



칼만 필터를 이용한 효율적인 ISAR Cross-Range Scaling Algorithm

김민*¹, 최인오*², 정주호*³, 김경태*⁴, 박상홍**

Efficient ISAR Cross-Range Scaling Using Kalman Filter

Min Kim*¹, In-O Choi*², Joo-Ho Jung*³, Kyung-Tae Kim*⁴, and Sang-Hong Park**

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임
 (No.2015R1A1A1A05000909)

요 약

본 논문에서는 칼만 필터(Kalman Filter) 및 LSE(Least Square Estimation)를 이용한 효율적인 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) CRS(Cross-Range Scaling) 기법을 제안한다. 두 ISAR 영상사이의 RA(Rotation Angle)를 추정하기 위하여 ISAR 영상에 2차원 푸리에 변환을 이용한 2D 스펙트럼의 회전중심에 근거하여 극 좌표계 사상을 수행한다. 이때 ISAR 영상의 회전성분은 2D 스펙트럼의 극 좌표계에서 각도 방향의 병진운동으로 표현되며, 상관관계를 통하여 RA를 추정할 수 있다. CPI(Coherent Processing Interval) 동안 추정된 RA는 RV(Rotation Velocity)의 정밀추정을 위하여 칼만 필터의 관측값으로 입력되어 최적화되며, LSE를 통하여 RV 추정오차를 최소화시킨다. 등방성 점 산란원으로 구성된 Mig-25 모델을 이용하여 다양한 신호대 잡음비 상황에서 시뮬레이션 결과, (거리/수직거리) 도메인에서 ISAR 영상이 성공적으로 형성되었다.

Abstract

In this paper, an efficient method is proposed for the cross-range scaling of the inverse synthetic aperture radar (ISAR) image. To estimate the rotation angle (RA) between two ISAR images, polar mapping was performed based on the center of rotation formed at a specific frequency using a two-dimensional Fourier transform. Because the rotational component of the spectrum is represented by translational motion in the polar coordinate, RA can be estimated by the correlation. The estimated RA from the correlation of the 2D spectra generated during the coherent processing interval is optimized by the Kalman filter. Furthermore, the least square estimation minimizes the estimation error. In simulations using the Mig-25 model consisting of isotropic point scattering sources, ISAR images were properly rescaled in (range, cross-range) domain for various signal-to-noise ratios.

Keywords

inverse synthetic aperture radar, cross-range scaling, Kalman filter, least square estimation

* 포항공과대학교 전자전기공학과 연구원
 - ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0001-7520-3513>
 - ORCID²: <http://orcid.org/0000-0002-0410-1066>
 - ORCID³: <http://orcid.org/0000-0001-7087-8079>
 - ORCID⁴: <http://orcid.org/0000-0003-1200-5282>
 ** 부경대학교 전자공학과 부교수(교신저자)
 - ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8512-1431>

• Received: Oct. 10, 2017, Revised: Oct. 30, 2017, Accepted: Nov. 02, 2017
 • Corresponding Author: Sang-Hong Park
 Dept. of Electronic Engineering, Pukyong National University Korea,
 Tel.: +82-51-629-6224, Email: radar@pknu.ac.kr

I. 서 론

ISAR 영상은 표적의 다양한 관측 각도에서 얻은 산란원과 표적의 회전으로 발생된 도플러 정보를 합성시켜 생성된 2차원 레이더 단면적 분포도이다 [1]. ISAR 영상은 보통 RD(Range-Doppler) 기법을 통해 RD[m-Hz] 도메인에서 형성되며, 여기서 수직 방향의 도플러 도메인의 해상도 및 척도는 관측시간 및 표적의 RV에 따라서 결정된다. 따라서 RD 도메인에서 표현된 ISAR 영상은 표적의 RV에 따라 도플러 도메인에서 척도가 변하는 특성이 발생하며, 상황에 따라서 표적식별 수행능력이 현저하게 감소될 수 있다. 하지만 이러한 표적식별 수행능력의 감소는 RV를 추정함으로써 수직방향의 도플러 도메인을 수직거리 도메인으로 리스케일(Rescale) 함으로써 해소할 수 있으며, 이를 CRS 라고 한다.

기존의 CRS는 크게 세 가지 방법으로 분류된다. 첫 번째, 거리 빈(Range Bin)의 위상정보를 통하여 RV를 추정하는 방법은 보통 고차의 위상 계수를 추출하거나[2][3] 각 거리 빈의 위상차[4]를 이용하는 방법이다. 하지만 상기 방법은 각 거리 빈마다 변동이 심해 큰 오차가 발생할 수 있으며 이산점(Outlier)에 매우 민감하다. 특히 시간 주파수 영상을 이용하여 위상정보를 산정하는 경우 거리 빈에 해당하는 산란점이 항상 해당 거리 빈에 위치해야 한다는 제한점을 갖는다. 두 번째로, 두 개의 RD 영상을 이용하여 RV를 추정하는 방법은 RD 영상 내에서 회전중심에 대한 정보를 필요로 하므로 실제 기동 표적에 적용하기에는 큰 어려움이 따른다[5]. 마지막 방법은 RD 영상에서 주 산란점(Prominent Point Scatterers)들을 RV 추정에 이용하는 것이다[6]. 하지만 이 방법은 관측각도에 따라서 주 산란점이 주위의 산란점들에 의해 간섭받는 경우가 존재하며, 이는 CRS의 수행능력 저하를 야기한다.

본 논문에서는 보다 효율적인 CRS 수행을 위하여 CPI 내 일정한 간격의 특정 시점들에서 RD 영상을 생성한 후, 회전중심이 특정주파수에서 형성되는 2D 스펙트럼의 극사상(Polar Mapping) 영상을 이용하여 상대적인 회전각도(RA, Rotation Angle)를 추정한다. 추정된 RA는 시간에 따른 표적의 RV의 정밀 추정을 위하여 칼만 필터의 관측값으로 사용되

며 최소자승법(LSE)를 통해 추정오차가 최소화된 RV가 추정된다. 추정된 RV를 이용하여 CRS를 수행한 결과, 표적식별에 효과적인 RR(Range-cross Range) [m-m] 도메인의 ISAR 영상을 형성할 수 있었다.

II. 제안된 기법

본 논문에서 CRS를 위해 제안한 RV 추정 알고리즘은 [7]의 방법을 다양한 관측각도에서 빠른 CRS가 가능하도록 개선시킨 알고리즘이다.

2.1 RD 영상과 RR 영상의 관계식

보통 RD 영상은 표적의 요동이 최소화 되는 구간에서 형성되기 때문에 짧은 CPI 동안 비교적 RV가 일정한 구간에서 영상이 생성된다. 이때 병진 운동 보상기법(TMC, Translation Motion Compensation)이 적용된 표적을 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 그림 1과 같이 표적 산란점의 초기 위치 및 CPI 동안 일정한 RV를 (x_0, y_0) 및 ω_0 라고 가정한다. 만약 k 번째 샘플링 시점 t_k 에서 ω_0 로 회전하는 산란점을 가정할 경우, 그 위치는 다음과 같이 행렬 형태로 사상될 수 있다[7].

$$\begin{bmatrix} X_c(t_k) \\ Y_c(t_k) \end{bmatrix} = SR(t_k) \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

여기서 S 및 $R(t_k)$ 는 각각 척도 및 회전 행렬을 나타내며 식 (2)와 같이 정의된다.

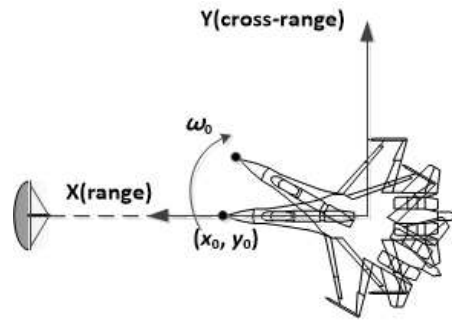


그림 1. TMC 후 회전하는 표적
Fig. 1. Rotating target after TMC

$$S = \begin{bmatrix} 1/\eta_r & 0 \\ 0 & 1/\eta_a \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$R(t_k) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t_k) & -\sin(\omega_0 t_k) \\ \sin(\omega_0 t_k) & \cos(\omega_0 t_k) \end{bmatrix},$$

η_r 및 η_a 는 각각 거리 및 수직거리 척도인자(Scaling Factors)로써 다음과 같다.

$$\eta_r = c/(2f_s), \quad \eta_a = \lambda f_r/(2M\omega_0) \quad (3)$$

여기서 f_s 는 샘플링 주파수, f_r 은 펄스반복주파수 (PRF, Pulse Repetition Frequency), c 는 빛의 속도, λ 는 파장 그리고 M 은 RD 영상을 형성하는데 사용된 펄스의 개수이다. 이때 위 수식에서와 같이 f_c 및 c 는 시스템의 하드웨어에서 결정된 샘플링 주파수 및 특정 매질에서 일정한 빛의 속도이므로 η_r 은 특정 상수로 결정되는 반면에 ω_0 는 추정이 필요한 미지 변수이므로 표적의 산란점이 η_a 에 의해 RR 도메인에서 RD 도메인으로 사상됨을 알 수 있다. 따라서 RD 도메인에서 RR 도메인으로의 변환을 위해서는 RV의 정확한 추정이 반드시 필요하다.

2.2 RA 추정

보통 RV의 추정을 위하여 두 RD 영상들에서 나타나는 상대적인 RA 차이를 먼저 추출한다. 두 RD 영상은 서로 다른 시점 t_{k1} 및 t_{k2} 에서 형성되며 다음과 같은 관계식에 따른다[7].

$$\begin{bmatrix} X_c(t_{k2}) \\ Y_c(t_{k2}) \end{bmatrix} = SR(t_{k2})R^{-1}(t_{k1})S^{-1} \begin{bmatrix} X_c(t_{k1}) \\ Y_c(t_{k1}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_d) & -C_r \sin(\theta_d) \\ \sin(\theta_d)/C_r & \cos(\theta_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c(t_{k1}) \\ Y_c(t_{k1}) \end{bmatrix}$$

여기서 $\theta_d = \omega_0(t_{k2} - t_{k1}) = \omega_0 \Delta t$ 는 두 RD 영상 사이의 상대적인 RA이며, $C_r = \eta_a/\eta_r$ 에 따라 영상의 수직방향의 척도가 비례축소 된다. 위 식들을 이용하여 θ_d 를 추정하기 위해서는 RD 영상의 회전중심에 대한 정보가 수반되어야 하는데, 실제상황에서 회전중심을 아는 것은 매우 어렵기 때문에 본 논문

에서는 2D 푸리에변환(FT, Fourier Transform)을 이용하여 회전중심 문제를 해결한다.

만약 RD 영상에 2D FT를 수행할 경우, 변환된 2D 스펙트럼에서는 항상 (0,0)Hz에서 회전중심이 형성되며 이것을 이용하여 두 스펙트럼 사이의 RA 추정이 수행될 수 있다[7]. 이후 두개의 2D 스펙트럼들에서 RA를 효율적으로 추정하기 위해 2D 스펙트럼을 극 좌표계로 사상하여 크기(r)-각도(θ) 도메인으로 변환시킨다[8]. 극 좌표계로 사상된 스펙트럼의 회전 운동은 θ 방향의 병진운동으로 표현되므로 θ 방향에 따라서 상관관계가 최대가 되는 θ_{max} 를 통해 RA의 근사 값을 다음과 같이 추정할 수 있다[7].

$$\theta_d = \underset{k}{\operatorname{argmax}} \left\{ \sum_{m=1}^{N_r} |IFT_\theta[FT_\theta[I_{p1}] * FT_\theta[I_{p2}]]| \right\} \quad (5)$$

위 식은 FT의 컨볼루션의 특성을 이용하여 효율적으로 상관관계를 계산한 식이며, $FT_\theta[\cdot]$ 및 $IFT_\theta[\cdot]$ 는 θ 방향으로 1차원 FT 및 역(Inverse) FT을 의미한다. 그리고 $I_{p1}(m, k)$, $I_{p2}(m, k)$ 는 각각 극 좌표계로 사상된 2차원 스펙트럼 영상들이며, $m = 1, 2, \dots, N_r$, $k = 1, 2, \dots, N_\theta$ 으로써 극 좌표계중심으로부터 거리샘플(N_r) 및 방위각 샘플(N_θ)을 의미한다. 그러나 식 (4)의 C_r 존재 때문에 상관관계를 통해 추정되는 RA에는 오차가 발생한다. 이에 따라서 [7]에서는 Nelder-Mead 추정기법을 통해 RA로부터 비교적 정밀하게 RV를 추정을 하는 기법을 제안하였다. 그러나 본 논문에서는 CPI 동안 다양한 관측각도에서 생성되는 RD 영상들마다 보다 정확하고 효율적인 CRS를 수행시키기 위하여 새로운 RV 추정 방법을 제안한다.

2.2 RV 추정

일반적으로 정확하게 시스템의 상태를 추정 혹은 측정하는 것은 매우 어려운 일이다. 이는 측정 및 데이터를 처리하는 과정에서 사용되는 도구들의 제한된 정밀성이 그 첫 번째 이유이며 진화 시스템의 추정 단계에서 모든 상태 매개변수를 포함하는 것이 어렵다는 점이 두 번째 이유이다. 이에 따라서

시스템의 상태를 근사하여 고정된 개수의 적률을 추정하는 기법들이 사용된다. 상기 이유들로부터 특정 적률(Moment), 특히 평균과 분산만을 추정하는 칼만 필터가 유용하게 사용되고 있다[9]. 따라서 본 논문에서 제안하는 RV 추정기법은 상관계수로 추정된 RA를 칼만 필터의 관측값으로 적용하여 다양한 관측각도에서 RV의 추정 값을 최적화하며, LSE를 이용하여 추정 값의 오차를 최소화한다.

먼저 RV 및 각가속도를 상태변수로 가지는 시간에 따른 시스템 모델 및 관측 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H = [1 \quad \Delta t] \quad (6)$$

이때 상기 시스템 및 관측 모델과 앞 챗터에서 산정된 RA를 이용하여 시간에 따른 RV를 칼만 필터를 통해 효율적으로 추정할 수 있다. 하지만 칼만 필터는 특정 적률만을 추정하기 때문에 실제 RV 값과 비교하여 추정오차가 발생할 수 있다. 하지만 RD 영상이 생성되는 CPI 구간은 RV의 급격한 변화가 없는 구간을 선정[10]하기 때문에 실제 표적의 RV 값을 중심으로 칼만 필터의 추정 값이 특정 편차를 갖고 분포된다. 이에 따라서 추정 값의 편차 제곱 합을 최소로 하는 LSE를 이용하여 추정오차를 최소화 시킬 수 있다. 상기 제안된 전체 알고리즘은 그림 2와 같이 표현될 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

CRS 수행에 관련된 시뮬레이션에서는 그림 3에 도시된 것과 같이 82개의 등방성 점 산란원으로 구성된 Mig-25 모델이 사용되었다. RD 영상이 생성될 때 사용된 레이더 파라미터는 표 1과 같으며 이동하는 표적에 대해서 TMC는 이미 수행되었음을 가정한다. 표적은 CPI 동안 0.1745 rad/sec의 RV로 0.0249 rad/sec의 각가속도 회전성분을 가정하였다.

또한 2D 스펙트럼의 픽셀사이의 급격한 변화를 방지하기 위하여 2D 주파수 도메인에서 업 샘플링 및 각 RD 영상이 생성되는 레이더와 표적사이의 거리에 따른 신호 크기 변화에 대한 영향을 해소하기 위하여 정규화과정이 수행되었다.

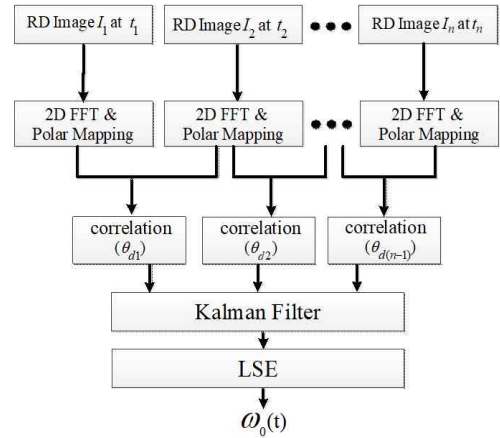


그림 2. 제안된 알고리즘
Fig. 2. Proposed algorithm

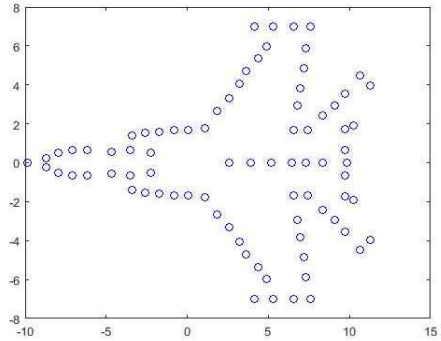


그림 3. Mig-25 점 산란원 모델
Fig. 3. Mig-25 consisting of point scatterers

표 1. 레이더 파라미터

Table 1. Radar parameters

Carrier frequency	9.15 GHz
Frequency bandwidth	400 MHz
Pulse repetition frequency	1000 Hz
Pulse width	30 μsec
Sampling frequency	512 MHz
CPI	3 sec

칼만 필터를 이용한 RV 측정에 사용되는 RD 영상은 300개의 펄스를 통해 생성되었으며 상대적인 RA 산정을 위해 필요한 두 개의 RD 영상은 각각 1-300, 101-400 번째 펄스로 200개의 펄스를 중복시켜 형성하였다. 상기 방법을 반복하여 CPI 동안 표적으로부터 수신된 3,000개의 신호를 통해 생성된 28개의 RD 영상이 CPI 동안의 RV 추정시뮬레이션에 사용되었다.

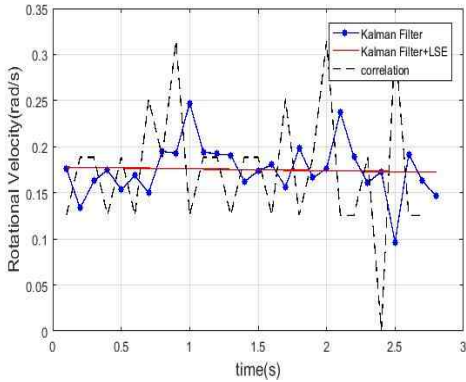


그림 4. 시간에 따른 추정결과 (SNR = 30dB)
Fig. 4. Estimation result (SNR = 30dB)

그림 4는 SNR = 30dB 일 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 100번의 몬테-카를로 시뮬레이션 (Monte-Carlo Simulation) 결과 상관관계(그림 4의 파선)를 통해 추정된 RV는 실제 RV를 기준으로 평균 29.7423%의 추정오차가 발생하였으며 칼만 필터(점선)만을 사용하여 추정한 RV는 평균 11.6736%, 칼만 필터와 LSE(실선)를 모두 적용하여 추정한 RV는 평균 1.3588%의 추정오차가 발생하였다.

그림 5은 SNR 별 추정오차를 각 기법별로 도시한 결과이다. 상기 결과 또한 각 SNR 별로 100번의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 도출되었다. 그림에서 볼 수 있듯이 상관관계를 통해 추정된 RV는 30%에 가까운 추정오차가 발생하며, SNR = 0dB 인 경우 48%의 추정오차가 발생한다. 이에 반해 칼만 필터 및 LSE를 적용하여 추정된 RV의 경우, SNR = 5~30dB에서는 3% 이하의 추정오차가 발생하였으며 SNR = 0dB에서도 10%의 비교적 작은 추정오차로 시간에 따른 RV 추정이 효과적으로 수행됨을 확인하였다.

표 1의 레이더 파라미터를 통해 수직방향의 척도가 결정된 RD 영상(그림 6(a)) 및 추정된 RV를 통하여 CRS가 수행된 ISAR 영상은 그림 6(b)와 같다. 상기 CRS가 적용된 ISAR 영상이 그림 3의 점 산란원 모델과 동일한 크기로 리스케일된 것을 확인 할 수 있었으며, 이를 통해 제안된 알고리즘이 시간에 따른 표적의 RV 추정에 효과적으로 수행될 수 있음을 확인하였다.

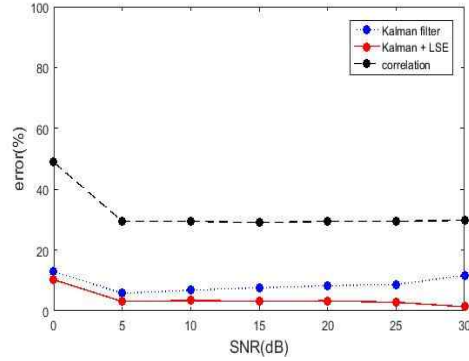


그림 5. SNR에 따른 estimation error
Fig. 5. Estimation error vs. SNR

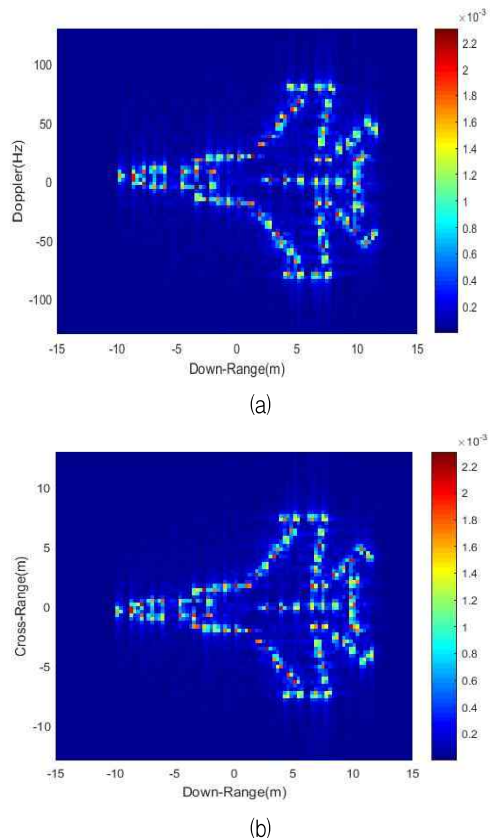


그림 6. CRS (a) 전 (b) 후 ISAR 영상 (SNR = 30dB)
Fig. 6. (a) RD image (b) Rescaled image (SNR = 30dB)

IV. 결 론

본 논문에서는 ISAR 영상의 보다 효율적인 CRS를 위하여 칼만 필터 기반의 RV 추정기법을 제안

하였다. 제안된 기법은 먼저 RD 영상을 2D FT를 수행함으로써 알 수 있는 회전중심을 기반으로 극좌표 사상하였다. 이후 일정한 간격으로 연속적인 시점에서 극좌표 사상된 2D 스펙트럼들을 각도방향에 따른 상관관계로 RA를 산정하였으며, 칼만 필터를 통해 보다 효율적으로 RV 값을 추정하였다. 평균과 분산만을 추정하는 칼만 필터의 특성에 의해 발생된 추정오차는 ISAR 영상의 회전속도가 비교적 일정한 구간에서 생성된다는 특징을 기반으로 LSE를 적용하여 최소화할 수 있었다. 시뮬레이션결과, 칼만 필터 및 LSE를 적용하여 추정된 RV의 경우 SNR = 5~30dB에서는 3% 이하의 추정오차가 발생하였으며, SNR = 0dB에서도 10%의 비교적 작은 추정오차로 시간에 따른 RV 추정이 효과적임을 확인하였다.

References

[1] S. H. Park and M. G. Joo, "A Study on ISAR Imaging Scenario of Formation Flight", Journal KIIT, Vol. 10, No. 4, pp. 49-56, Apr. 2012.

[2] Y. X. Wang, L. Hao, and V. C. Chen, "ISAR motion compensation via adaptive joint time-frequency technique", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 34, No. 2, pp. 670-676, Apr. 1998.

[3] Y. Wang and Y. C. Jiang, "A novel algorithm for estimating the rotation angle in ISAR imaging", IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., Vol. 5, No. 4, pp. 608-609, Oct. 2008.

[4] J. M. Munoz-Ferreras and F. Perez-Martinez, "Uniform rotational motion compensation for inverse synthetic aperture radar with non-cooperative targets", IET Radar Sonar Navig., Vol. 2, No. 1, pp. 25-34, Feb. 2008.

[5] C. M. Yeh, J. Xu, Y. N. Peng, and X. T. Wang, "Cross-range scaling for ISAR based on image rotation correlation", IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., Vol. 6, No. 3, pp. 597-601, Jul. 2009.

[6] C. M. Yeh, J. Xu, Y. N. Peng, and X. T. Wang,

"ISAR image fusion with two separated aspect observations", in Proc. IEEE Radar Conf., pp. 1-6, May 2009.

[7] S. H. Park, H. T. Kim, and T. K. Kim, "Cross-Range Scaling Algorithm for ISAR Images Using 2-D Fourier Transform and Polar Mapping", IEEE Trans. Geo. & Remote Sens., Vol. 49, No. 2, pp. 867-877, Feb. 2011.

[8] K. T. Kim, D. K. Seo, and H. T. Kim, "Efficient classification of ISAR images", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 53, No. 5, pp. 1611-1621, May 2005.

[9] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems", Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Vol. 82, No. 1, pp. 35-45, Mar. 1960.

[10] V. C. Chen, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imagine", SciTech Publishing, Inc., 2014

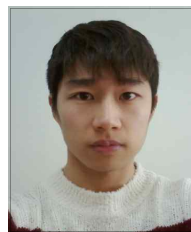
저자소개

김민 (Min Kim)



2015년 2월 : 부경대학교
전자공학과 (공학사)
2017년 2월 : 부경대학교
전자공학과 (공학석사)
2017년 3월 ~ 현재 : 포항공과
대학교 전자전기공학과 연구원
관심분야 : 레이더 표적인식,
레이더 신호처리, 전력발전단지 EMI/EMC 분석

최인오 (In-O Choi)



2012년 8월 : 부경대학교
전자정보통신공학과(공학사)
2014년 8월 : 부경대학교
전자공학과(공학석사)
2015년 9월 ~ 현재 : 포항공과
대학교 전자전기공학과 박사과정
관심분야 : 미세도플러 분석,
레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 패턴인식,
스펙트럼 추정

정 주 호 (Joo-Ho Jung)



1991년 2월 : 공군사관학교
전자공학과(공학사)
1995년 2월 : 서울대학교
전자공학과(공학사)
1998년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2007년 2월 : 포항공과대학교

전자전기공학과(공학박사)

2013년 2월 : 고려대학교 경영학과(MBA)

2013년 3월 ~ 현재 : 한택에너지 대표이사

2016년 1월 ~ 현재 : KAIST 국방무인화기술

특화연구센터 연구 교수

관심분야 : 풍력단지 EMI/EMC 분석, 포탄 RCS 분석,

김 경 태 (Kyung-Tae Kim)



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

관심분야 : 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식
및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정

박 상 홍 (Sang-Hong Park)



2004년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 (공학사)
2007년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 (공학석사)
2010년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 (공학박사)
2010년 9월 ~ 현재 : 부경대학교

전자공학과 부교수

관심분야 : 미세도플러 분석, 풍력단지 EMI/EMC 분석,
레이더 표적인식, 레이더영상, 레이더 신호처리 등