항공기 표적의 HRRP-JEM 영상에서 복소 신호의 이심률을 이용한 제트 엔진 위치 추정

Localization of Jet Engine Position from HRRP-JEM Images of Aircraft Targets Using Eccentricity of Complex-Valued Signals

박지훈 · 양우용 · 배준우* · 강성철* · 명로훈

Ji-Hoon Park · Woo-Yong Yang · Jun-Woo Bae* · Seong-Cheol Kang* · Noh-Hoon Myung

요 약

2005년에 처음 소개된 HRRP-JEM(High Resolution Range Profile-Jet Engine Modulation) 영상은 항공기 표적에 탑재된 제트 엔진의 장착 위치를 추정함으로써 레이더 표적 인식을 수행한다. 본 논문에서는 복소 신호의 이심률을 기반으로 HRRP-JEM 영상에서 제트 엔진 위치를 추정하기 위한 새로운 접근법을 제시한다. 복소 신호의 이심률은 HRRP-JEM 영상을 구성하는 어떤 거리 성분(range bin)에서의 레이더 수신 신호에 미치는 JEM 성분의 기여도를 효과적으로 산출할 수 있다. 따라서 JEM 성분의 기여도가 가장 큰 거리 성분이 제트 엔진의 위치에 해당하며, 이를 짚어냄으로써 보다 정량적이고 신뢰성 있는 제트 엔진 위치 추정이 가능할 것으로 기대된다. 사실적인 항공기 모델의 시뮬레이션 결과를 통해 본 논문에서 제안한 개념의 유효성을 입증하였다.

Abstract

High Resolution Range Profile-Jet Engine Modulation imagery first introduced in 2005 carries out radar target recognition by localizing the position of the jet engine installed on the aircraft target. This paper presents a new approach for estimating the jet engine position in the HRRP-JEM image based on the eccentricity of a complex signal. It can effectively evaluate the contribution of the JEM component to the radar received signal in a range bin of the HRRP-JEM image. Therefore, the localization is expected to be performed more quantitatively and reliably by pinpointing the range bin corresponding to the jet engine position where the JEM contribution is maximized. The simulation results of realistic aircraft models validated the effectiveness of the proposed concept.

Key words : High Resolution Range Profile-Jet Engine Modulation (HRRP-JEM), Jet Engine Localization, Radar Imagery, Radar Target Recognition, Signal Eccentricity

I. 서 론

ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상은 표적을 구성하는 산란점의 상대적인 위치 및 표적의

형태에 관한 정보를 제공하여 레이더 표적 인식에 널리 활용되어 왔으나, 영상의 수직 방향(cross-range) 정보가 전적으로 표적의 레이더에 대한 상대적인 회전 움직임에 의존하게 된다. 따라서 항공기 표적이

「본 연구는 삼성탈레스의 연구비 지원으로 수행되었습니다.」

한국과학기술원 전기 및 전자공학과(Department of Electronic Engineering, KAIST)

*삼성탈레스(Samsung Thales Co., Ltd.)

· Manuscript received August 26, 2013 ; Revised October 10, 2013 ; Accepted October 16, 2013. (ID No. 20130826-076)

· Corresponding Author : Ji-Hoon Park (e-mail : dydynoel@kaist.ac.kr)

그림 1. HRRP-JEM의 적용 사례^[2]Fig. 1. Application example of HRRP-JEM^[2].

레이더를 곧바로 향하는 경우와 같이 상대적인 회전 움직임이 매우 작을 때, 영상의 수직 방향 해상도(cross-range resolution)가 저하되므로 ISAR 영상만으로 표적의 정보를 획득하는 데에는 한계가 존재한다. 2005년에 P. Tait는 이러한 ISAR 영상의 단점을 극복하고자 HRRP-JEM(High Resolution Range Profile-Jet Engine Modulation)이라는 새로운 레이더 영상의 개념을 제시하였다^{[1],[2]}. HRRP-JEM 영상은 높은 거리 해상도(high range resolution)와 높은 주파수 해상도(high frequency resolution)를 갖는 레이더 파형을 사용하여, 그림 1과 같이 제트 엔진 변조 효과(JEM)^{[3],[4]} 스펙트럼을 통해 장착된 엔진의 특성을 제공하는 한편, HRRP를 통해 레이더의 관측거리를 따르는 항공기의 기하학적인 반사정보를 제공한다. 뿐만 아니라 2차원 전자기 영상으로부터 JEM이 발생하는 거리(range)를 토대로 항공기 엔진의 장착 위치에 관한 정보를 제공하며, 이것이 HRRP-JEM 영상의 주요 표적 인식 기능이라고 할 수 있다. 이처럼 HRRP-JEM 영상은 하나의 포괄적이고 독립적인 레이더 표적 인식 수단으로 간주될 수 있으나, 다른 레이더 영상과 달리 관련 연구 사례를 찾아보기가 힘들다.

참고문헌 [5]는 HRRP-JEM 영상에서 제트 엔진의 위치를 자동적으로 추출할 수 있는 알고리즘을 제안한 바 있다. 이 알고리즘은 제트 엔진이 위치하고 있는 거리를 찾기 위해 JEM 스펙트럼의 정성적인 특징을 활용한다. 즉, 하모닉 형태의 JEM 스펙트럼이 넓게 형성되어 있는 거리를 적절한 한계값(threshold)을 통해 판별하여 자동적으로 제트 엔진의 위치를 추정하게 된다. 그러나 이 비 매개변수(non-parametric)

접근법은 한계값 설정의 모호성을 야기할 뿐 아니라, 신호 자체의 특성을 고려하지 않으므로 JEM 스펙트럼의 세기가 약하거나 항공기 구조로부터의 산란강도가 높을 경우 오차를 유발할 가능성이 있다.

이에 본 논문에서는 항공기의 HRRP-JEM 영상에서 제트 엔진의 위치를 정량적으로 추정하는 기법을 제시한다. 복소 신호의 이심률(eccentricity)^{[6],[7]} 개념을 도입하여 HRRP-JEM 영상의 거리 성분(range bin)에서의 수신 신호에 미치는 JEM 성분의 기여도를 산출한다. 그 후, HRRP-JEM 영상을 구성하는 각 거리 성분의 이심률 값들을 비교하여 JEM의 기여도가 가장 높은 거리 성분을 짚어냄으로써 제트 엔진의 위치를 추정한다. II절에서는 수신 신호의 모델 및 신호의 이심률을 이용한 제트 엔진 위치 추정 개념을 소개한다. III절에서는 사실적인 항공기 모델의 HRRP-JEM 영상에 제안된 기법을 적용하여 그 유효성을 검증한다. IV절에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 복소 신호의 이심률을 이용한 HRRP-JEM 영상의 제트 엔진 위치 추정 기법

2-1 HRRP-JEM 영상의 수신 신호 모델

HRRP-JEM 영상의 각 거리 성분에 위치한 레이더 수신 신호는 ISAR 영상에서와 같이 점 산란체를 기반으로 간단하게 모델링된다^{[8],[9]}. 그림 2와 같이 중심이 O 이고, 회전 속도 ω_Q 및 시변 회전각 $\theta(t)$ 를 갖는 표적 상에 위치한 산란점을 Q 라 할 때, Q 로부터 수신된 레이더 신호는 다음과 같다.

그림 2. 회전부를 가진 표적의 기하학적 구조

Fig. 2. Problem geometry of a target with a rotating part.

$$s_Q(t) = \rho \exp \left[j \frac{4\pi R_Q}{\lambda} \omega_Q t \right] \quad (1)$$

위 식에서 λ 은 레이더 신호의 파장, ρ 은 표적의 반사율이며, 완전 도체로 구성된 표적일 때 1과 같다. R_Q 는 표적의 중심 O 와 Q 간의 거리이다. 여기서 식 (1)은 레이더 영상의 이론에서 다루어지는 ‘작은 관측각 가정(small accumulation angle assumption)^[8]’, 즉 ‘ $\omega_Q t \ll 1$ ’에 의해 선형 위상을 갖는 식으로 근사되었다. 이는 표적의 기동에 의해 레이더 영상 획득을 위한 관측 시간(imaging dwell time)이 수십 ms 이내로 제한될 수 있으며^[1], 영상을 구성하는 산란점의 일정한 도플러 편이를 얻기 위해 회전 속도 ω_Q 또한 적은 값을 가지기 때문이다. 특히 표적의 수직 방향(cross-range) 범위가 매우 제한적인 HRRP-JEM 획득 상황에서는 레이더에 대한 상대적인 회전 속도 ω_Q 가 0에 근접하므로, 표적 자체에서 산란된 신호에 대한 식 (1)의 간단한 모델링은 유효성을 갖는다.

한편, Q 를 중심으로 ω_P 의 속도로 회전하는 회전부(rotating part)상의 산란점을 P 라고 할 때, 이로부터의 레이더 수신 신호는 다음과 같다.

$$s_P(t) = \exp \left[j \frac{4\pi R_P}{\lambda} \sin(\omega_P t) \right] \quad (2)$$

여기서 R_P 는 회전의 중심 Q 로부터 P 까지의 거리이다. 앞선 경우와는 달리 회전부, 즉 프로펠러 구조에서 산란된 신호의 수식은 정현파형 위상을 갖는다. 이는 표적에 장착된 프로펠러의 높은 회전 속도($\omega_Q \ll \omega_P$)에 의해 ‘ $\omega_P t \ll 1$ ’이 더 이상 성립하지 않기 때문이다. 특히, 제트 엔진의 터빈 프로펠러는 통상 2,000 rpm에서 12,000 rpm 가량의 회전 속도를 갖는다^{[1],[3]}. 일반적으로 HRRP-JEM 영상을 구성하는 수신 신호는 회전하는 제트 엔진뿐만 아니라, 항공기 구조로부터의 산란 신호를 포함하므로 다음과 같이 식 (1)과 식 (2)의 합의 형태^[9]로 간단히 표현된다.

$$s_{total}(t) = s_P(t) + K s_Q(t) \quad (3)$$

K 는 편의상 도입된 가중치이며, 신호에 대한 항공기 표적 자체의 산란신호 $s_Q(t)$ 의 기여분을 조절한다. 다음 절에서는 위의 간단한 모델을 이용하여 복소 신호의 이심률 개념을 소개한다.

2.2 이심률 개념을 활용한 제트 엔진 위치 추정

복소 신호의 이심률은 신호를 시간 축-실수 축-허수 축의 3차원 공간에 표시할 때, 복소 평면을 관통하는 중심축에 대한 신호의 원형 회전도(circularity)를 측정한다^{[6],[7]}. 다양한 이심률의 수식이 있으나, 본 논문에서는 다루는 신호가 복잡한 주파수 성분으로 구성되어 있다는 점을 고려, 신호의 통계적인 특성을 이용한 다음의 식 (4)^[7]를 이용한다.

$$\epsilon = \sqrt{|E[\bar{s} \cdot \bar{s}^T] / E[\bar{s} \cdot \bar{s}^H]|} \quad (4)$$

여기서 근호 안의 분모는 공분산(covariance), 분자는 근사 공분산(pseudo-covariance)이며, $\bar{s}$ 는 신호를 벡터의 형태로 표현한 것이다. 이심률 ϵ 은 0부터 1의 범위를 가지며, 신호가 복소평면의 중심축에 대해 원형으로 회전하면 0에 근접하고, 회전의 중심이 중심축을 이탈하거나 선형의 형태를 가지면 1에 근접한다. 식 (3)의 각 신호 성분은 기본적으로 중심축에 대해 원형으로 회전하는 특성을 지니나, 앞서 언급한 바와 같이 일정한 관측 시간 동안 두 신호 성분 $s_P(t)$ 및 $s_Q(t)$ 의 회전 특성이 크게 달라질 수 있다.

그림 3에는 $s_P(t)$, $K s_Q(t)$, $s_{total}(t)$ 의 회전 특성을 나타내었다. 20 ms의 관측 시간 및 10 GHz의 레이더 주파수에 대해, 항공기 구조로부터의 산란 성분이 JEM 성분보다 강한 경우를 고려하여 가중치 K 는 3으로 주었다. 이 때 산란점 Q 는 표적의 중심에서 3 m 떨어져 있고, 표적 자체의 회전 속도는 1.8 %/s로 주었다. 또한, 산란점 P 는 Q 에서 0.4 m 떨어져 있고, 2,400 rpm으로 회전하는 터빈 프로펠러 상에 위치하

그림 3. 신호 성분의 회전 특성(점선 화살표 표시)
Fig. 3. Rotating behaviors of signal components(indicated by dotted arrows).

그림 4. 가중치 K 에 따른 $s_{total}(t)$ 이심률의 변화
Fig. 4. Eccentricity trend of $s_{total}(t)$ by K .

는 것으로 가정하였다. 그림 3으로부터, 간단히 모델링된 JEM 성분 $s_P(t)$ 는 복소 평면의 중심축에 대해 원형의 회전형태를 유지하는 반면, $Ks_Q(t)$ 는 느린 회전 속도 ω_Q 에 의하여 주어진 시간동안 선형에 가깝게 움직임을 확인할 수 있다. 이러한 영향으로 전체 신호 $s_{total}(t)$ 는 중심축에서 이탈하여 $Ks_Q(t)$ 주위에서 $s_P(t)$ 와 동일하게 회전한다. 이 때, $s_P(t)$, $Ks_Q(t)$, $s_{total}(t)$ 의 이심률 값은 각각 0.1263, 0.9482, 0.9279로 계산되었다.

그림 4에는 가중치 K 를 변화시키기에 따른, $s_{total}(t)$ 의 이심률 변화 추이를 나타내었다. K 가 1보다 적으면 전체 신호에 대하여 $s_Q(t)$ 의 기여도가 낮아지면서 동시에 JEM 성분 $s_P(t)$ 의 기여도는 높아진다. 반면에 가중치 K 를 증가시키기에 따라 전체 신호에 대한 JEM 성분의 기여도가 낮아지면서 동시에 이심률 ϵ 또한 증가함을 알 수 있다. 이러한 신호의 구성 성분과 이심률 간의 상관 관계를 HRRP-JEM 영상에서의 제트 엔진 위치 추정에 적용 가능하다. 제트 엔진의 위치에 해당하는 거리 성분은 JEM 성분의 기여도가 상대적으로 커지며, 이에 상응하여 모든 거리 성분 중에서 최소의 이심률 값을 가지게 될 것이다. 즉, 최소 이심률 값을 근거로 JEM 기여도가 가장 높은 거리 성분을 짚어냄으로써, 해당 성분을 제트 엔진의 장착 위치로 판정한다.

III. 시뮬레이션 및 적용 결과

3-1 항공기 모델의 RCS 데이터 획득

표 1. 시뮬레이션 변수 및 항공기 모델 정보
Table 1. Simulation parameters and information on the aircraft models.

항공기 모델	모델 A	모델 B
전자기 해석법	Shooting and bouncing rays (SBR)	
중심 주파수	10 GHz	
대역폭	150 MHz (거리 해상도=1 m)	
주파수 step	21 steps, 7.5 MHz	51 steps, 3.0 MHz
PRF	80 kHz	20 kHz
Dwell time	20 ms (주파수 해상도=50 Hz)	
항공기 길이	13.34 m	47.96 m
전면-엔진 길이	8.46 m	31.51 m
장착 엔진 수	1	4
엔진 회전 속도	6,000 rpm (100 rps)	

제안된 기법을 검증하기 위해, 본 절에서는 그림 5와 같이 사실적으로 모델링된 항공기 모델로부터의 2차원 RCS 데이터^[5]를 HRRP-JEM 영상 형성 및

그림 5. RCS 데이터 획득을 위한 사실적인 항공기 모델 및 장착 엔진

Fig. 5. Realistic aircraft models equipped with engines for obtaining RCS data.

제트 엔진 위치추정 과정에 이용하였다. 표 1에 전자기 시뮬레이션 변수 및 항공기 관련 정보를 정리하였다. 그림 1에 나타난 것과 같이 표 1의 길이 정보는 비스듬하게 입사하는 레이더 신호에 의해 정사영된 표적의 길이를 나타낸다. 항공기 표적의 레이더에 대한 상대적인 움직임은 고려되지 않았으며, HRRP-JEM 영상 획득을 위해 높은 거리 해상도와 주파수 해상도를 갖는 레이더 파형이 사용되었다.

3-2 HRRP-JEM 영상에서의 제트 엔진 위치 추정

앞 절에서 기술된 2차원 RCS 데이터에 주파수를 따르는 역 푸리에 변환 및 시간을 따르는 푸리에 변환을 적용하였다. 그 결과, 거리 성분 축(range bin

(a) 항공기 모델 A의 HRRP-JEM 영상
(a) HRRP-JEM image of aircraft model A

(b) 항공기 모델 B의 HRRP-JEM 영상
(b) HRRP-JEM image of aircraft model B

그림 6. 항공기 모델에 대한 HRRP-JEM 영상
Fig. 6. HRRP-JEM images of aircraft models

축)과 주파수 축으로 구성된 HRRP-JEM 영상을 그림 6과 같이 얻었다. 그림 7에는 HRRP-JEM 영상의 각 거리 성분의 데이터를 다시 시간 신호로 변환한 후, 각 거리 성분의 이심률 값을 식 (4)를 이용하여 계산한 결과를 나타내었다. 이 때 항공기의 실 범위에 포함되지 않는 거리 성분 또는 최대 RCS가 -20 dBsm미만으로서, 전체 영상에 거의 영향을 주지 않는 스푸리어스 성분으로 구성된 거리 성분은 이심률 계산에서 제외되었다. 스푸리어스 성분은 실제 제트 엔진 위치 외의 다른 곳에서 일부 분포하는 JEM 성분이며, 그림 1과 그림 6에서 확인할 수 있다.

먼저 그림 6(a)의 항공기 모델 A의 HRRP-JEM 영상에서, 항공기 자체의 이동이 없으므로 0 주파수의 HRRP를 근거로 전면부(head) 및 후면부(tail) 그리고 항공기 동체(fuselage)의 위치를 추정할 수 있다. 전면부는 4번째 거리 성분, 후면부는 18번째 거리 성분에 위치하며, 거리 해상도가 1 m라는 점을 고려, 추정된 위치는 표 1의 항공기 길이와 부합됨을 알 수 있다. 또한, 11번째에서 14번째 거리 성분에는 넓은 스펙트럼이 분포한다. 이는 이 부근에 제트 엔진이 위치함을 시사하지만, 정성적인 특성만으로 제트 엔진 위치에 해당하는 거리 성분을 확정할 수 없다. 그림 7(a)의 항공기 모델 A에 대한 이심률 계산 결과에 의하면, 13번째 거리 성분이 11~14번째 거리 성분 뿐만 아니라, 전체 계산 대상 거리 성분 중에서 최소의 이심률 값을 가짐을 알 수 있다. 즉, II절에서 기술된 바와 같이 13번째 거리 성분이 가장 높은 JEM 기여도를 가짐을 확인할 수 있다. 전면부의 거리 성분부터 추정된 거리 성분까지 9개의 단위길이 1 m인 거리 성분이 위치하므로 실제 전면부-엔진의 길이인 8.46 m와 부합한다. 또한, 11~12번째 거리 성분의 경우 높은 이심률을 가지므로, JEM에 의해서가 아닌 항공기 구조로부터의 강한 산란으로 인해 상대적으로 넓게 분포한 스펙트럼이 형성되었음을 예상할 수 있다.

그림 6(b)의 항공기 모델 B의 HRRP-JEM 영상에서는 후면부의 위치가 불분명하나, 전면부가 2번째 거리 성분에 위치함을 확인할 수 있다. 또한, JEM과 유사한 2개의 넓은 스펙트럼이 27~29번째 및 34~36번째 거리 성분에 나타난다. 그림 7(b)의 모델 B에

(a) 모델 A의 거리 성분들의 이심률
(a) Eccentricity of range bins of model A

(b) 모델 B의 거리 성분들의 이심률
(b) Eccentricity of range bins of model B

그림 7. 항공기 모델의 각 거리 성분 데이터에 대한 이심률 계산 결과

Fig. 7. Eccentricity computation results of range bin data of aircraft models.

대한 이심률 결과에서 27~29번째 거리 성분은 JEM의 기여도가 낮으며, 전면부에 해당하는 2번째 거리 성분 또한 높은 이심률 값을 가진다. 최소 이심률 값을 통해 34번째 거리 성분이 실제 제트 엔진 위치에 해당함을 알 수 있으며, 전면부까지의 거리 성분의 개수가 32 m에 해당하는 32개이므로, 이 또한 실제 전면부-엔진 길이인 31.51 m와 부합된다.

이상의 항공기 모델에 대한 결과로부터 복소 신호 이심률의 개념을 차용하여, HRRP-JEM 영상으로부터 정량적으로 제트 엔진의 위치를 추정하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 복소 신호의 이심률 개념을 도입하여 항공기 표적의 HRRP-JEM 영상으로부터 제트 엔진의 위치를 정량적으로 추정하는 기법을 제시하였다. 기존의 정성적인 기법과는 달리, 본 논문에서 제시된 기법은 신호의 수학적 기법을 바탕으로 JEM 성분의 기여도를 정량적으로 산출하므로, 보다 신뢰성 높은 제트 엔진 위치 추정이 가능하다. 추후에는 제안된 기법을 다양한 경우에 적용하여 그 유효성을 면밀히 검토할 필요가 있으며, 이를 위해 추가로 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

1. 본 논문에서는 정지된 표적의 시뮬레이션을 수행하였으나, 실제 항공기 표적이 기동할 경우 ISAR 영상에서와 마찬가지로 도플러에 의한 위상오차로 인해 전체적인 HRRP-JEM 영상의 품질이 크게 저하될 수 있다. 참고문헌 [10]에서는 ISAR 영상에 존재하는 JEM 신호를 제거하기 전에, 표적 자체의 움직임을 엔트로피 기반의 거리 정렬 및 위상 보정으로 보상하였다. HRRP-JEM 영상 또한 움직임 보상을 통해 표적의 형태가 집중된(focused) 영상을 먼저 형성한 후 제트 엔진의 위치를 추정해야 할 것이다.
2. 유효한 HRRP-JEM 영상을 획득하기 위해서는 장착된 제트 엔진이 레이더의 관측범위 내에 들어가 있어야 한다. 비교적 넓은 범위에서 관측되는 HRRP와는 달리, JEM의 경우 통상 제트 엔진의 회전축을 기준으로 0°에서 60°의 범위에서 관측이 가능한 것으로 알려져 있다^[3]. 항공기 구조에 의해 제트 엔진이 가려짐(occluded)에 따라 관측이 불가능한 경우도 발생할 수 있다. 또한, 주어진 관측 시간 동안 항공기 표적 및 제트 엔진에 대한 지속적인 추적(continuous tracking)이 이루어져야 한다.
3. 본 논문에 제시된 항공기 모델 B의 경우, 4개의 제트 엔진을 장착하고 있으나, 비스듬한 고도 각과는 달리 방위각이 0°로 주어지므로, 모든 제트 엔진이 동일한 거리 성분에 위치하게 된다. 그러나 레이더 신호의 방위각이 일정하게 주어지면 장착된 제트 엔진이 각기 다른 거리

성분에 위치할 수 있다. 이 경우, 그림 6(b)와는 달리 2개 이상의 JEM 스펙트럼이 공존하는 HRRP-JEM 영상이 형성될 것으로 예상된다. 따라서 제트 엔진의 위치에 해당하는 거리 성분으로 판정하기 위한 한계값 또는 전체 이심률 계산 결과의 분포에서 나타나는 극소값과 실제 제트 엔진의 위치 간 관계 등과 같은 보다 정교한 거리 성분 판별기준에 대한 연구가 필요할 것이다.

본 논문에서 수행된 연구는 HRRP-JEM의 연구사례를 늘리는 한편, HRRP-JEM을 이용한 진보된 레이더 표적 인식을 촉진시킬 것으로 기대된다.

References

- [1] P. Tait, "Introduction to radar target recognition", *IET Radar, Sonar and Navigation Series* 18, 2005.
- [2] P. Tait, "Target classification for air defense radars", *IET Seminar on High Resolution Imaging and Target Classification*, London, pp. 3-16, 2006.
- [3] M. R. Bell, R. A. Grubbs, "JEM modeling and measurement for radar target identification", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 73-87, Jan. 1993.
- [4] J. H. Park, H. Lim, and N. H. Myung, "Analysis of jet engine modulation effect with extended Hilbert-Huang transform", *IET Electronics Letters*, vol. 49, no. 3, pp. 215-216, Jan. 2013.
- [5] H. Lim, N. H. Myung, "High resolution range profile-jet engine modulation analysis of aircraft models", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 25, pp. 1092-1102, 2011.
- [6] E. Ollila, "On the circularity a complex random variable", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, pp. 841-844, 2008.
- [7] A. Ahrabian, N. U. Rehman, and D. Mandic, "Bi-variate empirical mode decomposition for unbalanced real-world signals", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 20, no. 3, pp. 245-248, Mar. 2013.
- [8] X. Bai, M. Xing, F. Zhou, G. Lu, and Z. Bao, "Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical mode decomposition", *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 11, pp. 3514-3523, Nov. 2008.
- [9] L. Stankovic, V. Popovic-Bugarin and P. Radenovic, "Genetic algorithm for rigid body reconstruction after micro-Doppler removal in the radar imaging analysis", *Signal Processing*, vol. 93, pp. 1921-1932, Jan. 2013.
- [10] J. H. Jung, K. T. Kim, and S. H. Park, "Removal of JEM signal by accurate estimation of initial parameters of chirplet basis functions", *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 141, pp. 607-618, 2013.

박 지 훈

2009년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
2011년 2월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석·박 통합과정
[주 관심분야] 레이더 및 전파응용, 전자파 산란 및 영상

양 우 용

2005년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2007년 3월~현재: 삼성탈레스 레이더 전자전 체계그룹 전문연구원
2013년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 레이더 안테나 및 레이더 신호처리

배 준 우

2005년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 2007년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)
 2006년 12월~현재: 삼성탈레스 SW (ISR) 그룹 선임연구원
 [주 관심분야] 레이더 시스템, 레이더 신호/데이터 처리 등

명 로 훈

1976년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1982년 12월: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학석사)
 1986년 8월: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학박사)
 1986년 9월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수
 2006년 1월~2006년 12월: 한국전자파학회 학회장
 2004년 3월~2009년 12월: 전파탐지 특화연구센터 소장
 2008년 1월~2011년 12월: 인공위성 연구센터 소장
 [주 관심분야] 전파 예측 모델, 마이크로웨이브 공학, 안테나 및 레이더 공학, 이동 및 위성통신, EMI/EMC/EMS 등

강 성 철

1999년 2월: 명지대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월: 명지대학교 전자공학과 (공학석사)
 2007년 3월~현재: 삼성탈레스 레이더 전자전 체계그룹 전문연구원
 [주 관심분야] 레이더 시스템, 레이더 신호/데이터 처리 등