하기 위한 기법을 제안하였다. 외부의 간섭이나 전파 교란 등에 의해 특정 주파수를 사용하지 못할 경우에도 시간 영역 상관 방법을 이용하여 표적의 고해상도 거리 측면도가 획득되는

것을 확인하였다. 데이터가 많지 않은 상황에서 내삽 알고리즘으로 보상하였을 경우 고해상도 거리 측면도에는 큰 영향이 없음을 확인하였다. 또한 선별적으로 획득된 데이터를 제외하여 거리 측면도를 형성한 후 픽셀별 최소값을 선택하는 방법을 통해 산란점 구별이 용이해지는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 향후 실제 측정 데이터를 이용하여 제안한 기법의 성능을 최적화할 계획이다.

References

- [1] B. Edde, "Radar principles", Technology, applications, NJ: Prentice Hall, 1993.
- [2] M.I. Skolnik, "Introduction to radar systems", 3rd Ed. McGraw-Hill, 2001.
- [3] S. J. Lee and I. S. Choi, "Performance Analysis on Radar Target Classification for Waveform Structure, Resonance Frequencies and Three Feature Vector Fusions", Journal of KIIT, Vol. 16, No. 7, pp. 35-41, Jul. 2018.
- [4] J. H. Bae, K. T. Kim, and E. J. Yang, "A Study on the Formulation of High Resolution Range Profile and ISAR image Using Sparse Recovery Algorithm", Journal of KIEES, Vol. 25, No. 4, pp. 467-475, Apr. 2014.
- [5] N. Keya, R. Nakamura, and A. Kajiwara, "High Range Resolution Frequency-Hopping Sensor System", IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks, Austin, TX, USA, pp. 25-27, Jan. 2013.
- [6] F. Anderson, K. Naicker, and J. C. Mocke, "Insights into Factors Contributing to the Observability of a Submarine at Periscope Depth by Modern Radar. Part 1 - High Resolution Measurements", IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, Cape Town, South Africa, pp. 985-988, Sep. 2012.
- [7] Y. Hu, Y. Liu, H. Meng, and X. Wang, "Extended Range Profiling in Stepped-Frequency Radar with Sparse Recovery", IEEE Radar

Conference, Kansas City, USA, pp. 1046-1049, May 2011.

[8] M. Soumekh, "Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms", John Wiley & Sons, 1999.

[9] L. Nguyen, "SAR Imaging Technique for Reduction of Sidelobes and Noise", Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7308, Orlando, Florida, USA, pp. 73080U-1~73080U-13, Apr. 2009.

[10] B. L. Cho, J. S. Lee, and S. G. Sun, "Image Quality Comparison According to the Interpolation Method in Forward-Looking Imaging Radar", Journal of KIIT, Vol. 13, No. 10, pp. 43-49, Oct. 2015.

저자소개

조 병 래 (Byung-Lae Cho)



1999년 2월 : 경북대학교
전자전기공학부 (공학사)
2001년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 (공학석사)
2005년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 (공학박사)
2005년 3월 ~ 2006년 1월 :

포항공과대학교 전자전기공학과 (연구원)
2006년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 레이더 신호처리, 영상레이더 등

김 종 만 (Jong-Mann Kim)



2002년 2월 : 경북대학교
전자전기공학부 (공학사)
2004년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 (공학석사)
2005년 2월 ~ 현재 : 국방과학
연구소 책임연구원
관심분야 : 레이더 신호처리 등

김 찬 흥 (Chan-Hong Kim)



1991년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학사)
1993년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2008년 8월 : 한국과학기술원 전기
및 전자전공(공학박사)
1993년 ~ 현재 : 국방과학연구소

책임연구원
관심분야 : 레이더 및 SAR 시스템 설계/분석, 위상배열
안테나 설계/분석, 안테나 측정, 전자장 수치해석,
안테나 신호처리 등

홍 성 원 (Sung-Won Hong)



2010년 2월 : 경북대학교
전자전기컴퓨터학부 (공학사)
2012년 2월 : 경북대학교
모바일통신공학과 (공학석사)
2017년 2월 : 경북대학교
전자공학부 (공학박사)
2017년 2월 ~ 현재 : 국방과학

연구소 선임연구원
관심분야 : 레이더 시스템, 레이더 신호/데이터 처리 등