

시간-주파수 영역 해석법을 이용한 레이더 영상 품질 개선에 대한 연구

Improvement of Radar Images Using Time-Frequency Transform

정 상 원 · 김 경 태*

Sang-Won Jung · Kyung-Tae Kim*

요 약

본 논문에서는 흐려진 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상의 회전 오차를 보정하기 위해 시간-주파수 영역 해석법을 이용한 회전 이동 보상(rotational motion compensation) 알고리즘을 제시한다. 실제의 비행 환경에서는 표적의 회전이나 가속 등의 움직임으로 인하여 도플러 주파수 천이가 시간에 따라 변하게 되고, 이에 따라 회전 오차(motion error)가 발생한다. 본 알고리즘으로 도플러 주파수 영역 방향으로 흐려진 ISAR 영상을 개선한다. 시뮬레이션 결과, 기동하는 표적에 회전 오차가 있을 경우에 시간-주파수 영역 해석법은 흐려진 레이더 영상의 품질을 개선하는데 효율적임을 알 수 있다.

Abstract

In this paper, an efficient algorithm is developed to perform target rotational motion compensation to achieve the clear inverse synthetic aperture radar(ISAR) image. The algorithm is based on a time-frequency technique. This algorithm provides an efficient method to resolve the blurring image caused by the time-varying behavior of the target scattering centers and leads to a well-focused ISAR image. Results demonstrate that the time-frequency techniques can improve the blurring ISAR image when an aircraft is in complex motion, such as maneuvering, rotation and acceleration.

Key words : ISAR, Radar, Rotational Motion Compensation

I. 서 론

레이더 신호는 먼 거리에 있는 물체의 고유한 물리적 특성과 그 위치를 알아내기 위해 널리 사용된다. 이러한 레이더를 이용한 표적 식별 기술을 NCTR(Non-Cooperative Target Recognition)이라고 하며, 이를 위한 레이더 신호에는 1차원 HRR(High Resolution Range) profile과 2차원 ISAR 영상이 있다.

HRR profile은 표적에 대한 RCS(Radar Cross Section)를 레이더와 표적 사이의 가시선(line of sight)에

투사시킨 1차원 영상으로 실시간으로 쉽게 얻을 수 있지만, 관찰 각도(aspect angle)에 민감하다는 단점이 있다. ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상은 표적에 대한 RCS의 분포를 거리(down range) 방향과 거리 수직(cross range) 방향의 평면에서 2차원적으로 보여준다. 표적의 산란점을 2차원 평면으로 보여주므로, ISAR 영상은 표적의 특징을 추출하고, 구분하는데 더 용이하다.

ISAR 영상은 표적의 각각의 산란점(scatterer)간의 도플러 주파수 천이가 서로 다르다는 원리를 이용하

삼성탈레스(주)(Samsung Thales)

*영남대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Yeungnam University)

· 논문 번호 : 20090923-110

· 교신저자 : 김경태(e-mail : juniorf@yumail.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2009년 11월 24일

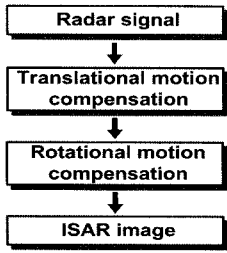


그림 1. ISAR 영상 획득 과정
Fig. 1. Procedures for ISAR imaging.

여 얻어진다. ISAR 영상의 거리 방향의 해상도(down range resolution)는 레이더 신호의 대역폭(bandwidth)에 의해 결정되고, 거리 수직 방향의 해상도(cross range resolution)는 영상이 형성되는 동안 보유되는 관찰 각도로 결정된다. 일반적인 ISAR 영상은 수신된 레이더 신호에 푸리에 변환을 사용하여 쉽게 얻을 수 있다.

그림 1은 ISAR 영상의 획득 과정을 보여준다. ISAR 영상을 얻기 위해서는 표적의 산란점의 도플러 주파수 천이가 시간에 따라 일정해야 한다. 표적이 일정한 속도로 움직이고 있다면, 즉, 일정한 회전 이동을 한다면, 레이더와 표적간의 가시선 방향의 이동 보상을 수행한 후, 간단하게 푸리에 변환을 이용하여 ISAR 영상을 얻을 수 있다. 하지만, 실제의 비행환경에서는, 표적의 회전이나 가속 등의 2차원 움직임으로 인하여 도플러 주파수 천이가 시간에 따라 변하게 되고, 이에 따라 회전 오차가 발생하여 도플러 주파수 영역 방향으로 ISAR 영상이 흐려지게 된다. 그러므로 고해상도의 ISAR 영상을 얻기 위해서는 회전 이동의 성분으로 생기는 오차의 보상이 필요하다.

본 논문에서는 chirp 펄스 레이더 기반에서 흐려진 ISAR 영상의 회전 오차를 보상하기 위해 시간-주파수 영역 해석법을 이용하여 도플러 주파수 천이를 분석하고^{[1][2]}, 회전 이동 보상 알고리즘을 제시한다.

II. 기동하는 표적의 ISAR 신호 모델

기동하는 표적은 그림 2와 같이 기하학적 도식으로 나타낼 수 있다. 여기서 산란점 (x, y) 까지의 거리를 국부 좌표계에서 시간에 따른 함수로 나타내면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

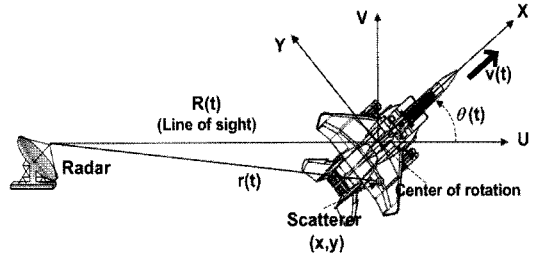


그림 2. 기동하는 표적의 기하학적 도식
Fig. 2. Geometry of moving target.

$$r(t) = R(t) + x \cos \theta(t) + y \sin \theta(t) \quad (1)$$

여기서 $R(t)$ 는 레이더와 표적간의 가시선 방향의 이동 성분이고, $\theta(t)$ 는 표적의 회전 이동 성분이다.

ISAR 영상을 생성하기 위한 신호의 수학적인 모델은 2차원 고주파 기하학적 산란 이론(GTD: Geometrical Theory of Diffraction)을 따른다. GTD로부터 표적으로부터 반사된 레이더 신호는 표적의 절대적인 산란점으로부터 반사되는 전자기파의 합으로 나타낼 수가 있다. 표적의 산란점으로부터 반사되는 ISAR 신호는 식 (2)와 같다.

$$s(x, t) = \sum_{k=1}^{N_k} A_k \exp \left(-j \frac{4\pi f_0}{c} [R(t) + x_k \cos \theta(t) + y_k \sin \theta(t)] \right) \quad (2)$$

여기서, x 는 range bin, t 는 레이더 펄스의 시간 지표, N_k 는 range bin x 에서의 산란점의 총 개수, A_k 는 k 번째 산란점 (x_k, y_k) 에서의 RCS 크기, f_0 는 반송 주파수이다.

III. 시간-주파수 영역 해석법을 이용한 ISAR 신호의 위상 함수 추정

식 (2)의 ISAR 신호에서 위상 부분만을,

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \dots \\ \alpha_0 &= R_0 + x_k, \quad \alpha_1 = \Omega y_k + v \\ \alpha_2 &= v' - \Omega^2 x_k + \Omega' y_k \end{aligned} \quad (3)$$

로 다시 표현할 수 있다. 상수항인 α_0 는 표적의 산란점의 가시선 방향으로의 위치이다. 1차항인 α_1 은 표적의 레이더와 표적간의 가시선 방향 이동 성분과

일정한 회전 이동 성분을 포함한다. ISAR 신호에서 1차항까지만 있을 경우, 위상은 시간에 선형 함수가 된다. 즉, 이상적인 경우일 경우, $R(t) = R_0$, $\theta(t) = \Omega t$ 가 되고, 이때는 간단히 푸리에 변환을 이용하면 고해상도의 ISAR 영상을 얻을 수 있다. 하지만 위상 함수의 2차항과 고차항에는 ISAR 영상을 흐리게 하는 요소인 레이더와 표적간의 가시선 방향의 이동 오차와 회전 이동 오차를 포함한다. 그러므로 위상 함수에서의 고차항을 추정하고, 제거하는 것이 이 논문의 목적이다.

여기서, 시간-주파수 영역 해석법을 사용하여 ISAR 신호에서 주요 산란점의 위상 함수의 계수를 알아낸다. 계수를 알아내기 위해서 ISAR 신호의 기저 함수를 식 (4)와 같이 정의한다.

$$h(t) = \exp\left[-j2\pi\left(f_1 t + \frac{1}{2!} f_2 t^2 + \dots\right)\right] \quad (4)$$

위의 기저 함수를 ISAR 신호에 정사영시켰을 때 최대값을 가지게 되는, 그 때의 기저 함수가 ISAR 신호에서 주요 산란점의 위상을 나타낸다. 즉, 위상의 계수는 ISAR 신호와 기저 함수의 최대 내적을 가지게 하는 방법으로 찾을 수 있다.

$$\{f_1, f_2, \dots\} = \arg \max | \langle s(x, t), h(t) \rangle | \quad (5)$$

본 논문에서는 식 (5)를 만족시키는 위상의 계수를 찾기 위해서 진화 연산 기법인 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 사용하였다^[3].

IV. 회전 이동 보상 알고리즘

주요한 산란점에 대한 위상의 계수를 찾았다면, 이제 ISAR 신호에서 모든 산란점에 대해서 고차항의 위상 성분을 제거시켜야 한다.

먼저, 본 논문에서는 표적이 2차원 움직임에 한하여 이동한다고 가정한다. 여기서 레이더와 표적간의 가시선 방향의 이동 성분이 보상된 후, 식 (2)는 $R(t)$ 성분은 제거가 되고, ISAR 영상을 만들기 위한 산란점의 회전 이동 성분만 남는다^[4].

$$s(t) = \sum_{k=1}^{N_k} A_k \exp\left(-j \frac{4\pi f_0}{c} [x_k + y_k \theta(t)]\right) \quad (6)$$

하지만 표적의 회전이나 가속 등의 움직임으로 생기는 고차항의 위상 성분에 의하여, 몇몇의 산란

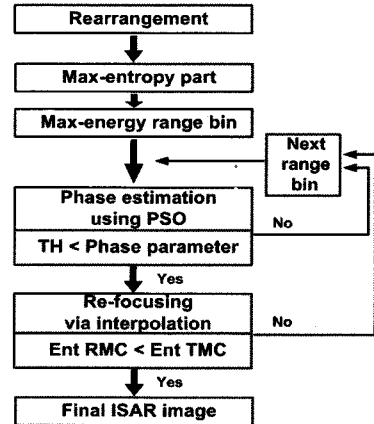


그림 3. 회전 이동 보상 알고리즘
Fig. 3. Rotational motion compensation algorithm.

점은 시간에 따라 도플러 주파수가 변하는, 즉 기울기를 가지는 직선으로 나타난다.

표적의 회전 이동 오차를 없애기 위해서는, 주파수 방향으로 균일하지 못한 레이더 신호를 균일 샘플링이 되도록 만들어 주어야 한다. 즉, 주요 산란점의 위상 성분이 시간에 균일하게 샘플링이 되도록 보간한다. 그러면 회전 이동 보상을 수행한 후의 ISAR 신호는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다^[4].

$$s(x, t') = \sum_{k=1}^{N_k} A_k \exp\left(-j \frac{4\pi f_0}{c} [x_k + y_k \theta(t')]\right) \quad (7)$$

본 논문에서는 그림 3과 같이 회전 이동 보상 알고리즘을 제시한다. 여기서 본 알고리즘의 관점은 회전 이동 보상 후의 최종 ISAR 영상을 개선하기 위한 최적의 range bin을 찾는 것이다. 회전 이동 보상 알고리즘을 적용함에 있어서, range bin을 선택하는 문제가 있다. 어떤 range bin을 선택하느냐에 따라 시간-주파수 영역 해석법을 이용하여 알아낸 기저 함수가 달라지게 되고, 이것은 최종적으로 알고리즘의 성능에 주요한 영향을 준다.

V. 알고리즘의 수행 및 결과

이번 절에서는 본 알고리즘이 어떻게 수행되는지와 그 결과에 대해서 알아본다. 시뮬레이션 조건인 표적의 이동 및 chirp 레이더 파라미터가 표 1에 제시되어 있다. 시뮬레이션을 위한 표적으로는 B737을 선택하였다. 표적은 CAD 파일을 이용하여 산란이

표 1. 표적의 이동 및 레이더 파라미터

Table 1. Moving target & chirp radar parameters.

Direction vector	$[-1 \ 1 \ 0]$
Azimuth angle	45°
Initial position: (x, y, z)	(100, 0, 1) km
Velocity	300 m/s
Center frequency	9.15 GHz
Bandwidth	200 MHz
Pulse width	30 μ s
Chirp sampling freq.	500 MHz

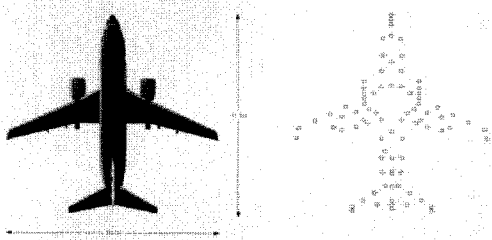


그림 4. 표적의 CAD 모델
Fig. 4. CAD model of target.

많이 발생할 수 있는 부분에 3차원으로 산란점을 배치하여 모델링 하였으며(그림 4), 각 산란점의 RCS 값은 위치에 따라 0~1 사이의 값을 부여하였다.

랜덤한 움직임을 가지는 표적이 일정한 방향으로 날아간다고 가정한다. 그러면, 그림 5와 같이 레이더와 표적간의 관찰 각도의 변화율을 나타낸다. 이 때 변화가 가장 심한 부분인 5번의 경우에서 본 논문의

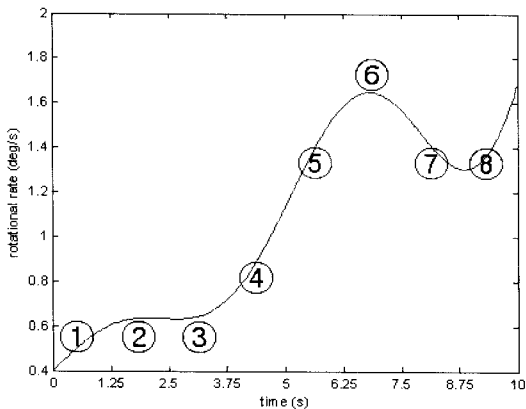
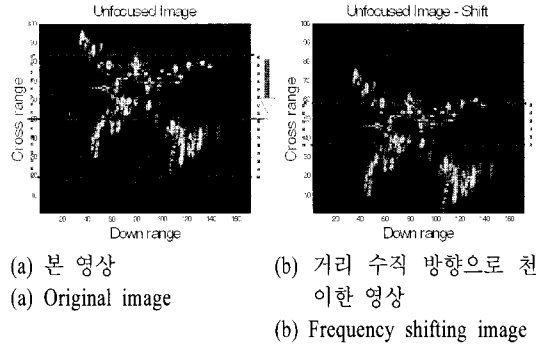


그림 5. 관찰 각도에 따른 표적의 회전율
Fig. 5. Rotation rate of target.



(a) 본 영상
(a) Original image
(b) 거리 수직 방향으로 회전한 영상
(b) Frequency shifting image

그림 6. 레이더와 표적간의 가시선 방향으로의 이동 성분이 보상된 후의 ISAR 영상

Fig. 6. ISAR image after translation motion compensation.

회전 이동 보상 알고리즘(그림 3)을 수행한다.

5-1 재배열(Rearrangement)

먼저 회전 이동 보상 알고리즘을 적용하기 전에, ISAR 영상에서 거리 수직 방향으로 산란점을 재배열을 해야 한다. 레이더와 표적간의 가시선 방향의 이동 성분이 보상된 후의 ISAR 영상은 그림 6(a)와 같이 특정 거리 수직 부분에서 초점이 맞추어진 산란점의 영역이 존재한다. 회전 이동 보상 알고리즘을 적용을 할 경우 이러한 초점이 맞추어진 산란점의 위상이 바뀌는 것을 방지하기 위해서, 초점이 맞는 산란점의 주파수가 원점에 올 수 있게 그림 6(a)를 그림 6(b)가 되게 재배열시킨다.

5-2 Range Bin 찾기

다음은 회전 이동 보상 알고리즘을 위한 range bin을 찾는 과정이다. 이는 전체적인 알고리즘의 성능에 큰 영향을 미치는 부분이고, 본 논문의 주요 관점이다. 우선, ISAR 영상을 거리 방향으로 일정하게 구간을 나눈다. 산란점은 주파수 방향으로 흐려지므로, 나누어진 구간의 2차원 엔트로피 $H(I)$ 를 구하여 이 값이 최대가 되는 부분을 찾는다(그림 7). 그리고 엔트로피가 최대인 부분에 포함된 모든 range bin 중 에너지의 값이 큰 순서대로 다음 알고리즘에 적용시킨다. 우선, 최대 에너지를 갖는 range bin에서의 주요 산란점의 위상 함수를 PSO 알고리즘을 이용하여 추정한다. 본 알고리즘에서는 산란점의 기울기를

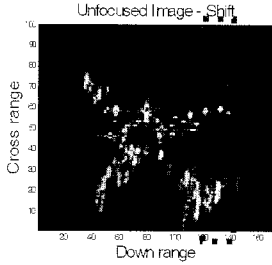


그림 7. 엔트로피가 최대가 되는 부분
Fig. 7. Maximum entropy part.

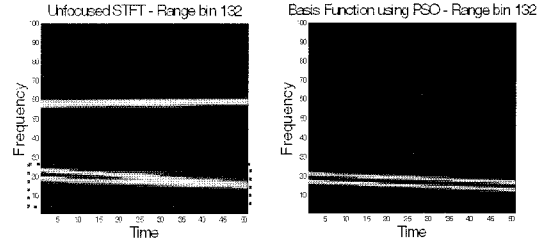
나타내는 위상의 2차항의 계수를 이용한다.

$$H(I) = - \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{I}(m, n) \ln \bar{I}(m, n)$$

$$\bar{I}(m, n) = \frac{|I(m, n)|^2}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |I(m, n)|^2} \quad (8)$$

Range bin이 선택되기 위한 조건으로는, 그 range bin에서 주요 산란점의 위상 기울기가 없거나 잘못된 위상의 값이 선택되는 경우가 없어야 한다. 해당하는 range bin에서 주요 산란점의 위상의 기울기가 시간에 따라 거의 변화가 없는, 즉 최소 기울기보다 작을 경우는 다음 최대 에너지를 갖는 range bin에서 위의 과정을 수행한다. 여기서 최소 기울기는 ISAR 영상이 흐려지기 시작하는 그 때의 표적의 회전 각 속도에 의한 위상으로, 시뮬레이션을 통하여 본 알고리즘 수행에 알맞은 값을 선택하였다.

해당 range bin에서 주요 산란점의 위상의 기울기가 최소 기울기를 넘었다면, 여기에 해당하는 위상 함수를 이용하여 회전 이동의 오차를 제거하고 다시 ISAR 영상을 만든다. 이전 과정에서 산란점의 위상의 기울기가 잘못된 값이 선택이 될 경우 최종 영상의 엔트로피는 이전보다 더 커지게 된다. 여기서, 알고리즘을 수행한 후의 ISAR 영상의 엔트로피가 수행 전보다 크면, 다시 다음 최대 에너지를 갖는 range bin에서 위의 모든 과정을 반복 수행한다. 위의 조건이 만족할 때까지 반복적으로 알고리즘이 수행되고, 최종적으로 최적의 range bin이 선택된다. 전체적인 알고리즘의 수행은 그림 3에서 볼 수 있다. 여기서 TH는 threshold, ent는 entropy, TMC는 translational motion compensation, RMC는 rotational motion compensation을 나타낸다.



(a) 회전 이동 보상 전의 시간-주파수 영역 표현
(b) PSO 알고리즘을 이용한 기저 함수
(a) Time-frequency representation before rotational motion compensation
(b) Basis function using PSO algorithm

그림 8. 주어진 range bin에서의 시간-주파수 영역 해석법을 이용한 위상 추정

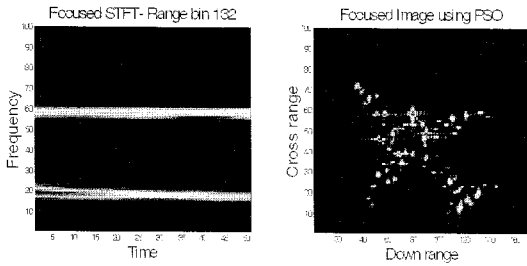
Fig. 8. Phase estimation in a range bin using time-frequency transform.

5-3 위상 추정(Phase Estimation)

최적의 range bin이 선택되었다면, 3절에서 설명하였듯이 레이더 신호의 위상 함수를 추정해야 한다. 그림 8(a)는 선택된 range bin에서의 산란점의 주파수 추이를 STFT(Short Time Fourier Transform)을 이용하여 시간-주파수 영역으로 표현하였다. 주파수 방향으로 가운데 부근의 산란점은 주파수가 시간에 따라 일정하나, 아래의 산란점은 시간에 따라 변하는 것을 볼 수 있다. 즉, 비선형의 위상이 존재한다는 것을 알 수 있다. 그림 8(b)는 PSO 알고리즘을 이용하여, 선택된 range bin에서의 레이더 신호의 기저 함수를 보여준다. 이 기저 함수는 그림 8(a)에서, 아래의 기울어진 산란점의 위상과 같음을 알 수 있다.

5-4 영상 개선(Re-focusing)

마지막으로, 회전 이동의 오차를 제거하기 위해 레이더 신호의 주요 산란점의 비선형적인 위상을 선형으로 만든다. 4절에서 설명하였던 방식을 적용하여, 그림 8(b)에서 추정한 기저 함수의 시간에 따른 비선형적인 위상 변화에서 최소값과 최대값의 차이를 기준으로 등간격으로 위상을 보간한다. 그러면 식 (7)과 같이 최종적으로 위상이 균일하게 샘플링된 ISAR 신호를 얻을 수 있다. 그림 9(a)는 회전 이동 보상 알고리즘 적용 후의 산란점의 주파수 추이를 STFT로 나타내었다. 알고리즘 적용후, 비선형의



(a) 회전 이동 보상 후의 시간-주파수 영역 표현
(b) 최종 ISAR 영상
(a) Time-frequency representation after rotational motion compensation
(b) Final ISAR image

그림 9. 회전 이동 보상 후의 ISAR 영상
Fig. 9. ISAR image after rotational motion compensation.

위상을 가졌던 아래의 산란점의 도플러 주파수가 시간에 따라 일정하게 바뀌었음을 볼 수 있다. 그림 9(b)는 PSO 알고리즘을 이용한 회전 이동 보상 알고리즘 적용 후의 최종적인 ISAR 영상이다. 그림 6(a)와 비교해 볼 때, 표적의 ISAR 영상의 흐려진 부분이 개선되었음을 알 수 있다.

VI. 결 론

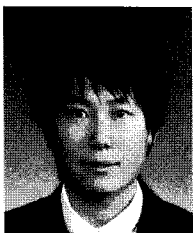
본 논문에서는 chirp 펄스 레이더 기반에서 흐려진 ISAR 영상의 회전 오차를 제거하기 위하여, 시간-주파수 영역 해석법을 이용한 회전 이동 보상 알고

리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘에서는 최적의 range bin을 찾고, 최종 ISAR 영상의 엔트로피를 최소화하는데 중점을 두었다. 알고리즘 적용 후, 표적의 2차원 기동에 의해 발생한 레이더 신호의 비선형적인 위상은 효율적으로 제거되었다. 즉, 표적의 모든 산란점의 도플러 주파수의 추이가 시간에 따라 일정함을 보였고, 이 때 푸리에 변환을 이용하여 최종적으로 초점이 맞추어진 ISAR 영상을 획득할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] V. C. Chen, H. Ling, *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*, Artech House, Boston, MA, USA, 2002.
- [2] S. Qian, *Introduction to Time-Frequency and Wavelet Transforms*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [3] J. Kennedy, R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization", in *Proc. IEEE Conf. Neural Networks IV*, Piscataway, NJ, 1995.
- [4] T. Thayaparan, S. K. Wong, and E. Riseborough, "Focusing ISAR images using adaptive joint time-frequency algorithm on simulated and experimental radar data", *Defence R&D Canada-Ottawa*, Mar. 2003.

정 상 원



2006년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
2009년 8월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)
2009년 9월~현재: 삼성탈레스(주) 연구원
[주 관심분야] 레이더 영상, 레이더 신호처리

김 경 태



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2004년 3월: 영남대학교 전자정보공학부 전임강사
2004년 4월~2008년 2월: 영남대학교 전자정보공학부 조교수
2008년 3월~현재: 영남대학교 전자공학과 부교수
[주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호처리, 패턴 인식, 스펙트럼 추정 등