

KOMSAR를 이용한 실제 항공기 ISAR 영상 제작

ISAR Imaging of a Real Aircraft Using KOMSAR

김 경 태 · 정 호 령*

Kyung-Tae Kim · Ho-Ryung Jeong*

요 약

표적에 대한 레이더 영상 중의 하나인 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상은 표적에 대한 전자파 산란 특성에 대한 2차원 공간 분포를 나타낸다. 이러한 ISAR 영상은 원거리에서 레이더를 이용한 표적 식별에 주로 사용된다. 본 논문에서는 움직이는 실제 항공기에 대한 ISAR 영상을 얻기 위하여, 국방과학연구소에서 제작 및 운용하고 있는 KOMSAR(Korea Miniature Synthetic Aperture Radar) 장비를 이용하여 측정을 수행하였다. 이렇게 얻어진 측정된 데이터에 포함되어 있는 표적의 움직임에 의한 위상 오차를 제거하기 위하여, 엔트로피 기반 ISAR 자동 초점 기법(autofocusing technique)을 사용하였다. 실험 결과, 실제 움직이는 항공기에 대한 ISAR 영상을 성공적으로 얻을 수 있었으며, 이는 향후 레이더를 이용한 표적식별에 중요한 기술적 토대가 마련되었음을 의미한다.

Abstract

Inverse synthetic aperture radar(ISAR) images represent two-dimensional(2-D) spatial distribution of electromagnetic scattering phenomenology against a target. Hence, they are usually used in the areas of automatic target recognition (ATR) or non-cooperative target recognition(NCTR), identifying a target using radar in a long distance. This paper makes use of Korea Miniature Synthetic Aperture Radar(KOMSAR) to generate ISAR images of a real and maneuvering aircraft. The data obtained from KOMSAR are processed to eliminate phase errors due to motion of a target, with the use of entropy-based ISAR autofocusing technique. Results show that we can successfully obtain ISAR images of a real aircraft, and the success of experiments implies that a significant step toward ATR using radar has been established.

Key words : ISAR, KOMSAR, ISAR Autofocusing Technique, ATR, NCTR

I. 서 론

레이더는 제2차 세계 대전 이후 군에서 사용하는 가장 중요한 센서 중의 하나이다. 고전적 개념에서 레이더 센서의 임무는 표적의 존재 유무만을 탐지하는 것이었다. 하지만 전자공학의 발전으로 인하여 표적의 거리, 방위 등의 위치와 속도, 가속도 등의 전술 정보들도 측정할 수 있게 되었다. 최근에는 하

드웨어 및 소프트웨어 기술의 급속한 발전으로 레이더를 이용하여 표적에 대한 영상을 제작할 수 있는 단계에 이르고 있다. 표적에 대한 영상을 제작한다는 것은 표적에 대한 구체적인 전술 정보를 획득할 수 있다는 것을 의미한다. 여기에서 표적의 구체적인 전술 정보란 표적의 피아식별 뿐 아니라, 표적이 무엇인지 적극적으로 구분할 수 있다는 것까지 포함한다. 따라서, 광학 영상과 더불어 레이더 영상의

*이 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.

영남대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Yeungnam University)

*포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, POSTECH)

· 논문 번호 : 20070402-040

· 수정완료일자 : 2007년 5월 25일

응용 분야는 지상의 전장뿐 아니라 우주 공간까지 넓어지고 있다. 특히, 레이더 영상의 경우, 주야 및 날씨에 관계없이 표적에 대한 영상을 획득할 수 있으므로 광학 영상의 문제점을 해결할 수 있는 중요한 도구가 된다.

영상 레이더로서 대표적인 것은 바로 합성 개구면 레이더인 SAR(Synthetic Aperture Radar) 시스템이다. 이것은 넓은 지표면 영역에 대한 전장 정보를 획득하기 위하여 레이더를 항공기나 위성에 탑재하여 레이더 영상을 얻는 시스템을 말한다. 현재 선진국들은 전술 및 전략 정보 획득을 위하여 UAV(Unmanned Air Vehicle)에 탑재하거나 위성에 탑재하는 고해상도의 SAR 시스템을 운용하고 있다. 국내에서는 국방과학연구소를 중심으로 KOMSAR를 제작하여 시험에 성공한 경험을 갖고 있다. KOMSAR의 경우, 주파수 대역은 X-밴드를 사용하며 해상도는 약 1.5 m 정도이다.

SAR 시스템과는 반대로 고정된 레이더를 사용하여 움직이는 표적에 대한 영상을 획득하는 영상 레이더를 ISAR 시스템이라 한다. 따라서, 넓은 영역에 대한 레이더 영상을 제작하는 SAR 시스템과는 달리, ISAR 시스템을 사용하면 관심 있는 표적에 대한 레이더 영상만을 얻게 된다. 선진국의 경우, 지상의 추적 레이더 시스템에 영상 레이더 모드를 장착하여 ISAR 시스템으로 운용하고 있다. 대공 추적 레이더의 경우, 이러한 ISAR 영상을 통하여 항공기의 기종을 식별할 수 있다. P3C 같은 해상 초계기에 장착된 ISAR 시스템의 경우, 선박 및 잠수함을 식별하기 위한 레이더 영상을 제공하고 있다. 현재 국내에서는 ISAR 영상 획득을 위한 대공 레이더 시스템은 운용되고 있지 않다. 지금까지 국내에서 발표된 ISAR 영상 관련 연구는 컴팩트 레인지(compact range)에서 측정된 고정된 축소 모형에 대한 ISAR 영상 관련 신호 처리 연구^{[1]~[3]}이거나, 점표적으로 이루어진 표적이 이동하는 것을 가정하여 위상 오차를 제거하기 위한 신호 처리 기법을 개발하고 이를 모의 실험으로 검증^[4]하는 것이 대부분이었다.

이와는 달리, 본 논문에서는 KOMSAR를 지상에 고정시키고 실제 비행하는 항공기에 대한 ISAR 영상을 제작하기 위한 실험을 수행하였다. 앞에서 언급한 것처럼, 선진국의 경우, ISAR 영상 획득을 위

한 전용 레이더 시스템을 구축 운용하고 있으나, 국내에서는 이러한 시스템이 없는 관계로 KOMSAR를 ISAR 영상 제작을 위한 영상 레이더로 이용하였다. 이동하는 항공기에 대한 위상 오차 제거를 위하여 이미 발표된 엔트로피 기반 ISAR 자동 초점 기법^{[4][5]}을 이용하였다. ISAR 영상 획득을 위한 수학적 인 모델링과 자동 초점 기법 관련 내용은 2006년 12월에 한국전자과학회논문지에 이미 발표된 논문^[4]("엔트로피 기반의 ISAR 자동 초점 기법에 대한 성능 분석")에 자세히 기술되어 있으므로, 본 논문에서는 관련 실험 절차 및 실험 결과 얻어진 ISAR 영상에 대한 분석만을 주로 기술한다.

II. 실험 절차

KOMSAR를 이용한 ISAR 영상 측정 실험은 2006년 1월 31일과 2월 1일 양일간 김해공항에서 군부대의 협조를 얻어 수행되었다. 그림 1에는 김해공항에 대한 구글 어스에서 제공하는 사진 위에 KOMSAR의 위치 및 측정에 사용된 두 표적인 B737 여객기 및 C-130 수송기의 비행 경로가 나타나 있다. 사진에서 중간 왼쪽에 있는 하늘색 사각형이 ISAR 측정을 위한 KOMSAR의 위치이다. 그림 1과 같이 KOMSAR를 고정시키고 비행하는 여객기 및 군용기에 대한 측정을 실시하였다. 측정에 사용된 KOMSAR 관련 레이더 변수들은 표 1에 정리되어 있다.

KOMSAR는 chirp 펄스를 사용하는 시스템으로써 표 1과 같은 레이더 변수를 사용하여 비행하는 항공기에 대한 측정을 수행하였다. 표 1에 나타나 있는 것처럼 측정 주파수 대역폭이 100 MHz이므로 이는 거리 방향(down-range)의 해상도가 약 $c/2B=1.5$

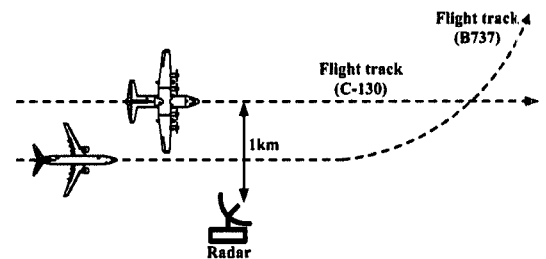


그림 1. KOMSAR의 위치와 표적의 비행 경로
Fig. 1. Location of KOMSAR and flight tracks of targets.

m라는 것을 의미한다. B737 여객기의 경우, 최대 크기가 42.11 m이므로, KOMSAR의 해상도를 고려할 때 ISAR 영상의 거리 방향에서 표적이 차지할 수 있는 최대 픽셀 수는 $42.11/1.5=28$ 정도이다.

측정시에 고려해야 또 하나의 중요한 점은 KOMSAR의 경우, 안테나가 고정되어 있으므로 표적을 추적하면서 펄스를 송수신하기가 어렵다는 것이다. 일반적으로 선진국의 ISAR 전용 추적 레이더의 경우, 관심 표적에 대하여 안테나가 지속적으로 추적하면서 수신 신호를 얻는다. 따라서, 안테나의 메인 빔(main beam) 방향에서 지속적으로 신호를 얻게 되므로, 측정 데이터의 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)가 매우 높다. 하지만, KOMSAR의 경우 안테나 추적이 불가능하므로 안테나를 미리 항공기의 비행 경로에 지향하여 고정시켜 놓고 측정을 수행하였다. 결과적으로 KOMSAR의 수신 신호는 펄스별로 신호 대 잡음비가 달라지게 된다.

그림 2는 레이더에서 약 1 km의 떨어진 거리에서 비행하는 항공기를 KOMSAR의 메인 빔 방향을 고정시킨 상태에서 측정하는 시나리오를 나타내고 있다. 즉, 항공기가 안테나의 메인 빔 폭 내에 들어오면 측정이 시작되고, 메인 빔 폭을 빠져나가면서 측정이 종료된다. 이런 방식으로 측정하였을 때의 문

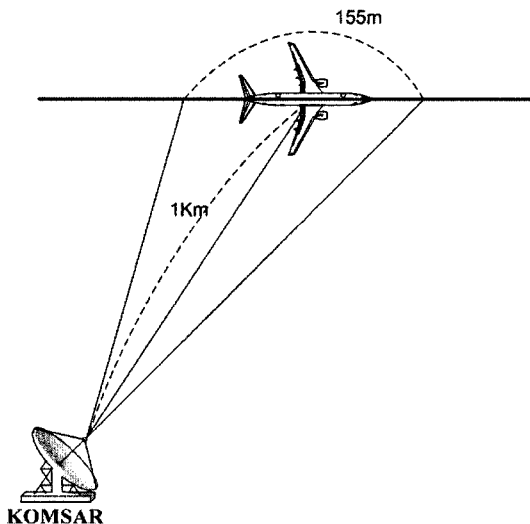


그림 2. 안테나 빔 방향이 고정되었을 때 KOMSAR 측정 시나리오

Fig. 2. Scenario of KOMSAR measurement when the main beam direction is fixed.

표 1. KOMSAR 측정에 사용된 레이더 변수

Table 1. Radar parameters used for KOMSAR measurement.

레이더 변수	설정값
PRF	2 KHz
펄스 폭	5 μ sec
중심 주파수	X 밴드 ¹⁾
대역폭	100 MHz
해상도	1.5 m
샘플링 주파수	150 MHz
안테나 빔 폭	α ²⁾

1), 2) KOMSAR의 중심 주파수 및 안테나 빔 폭은 보안상의 문제로 기술할 수 없음을 양해하여 주시기 바랍니다.

제점은 앞에서 언급한대로, 표적이 메인 빔에 처음 진입하였을 때와 메인 빔에서 빠져나갈 때에 수신 신호의 신호 대 잡음비가 매우 낮다는 것이다. 물론, 표적이 메인 빔 내에 들어오는 구간 내에 약 수천에서 수만 개의 수신 신호 펄스를 얻을 수 있지만, 펄스별로 신호 대 잡음비가 달라진다. 따라서, 측정 데이터를 신호처리하여 ISAR 영상을 얻을 때, 신호 대 잡음비가 낮은 펄스 부분은 제거하고 신호 대 잡음비가 높은 펄스 부분만을 신호 처리하는 것이 유리하다.

그림 1에서 B737 여객기의 경우, 항공기가 이륙하여 항로 변경을 위하여 왼쪽 방향으로 선회하는 동안 측정이 수행되었다. C-130 수송기의 경우, KOMSAR 전방의 약 1 km 거리에서 고도 약 600 m로 직선 비행시에 측정하였다. 이렇게 비행하는 항공기에 대하여 안테나 빔을 고정시키고 PRF를 2 kHz로 측정을 수행하면 표적의 속도에 따라서 10,000~20,000여 개의 수신 펄스를 얻게 된다. 이렇게 많은 펄스를 한꺼번에 신호처리하여 ISAR 영상을 얻는 것이 아니라, 거리 직각 방향(cross-range) 해상도가 약 1 m 정도가 되도록 400개의 펄스만을 선택하여 신호처리 하였다.

기동하는 표적을 신호처리하여 ISAR 영상을 얻을 때, 표적의 거리 방향 이동(translational motion) 성분은 ISAR 영상을 흐려지게 하며, 표적의 회전 방향 이동(rotational motion) 성분은 거리 직각 방향의 해상도를 얻게 되는 유익한 성분이다. 따라서, 표적의 이

동에 의한 위상 성분 중 거리 방향 이동 성분은 제거하고 회전 방향 이동 성분만을 보존하는 신호 처리 기법을 ISAR 자동 초점 기법이라 한다. ISAR 자동 초점 기법은 크게 거리 정렬(range alignment) 과정과 위상 보정(phase adjustment) 과정으로 이루어진다. 앞에서 언급한 것처럼 KOMSAR 실험 결과, 얻어진 측정 데이터는 이미 개발된 엔트로피 기반 자동 초점 기법^{[4],[5]}을 사용하여 신호처리한 후 ISAR 영상을 획득하였다.

III. 실험 결과

3-1 B737 여객기에 대한 ISAR 영상

그림 3~5는 측정 데이터에 ISAR 자동 초점 기법을 적용시켜 얻어진 B737 여객기에 대한 ISAR 영상을 보여준다. 이해를 돕기 위하여 ISAR 영상 위에 B737 여객기의 실루엣이 같이 나타나 있다. 세 ISAR 영상 중 그림 3이 가장 가까운 거리에서 얻어진 영상이며, 그림 5가 가장 먼 거리에서 측정된 ISAR 영상이다. 그림 3은 측정 데이터 중 3,100~3,500번째 사이의 400개 펄스를 신호처리하여 얻어진 영상으로 주 날개 및 꼬리 날개의 산란 현상을 쉽게 확인할 수 있다. 측정 수행시 표적의 뒤쪽에서 측정을 하였으므로 B737 여객기 동체 앞부분에 의한 산란

현상은 잘 확인되지 않는다. 한 가지 주목하여야 할 점은 거리 방향(down-range) 약 70~100 m 사이에 B737 여객기의 바깥 부분에 수직 방향으로 잠음과 같이 길게 산란 현상이 보인다는 점이다.

이것은 항공기 엔진에서 발생하는 제트 엔진 변조(Jet Engine Modulation: JEM)에 의한 현상으로 일반적인 ISAR 자동 초점 기법만을 사용해서는 제거할 수 없다. JEM은 고속으로 회전하는 제트 엔진 내부의 팬(fan)에 레이더의 전자파가 입사하였을 때 생기는 도플러 변조(doppler modulation) 때문에 발생하며, 제트 엔진 팬의 회전 주기에 해당하는 주파수 대역에서 큰 첨두치(peak)를 나타내게 된다. ISAR 영상 입장에서 보면 이러한 JEM은 잠음과 같은 역할을 하게 되며, 영상 판독에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 결과적으로 ISAR 영상을 사용하여 자동 표적 식별을 수행할 때, 식별 성능을 저하시킨다. 따라서, 보다 효율적인 ISAR 영상 제작 및 표적 식별을 위해서는 신호처리를 통하여 JEM에 의한 영향을 최소화시켜야 한다.

그림 4를 보면 B737 여객기의 두 엔진에 의한 반사 신호가 가장 크게 나타나 있다. 또한, 주 날개 및 꼬리 날개에 의한 산란 현상도 확인할 수 있다. 일반적으로 항공기의 엔진에 전자파가 입사하면 가장 큰 반사파를 발생시키는 것으로 알려져 있다. 그림 5에

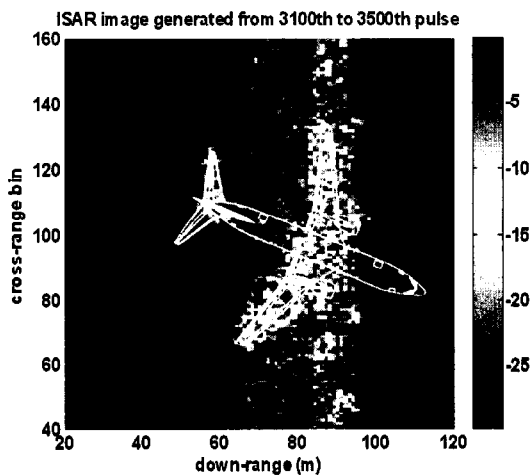


그림 3. B737 여객기에 대한 ISAR 영상(3,100~3,500 번째 펄스)

Fig. 3. ISAR image of a B737 aircraft generated from 3,100th to 3,500th pulse.

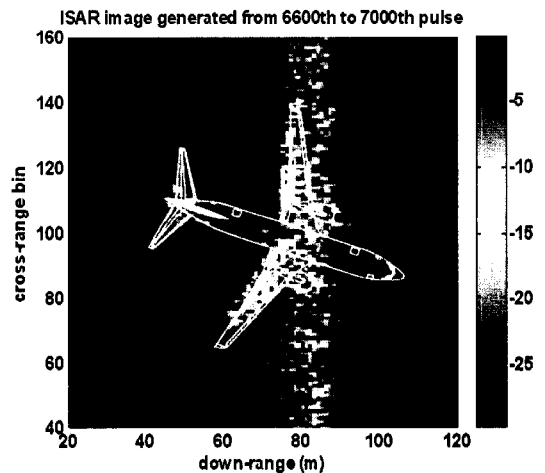


그림 4. B737 여객기에 대한 ISAR 영상(6,600~7,000 번째 펄스)

Fig. 4. ISAR image of a B737 aircraft generated from 6,600th to 7,000th pulse.

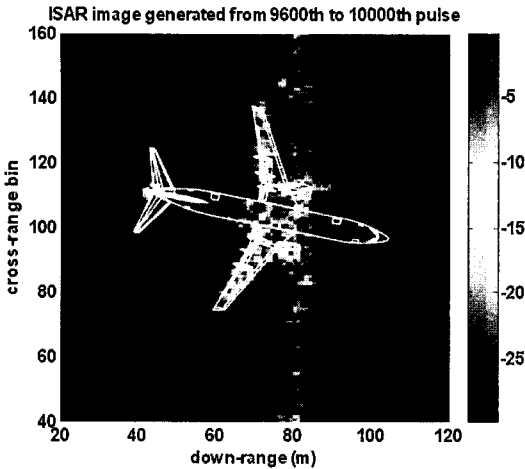


그림 5. B737 여객기에 대한 ISAR 영상(9,600~10,000 번째 펄스)
 Fig. 5. ISAR image of a B737 aircraft generated from 9,600th to 10,000th pulse.

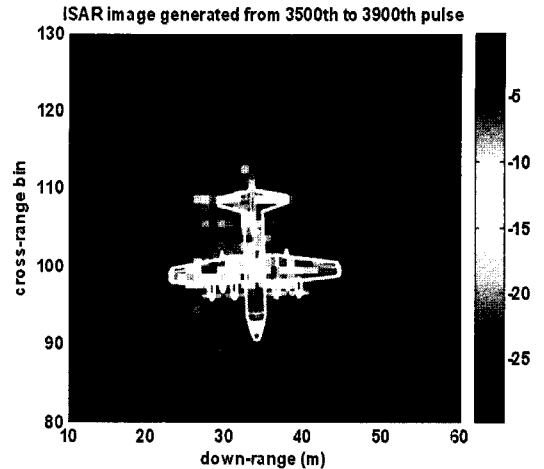


그림 6. C-130 수송기에 대한 ISAR 영상(3,500~3,900 번째 펄스)
 Fig. 6. ISAR image of a C-130 troop carrier generated from 3,500th to 3,900 pulse.

서도 JEM에 의한 잡음 현상을 확인할 수 있으나, 거리가 상대적으로 멀고, 엔진과 레이더 간의 각도 차이로 인하여 그림 3보다는 JEM에 의한 현상이 약하게 나타난다. 그림 5는 9,600~10,000번째 펄스를 신호처리하여 얻어진 영상으로 그림 3, 그림 4와 비슷한 산란 현상을 확인할 수 있으며, JEM에 의한 잡음은 가장 약하게 보인다.

3-2 C-130 수송기에 대한 ISAR 영상

그림 6과 그림 7은 C-130 수송기가 정면에서 비행할 때 측정된 데이터를 신호처리하여 획득한 ISAR 영상이다. C-130 수송기의 경우, 크기가 B737 여객기보다 작으므로 앞에서 기술한 B737 여객기에 대한 ISAR 영상보다 세부적인 산란 현상을 확인하기가 어렵다. 하지만 그림 6과 그림 7에서 보면 주 날개 및 꼬리 날개에 의한 산란 현상은 쉽게 확인할 수 있다. C-130 수송기의 경우, 제트 엔진이 아닌, 프로펠러 엔진을 사용하므로 JEM과 같은 현상은 보이지 않는 특징이 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 국내 최초로 KOMSAR를 이용하여 실제로 비행하는 항공기에 대한 ISAR 측정 실험

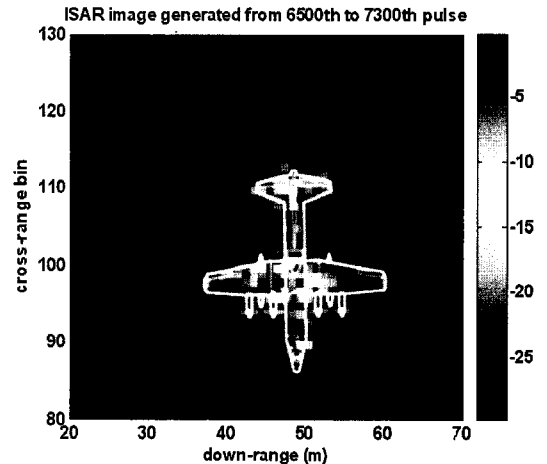


그림 7. C-130 수송기에 대한 ISAR 영상(6,500~7,300 번째 펄스)
 Fig. 7. ISAR image of a C-130 troop carrier generated from 6,500th to 7,300 pulse.

을 수행한 결과를 기술하였다. 특히, 관련 실험 절차 및 얻어진 ISAR 영상을 제시하고 이를 분석하였다. 실험 결과, 100 MHz의 주파수 대역폭을 가지는 영상 레이더로도 여객기같이 큰 항공기의 경우에는 세부적인 산란 현상을 확인할 수 있는 좋은 품질의 영상을 얻었다. 그러나, 수송기의 경우에는 상대적으로 작은 크기로 인하여 그리 좋은 품질의 영상은 얻

지 못하였다. 하지만 향후 국내에서 개발되는 영상 레이더의 경우, 지속적으로 주파수 대역폭이 확대될 것이므로 전투기 같이 상대적으로 크기가 작은 항공기 표적에 대해서도 고품질의 ISAR 영상을 획득할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 연구 결과는 향후 레이더를 사용하여 전장의 전술 정보를 획득할 수 있는 자동 표적 식별 기법인 ATR 또는 NCTR 기술 개발에 필요한 특성 벡터를 획득할 수 있는 중요한 기술적 토대를 마련한 것으로 사료된다.

감사의 글

KOMSAR를 이용한 ISAR 측정 실험의 참가하여 실험의 성공에 많은 기여를 해 주신 국방과학연구소의 이석호 팀장님을 포함한 연구원들과 벡스원퓨처(주)의 임재학 박사님을 포함한 여러 연구원들께 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 유지희, 권경일, 이용희, "Matrix pencil 방법을 이용한 비행기 모형의 ISAR 영상화", 한국전자파학회논문지, 12(2), pp. 299-307, 2001년 2월.
- [2] 유지희, "PFA와 CDT 알고리즘을 이용한 2차원 ISAR 영상 생성", 한국전자파학회논문지, 15(9), pp. 906-913, 2004년 9월.
- [3] 김경태, 박종일, 신영남, "극사상법을 이용한 효율적인 ISAR 영상 구분", 한국전자파학회논문지, 16(3), pp. 335-343, 2005년 3월.
- [4] 배준우, 김경태, 이진호, 임정흠, "엔트로피 기반의 ISAR 자동초점기법에 대한 성능 분석", 한국전자파학회논문지, 17(12), pp. 1249-1258, 2006년 12월.
- [5] Li Xi, Liu Guosui, and Jinlin Ni, "Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, issue 4, pp. 1240-1252, Oct. 1999.

김 경 태



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 1999년 3월~2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 연구조교수
 2002년 3월~2004년 3월: 영남대학교 전자정보공학부 전임강사
 2004년 4월~현재: 영남대학교 전자정보공학부 조교수
 [주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, SAR 및 ISAR 영상, 어레이 신호처리, 패턴인식

정 호 령



2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2002년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 패턴인식