

후방 감시 차량용 레이더를 이용한 ISAR 영상 형성

ISAR Imaging Using Rear View Radars of an Automobile

강병수 · 이현석 · 이승재 · 강민석 · 김경태

Byung-Soo Kang · Hyun-Seok Lee · Seung-Jae Lee · Min-Suk Kang · Kyung-Tae Kim

요 약

본 논문은 선형 주파수 변조-주파수 편이(Linear Frequency Modulation-Frequency Shift Keying: LFM-FSK) 신호와 위상비교 모노펄스 방식을 사용하는 후방 감시 차량용 레이더의 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상 형성 기법에 관하여 제시한다. 두 개의 계단 주파수(steped frequency) 신호를 순차적으로 연결한 LFM-FSK 신호를 이용하여 후방 관측을 통해 차량에 대한 ISAR 영상을 형성할 수 있다. 그러나 운전자 후방에 위치한 차량을 관측하여 ISAR 영상을 형성할 경우, 레이더 관측 각도(radar's aspect angle)의 변화율이 일정하지 않기 때문에 ISAR 영상이 흐려진다. 이를 해결하기 위해 위상비교 모노펄스 방식으로 추정된 각도 정보와 각도-주파수 영역(domain)에서의 레이더 수신데이터를 사용하여 각 주파수에서 각도별로 1차원 라그랑주 보간법(Lagrange interpolation)을 수행한다. 이를 통해 관측 각도 변화율이 일정한 각도-주파수 데이터를 획득할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 제시된 기법을 적용하여 초점이 맞는 ISAR 영상이 형성됨을 보여준다.

Abstract

This paper introduces the inverse synthetic aperture radar(ISAR) imaging technique for rear view target of an automobile, which uses both linear frequency modulation-frequency shift keying(LFM-FSK) waveform and monopulse tracking. LFM-FSK waveform consists of two sequential stepped frequency waveforms with some frequency offset, and thus, can be used to generate ISAR images of rear view target of an automobile. However, ISAR images can often be blurred due to non-uniform change rate of relative aspect angle between radar and target. In order to address this problem, one-dimensional(1-D) Lagrange interpolation technique in conjunction with angle information obtained from the monopulse tracking is applied to generate uniform data across the radar's aspect angle. Simulation results show that the proposed method can provide focused ISAR images.

Key words: ISAR, LFM-FSK Waveform, Automotive Radar

I. 서 론

레이더는 주야 및 날씨에 구애 받지 않고 사용이 가능하며, 충분한 탐지거리가 확보되기 때문에 차량의 후방

인식 감지기로 널리 활용되고 있다. 이는 운전자의 사각 지대의 차량 존재 유무를 감지하는 사각 지대 감시(Blind Spot Detection: BSD)와 레이더의 감시거리에 출현한 차량의 거리와 상대속도를 추정하여 사고를 미연에 방지할

「본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 'IT명품인재양성사업'의 연구 결과로 수행되었음(NIPA-2013-H0203-13-1001).」

포항공과대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· Manuscript received November 7, 2013 ; Revised December 3, 2013 ; Accepted December 4, 2013. (ID No. 20131107-111)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

수 있는 차선 변경 보조(Lane Change Assistance: LCA)의 기능을 한다.

최근 후방 감시용 차량용 레이더의 요구사항을 충족시키기 위해 선형 주파수 변조-주파수 편이(Linear Frequency Modulation-Frequency Shift Keying: LFM-FSK) 신호와 위상 비교 모노펄스 방식을 사용하는 레이더 신호처리 기법이 고안되었다^{[1][2]}.

LFM-FSK 신호는 두 개의 계단 주파수(steped frequency waveform) 신호를 순차적으로 연결한 것이다. 따라서 계단 주파수 신호에 대한 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상 형성 기법^[3]을 LFM-FSK 신호에 적용하여 운전자 후방의 차량에 대한 ISAR 영상 형성이 가능하다. 이는 후방 감시를 통해 주변 차량의 ISAR 영상을 형성함으로써 보다 더 정확한 도로 상황을 파악하여 안전한 주행을 가능하게 한다는 것을 의미한다.

ISAR 영상은 표적의 산란원(scatterer) 정보를 2차원 형태로 제공한다. 레이더와 표적 사이의 상대적인 각도로서 정의되는 레이더 관측 각도(radar's aspect angle)의 변화량이 일정하다면, 레이더 가시선(Radar Line Of Sight: RL-OS) 방향으로의 움직임을 보상하는 거리 이동 보상(translational motion compensation)을 수행한 후 2차원 역푸리에 변환(inverse Fourier transform)을 통해 ISAR 영상을 형성할 수 있다^[3]. 그러나 일반적으로 후방 감시 레이더를 사용하여 차량을 관측할 경우, 레이더 관측 각도의 변화율이 일정하지 않다. 따라서 도로상에서 거리 이동 보상을 수행하여 관측 차량에 대한 ISAR 영상을 형성할 경우 ISAR 영상의 초점이 흐려지게 되며, 이를 해결하기 위해서는 회전 이동 보상(rotational motion compensation)이 함께 수행되어야 한다.

본 논문에서는 LFM-FSK 신호와 위상비교 모노펄스 방식을 사용하는 후방 감시 차량용 레이더의 ISAR 형성 기법을 연구하였다. 운전자 후방의 차량을 관측할 경우, 레이더 관측 각도의 변화율이 일정하지 않기 때문에 ISAR 영상의 초점이 흐려진다. 이를 개선하기 위해 1차원 라그랑주 보간법(Lagrange interpolation)으로 회전 이동 보상을 수행하였다.

II. 본 론

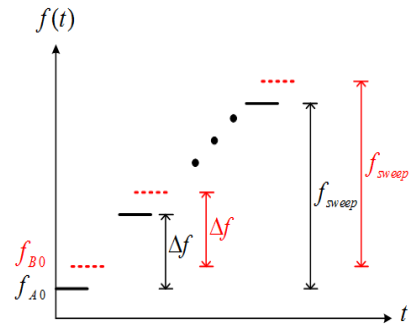


그림 1. LFM-FSK 신호
Fig. 1. LFM-FSK signal.

2-1 LFM-FSK 신호를 이용한 ISAR 영상

그림 1은 LFM-FSK 신호의 개념을 도시한다. LFM-FSK 신호는 주파수 간격 Δf 와 주파수 대역 폭(frequency band width) f_{sweep} 이 같고, 시작 주파수가 각각 f_{A0} 와 f_{B0} 인 두 개의 계단 주파수 신호를 순차적으로 연결한 것이다. LFM-FSK 신호를 이용하여 ISAR 영상을 형성하기 위해서는 두 계단 주파수 신호 중 하나의 계단 주파수 신호만을 사용한다.

레이더 관측 각도의 범위와 주파수 대역 폭이 작다고 가정할 경우, 계단 주파수 신호에 대한 레이더 수신신호는 식 (1)과 같다^[3].

$$E_s(f, \phi) = \sum_{i=1}^p A_i \exp\left(-j2\pi \frac{2f}{c} x_i\right) \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{f}{c} \phi y_i\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 f 는 주파수, ϕ 는 레이더 관측 각도, c 는 빛의 속도이다. 표적이 p 개의 산란원으로 구성되어 있다고 생각한다면 (x_i, y_i) 와 A_i 는 각각 i 번째 산란원의 위치와 크기이다. 표적의 거리이동(translational motion) 성분이 없고, 레이더 관측 각도 변화율이 일정하다면 식 (1)에 2차원 역푸리에 변환(inverse Fourier transform)을 적용하여 ISAR 영상을 형성할 수 있다.

2-2 레이더 관측 각도의 추정

그림 2는 레이더와 관측 차량 사이의 상대속도 차이로 인한 레이더 관측 각도의 변화를 버스트(burst) 별로 나타

낸 것이다. 여기서 레이더의 배열 안테나(array antenna)는 차량의 양쪽 측 후방을 향하게 배치되어 있으며, i 번째 버스트에서의 관측 각도 ϕ_i 는 위상비교 모노펄스 방식을 이용하여 추정할 수 있다. 일반적으로 후방 감시 차량용 레이더를 사용하여 차량을 관측할 경우, 추정된 레이더 관측 각도 ϕ_i 의 변화율은 일정하지 않다.

위상비교 모노펄스 방식은 두 개의 수신 안테나로부터 수신되는 신호의 위상 차이를 이용하여 표적에 대한 레이더 관측 각도를 추정하는 방식이다. 식 (2)는 위상비교 모노펄스 방식을 통해 추정된 레이더 관측 각도 ϕ_i 이다^[2].

$$\phi_i = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\phi_i\lambda_c}{2\pi d}\right) \quad (2)$$

여기서 d 는 두 개의 수신 안테나 사이의 거리, $\Delta\phi_i$ 는 수신된 신호의 위상 차이, λ_c 는 중심 파장이다.

2.3 라그랑주 보간법을 이용한 회전 이동 보상

그림 3(a)는 계단-주파수 신호를 사용하여 후방에 위치한 차량의 관측을 통해 획득한 M 행 N 열의 2차원 각도-주파수(ϕ - f) 데이터 분포이다. 획득한 데이터에 2차원 역푸리에 변환을 수행하여 ISAR 영상을 형성할 경우, 레이더 관측 각도의 변화율이 일정하지 않기 때문에 ISAR 영상의 초점이 흐려진다. 이를 해결하기 위해서는 회전 이동 보상을 수행하여 레이더 관측 각도의 변화율이 일정한 데이터 분포를 형성해야 한다.

2.2절에서 언급한 바와 같이 위상비교 모노펄스 방식을 사용할 경우, 그림 3(a)에서 획득한 데이터의 ϕ_i 정보를 추정할 수 있다. 추정된 ϕ_i 정보와 각도-주파수 데이

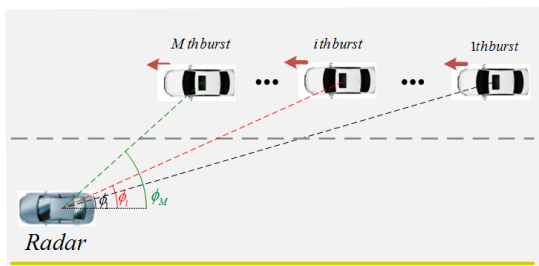
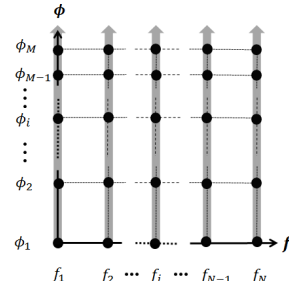
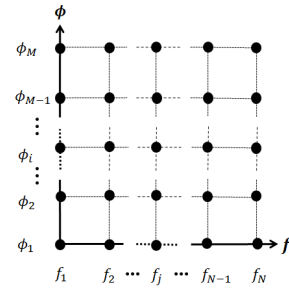


그림 2. 레이더 관측각도 추정에 대한 기하학적 구조
Fig. 2. Geometry of estimating radar's aspect angle.



(a) 라그랑주 보간법 전의 각도-주파수 데이터 분포
(a) ϕ - f data distribution before Lagrange interpolation



(b) 라그랑주 보간법 후의 각도-주파수 데이터 분포
(b) ϕ - f data distribution after Lagrange interpolation

그림 3. 각도-주파수 데이터 분포

Fig. 3. ϕ - f data distribution.

터 값을 이용하여 관측 각도의 변화율이 일정한 각도에서의 데이터 값을 보간(interpolation)할 수 있다. 보간은 데이터의 ϕ 축 방향으로 수행되며, 보간 방법으로는 라그랑주 보간법(Lagrange interpolation)을 사용하였다.

라그랑주 보간법은 주어진 데이터 쌍을 이용하여 다항식을 보간하는 방법이다. 이는 구현이 쉽고 정확한 보간을 수행하기 때문에 널리 사용되는 보간법 중 하나이다. 식 (3)은 라그랑주 보간법을 나타낸다.

$$L(\phi') = \sum_{i=0}^k f(\phi_i) \left(\prod_{\substack{0 \leq m \leq k \\ m \neq i}} \frac{\phi' - \phi_m}{\phi_i - \phi_m} \right) \quad (3)$$

$(\phi_i, f(\phi_i))_{0 \leq i \leq k}$ 는 $k+1$ 개의 주어진 데이터 쌍이고, $L(\phi')$ 은 보간된 다항식이다. 다항식의 보간을 통하여 임의의 ϕ' 에서의 데이터 값을 추정할 수 있다.

본 논문에서는 데이터 값을 추정하기 위해 $k=1$ 로 설정하여 라그랑주 보간법을 적용하였다. 그림 3(b)는 그림 3(a)의 데이터에 ϕ 축 방향(화살표 방향)으로 라그랑주

보간법을 적용한 후의 각도-주파수 데이터 분포이다.

III. 시뮬레이션 결과

3-1 시뮬레이션 상황

그림 4는 후방 감시 차량용 레이더를 이용하여 ISAR 영상의 형성을 위한 도로 상황을 나타낸 것이다. i 번째 버스트에서 레이더와 관측 차량 간의 수직거리 및 수평 거리는 좌표 (x_i, y_i) 로 표기하였다. 관측 차량과의 상대 속도 차이로 인하여 버스트 별로 x_i 가 변하기 때문에 레이더 관측 각도 ϕ_i 와 RLOS 방향으로의 거리 R_i 가 변한다. 이 때 거리 이동 보상을 수행하여^{[4],[5]} R_i 에 의한 영향은 없다고 가정한다.

ϕ_1 은 첫 번째 버스트에서 추정된 레이더 관측 각도이다. 이 때 레이더 관측 각도가 $\phi_1 + \phi_{BW}$ 가 될 때까지 차량을 관측한다. 여기서 ϕ_{BW} 는 각도 대역 폭(angular band width)으로 방위각 해상도(cross-range resolution)를 결정한다. 표 1은 ISAR 영상을 형성하기 위한 시뮬레이션 조건이다.

레이더와 관측 차량 사이의 초기 수평거리의 변화에 따른 ISAR 영상을 확인하기 위해 관측차량의 초기 위치 (x_1, y_1) 를 (30,3) m, (60,3) m, (100,3) m으로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 레이더와 관측차량 간의 상대 속도는 $-x$ 축 방향으로 54 km/h이다.

3-2 점산란원으로 모델링된 관측차량의 ISAR 영상 형성

점 산란원(point scatterer)으로 이루어진 관측 차량에 대하여 ISAR 영상을 형성하였다. 이를 위해 15개의 점으로

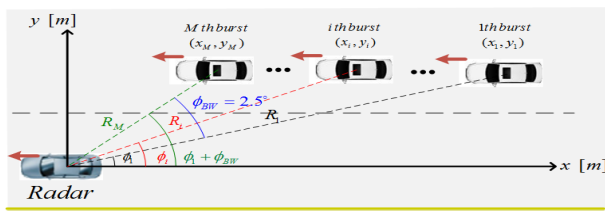


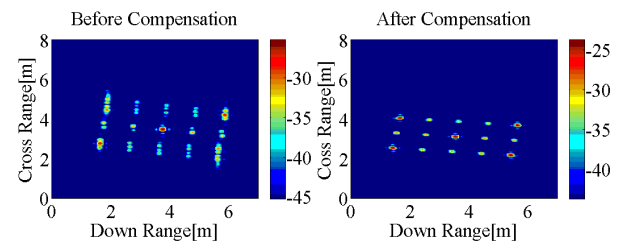
그림 4. ISAR 영상 형성을 위한 후방 도로 상황
Fig. 4. Rear view of the road for ISAR imaging.

표 1. 이동차량 및 레이더 파라미터

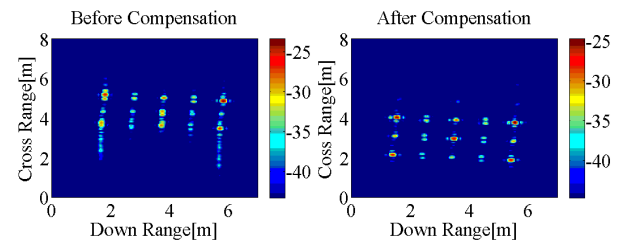
Table 1. Moving car and radar parameters.

중심 주파수	24 GHz
주파수 대역폭	1 GHz
각도 대역폭	2.5 deg
펄스 반복 주파수	30 kHz
펄스 개수	101개
레이더의 속도	36 km/h
관측 차량의 속도	90 km/h

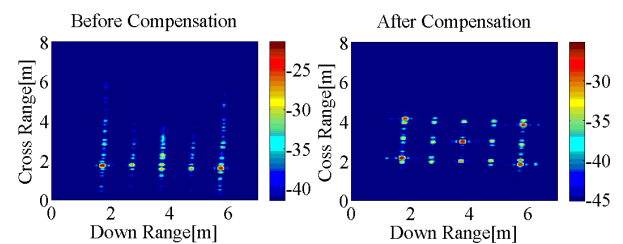
관측 차량을 모델링하였다. 모델링된 관측 차량에 대하여 3-1절의 시뮬레이션에서 (x_1, y_1) 를 변화시켜가며 각도-주파수 데이터를 획득하였다.



(a) 보간법 전 (30,3) m (b) 보간법 후 (30,3) m
(a) Before interpolation (30,3) m (b) After interpolation (30,3) m



(c) 보간법 전 (60,3) m (d) 보간법 후(60,3) m
(c) Before interpolation (60,3) m (d) After interpolation(60,3) m



(e) 보간법 전 (100,3) m (f) 보간법 후(100,3) m
(e) Before interpolation(100,3) m (f) After interpolation(100,3) m

그림 5. 점 산란원에 대한 ISAR 영상

Fig. 5. ISAR images of point scatterers.

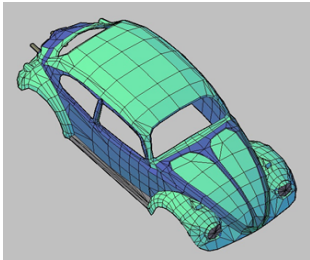


그림 6. 관측 차량의 3차원 CAD 모델
Fig. 6. 3D CAD model of an automobile.

획득된 데이터에 대하여 라그랑주 보간법을 적용하기 전의 ISAR 영상은 그림 5(a), (c), (e)와 같다. 관측 각도의 변화량이 일정하지 않기 때문에 ISAR 영상의 초점이 흐려진 것을 확인할 수 있다.

그림 5(b), (d), (f)는 각각의 (x_1, y_1) 에 대하여 라그랑주 보간법을 적용한 후의 ISAR 영상이며, 영상처리 시간은 0.14초, 0.09초, 0.10초이다. 라그랑주 보간법을 통해 회전 이동 보상을 수행하였기 때문에 그림 5(a), (c), (e)와 비교해 보았을 때 ISAR 영상의 초점이 맞추어진 것을 확인할 수 있다.

3-3 3차원 CAD 모델의 PO 계산 데이터에 대한 ISAR 영상 형성

관측차량의 3차원 CAD 모델(그림 6)에 대하여 PO (Physical Optics)를 통해 레이더 수신 신호를 계산할 수 있다. 3-1절의 시뮬레이션에서 각각의 (x_1, y_1) 에 대한 ϕ 정보와 표 1의 주파수 정보를 이용하여 3차원 CAD 모델에 대한 PO 계산을 수행한다. 이를 통해 각도-주파수 영역에서 레이더 수신데이터를 획득할 수 있다.

획득된 데이터에 대하여 라그랑주 보간법을 적용하기 전의 ISAR 영상은 그림 7(a), (c), (e)와 같고, 라그랑주 보간법을 적용한 후의 ISAR 영상은 그림 7(b), (d), (f)와 같다. 여기서 각각에 대한 영상처리 시간은 0.13초, 0.08초, 0.11초이다. 3-2절과 마찬가지로 라그랑주 보간법을 적용한 후 ISAR 영상의 초점을 맞출 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 후방 감시 차량용 레이더를 이용하여

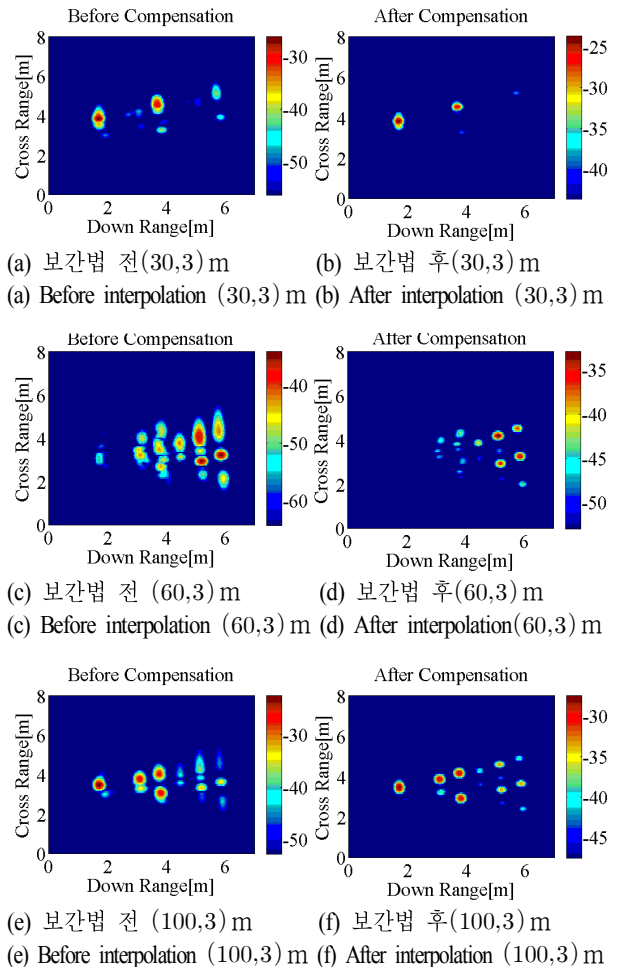


그림 7. PO 데이터에 대한 ISAR 영상

Fig. 7. ISAR images using PO data.

ISAR 영상을 형성할 경우, 레이더 관측 각도의 변화율이 일정하지 않기 때문에 ISAR 영상이 흐려지는 문제를 해결하였다. 위상비교 모노펄스 방식을 사용할 경우, 레이더 관측 각도를 추정할 수 있다. 추정된 각도 정보를 이용하여 각도-주파수 영역에서 1차원 라그랑주 보간법을 적용함으로써 각도 변화율이 일정한 데이터를 획득할 수 있다. 실험 결과를 통해 후방 도로상황에서 회전 이동 보상을 수행함으로써 ISAR 영상의 초점을 맞출 수 있다는 것을 확인하였다.

References

[1] M. -M. Meinecke, H. Rohling, "Combination of LFM-

CW and FSK modulation principles for automotive radar systems", *German Radar Symposium GRS2000*, Berlin, Germany.

- [2] 최각규, 한승구, 김효태, 김경태, "지능형 차량을 위한 후방 감시용 레이더 신호 처리 기법에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 22(11), pp. 1070-1077, 2011년 11월.
- [3] C. Ozemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging*

with MATLAB Algorithms, New York: Wiley, 2012.

- [4] D. Zhu, L. Wang, Q. Tao, and Z. Zhu, "ISAR range alignment by minimizing the entropy of the average range profile", *In Proceedings of IEEE Radar Conference 2006*, NY, USA, pp. 813-818, 2006.
- [5] J. Wang, X. Liu, and Z. Zhou, "Minimum-entropy phase adjustment for ISAR", *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, vol. 151, no. 4, pp. 203-209, Aug. 2004.

강 병 수



2012년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 2012년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정
 [주 관심분야] 레이더 영상, 자동 표적 인식, 시간-주파수 분석

강 민 석



2013년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 2013년 3월~현재: 포항공과대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 레이더 영상

이 현 석



2007년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학사)
 2009년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학석사)
 2009년 3월~현재: 포항공과대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 전자파 수치해석

김 경 태



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
 2012년 9월~현재: 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실장
 [주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호처리, 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정

이 승 재



2012년 2월: 한양대학교 전자공학과(공학사)
 2012년 3월~현재: 포항공과대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 레이더 영상, 자동 표적 인식, 시간-주파수 분석