복소 EMD를 이용한 미약한 JEM의 관측 범위에서 JEM 성분의 추출

Extraction of the JEM Component in the Observation Range of Weakly Present JEM Based on Complex EMD

박지훈 · 양우용 · 배준우* · 강성철* · 김찬홍** · 명로훈

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

요 약

제트엔진 변조(Jet Engine Modulation: JEM)는 회전하는 제트엔진 터빈으로부터의 전자기 산란에 따른 레이더 신호의 주파수 변조 현상이다. JEM은 표적의 고유한 정보를 제공하여 대표적인 레이더 표적 인식 수단으로 활용되나, JEM 성분이 미약하게 존재하는 레이더 관측 범위에서는 JEM에 의한 레이더 표적 인식 성능이 저하될 수 있다. 이에 본 논문에서는 복소 신호의 경험적인 모드분리법(Complex Empirical Mode Decomposition: CEMD)를 이용하여 레이더 신호를 여러 기본성분인 고유 모드 함수(Intrinsic Mode Function: IMF)로 분리하고, 신호의 이심률을 기반으로 이들 IMF를 조합하는 근거를 제공하여 JEM 성분을 추출하는 기법을 제시한다. 다양한 신호에 대한 적용 결과를 통하여 제안된 기법이 JEM의 명확성을 개선하는 한편, JEM 해석의 유효 관측 범위를 확장시킬 수 있음을 입증하였다.

Abstract

Jet engine modulation(JEM) is a frequency modulation phenomenon of the radar signal induced by electromagnetic scattering from a rotating jet engine turbine. Although JEM can be used as a representative radar target recognition method by providing unique information on the target, its recognition performance may be degraded in the observation range of weakly present JEM. Hence, this paper presents a method for extracting the JEM component by decomposing the radar signal into intrinsic mode functions(IMFs) via complex empirical mode decomposition(CEMD) and by combining them based on signal eccentricity. Its application to various signals demonstrated that the proposed method improved the clarity of JEM analysis and could extend the effective observation range of JEM.

Key words: Complex Empirical Mode Decomposition, Jet Engine Modulation, Radar Target Recognition, Signal Eccentricity

I. 서 론

제트엔진 변조(Jet Engine Modulation: JEM)란 레이더 신호가 항공기 표적에 장착되어 회전하는 제트엔진 터빈

「본 연구는 국방과학연구소의 “공중 실험적 RTS 측정기술”과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.」

한국과학기술원 전기 및 전자공학부(Department of Electronic Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST)

*삼성탈레스(Samsung Thales Ltd.)

**국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received February 27, 2014 ; Revised April 16, 2014 ; Accepted April 22, 2014. (ID No. 20140227-026)

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

으로부터 산란되어 레이더 신호의 주파수 및 위상에 변조를 일으키는 현상으로서, 도플러 주파수가 시간에 따라 변화하는 마이크로 도플러의 특성을 갖는다^{[1][2]}. 이러한 JEM의 특성에는 제트엔진의 구조 및 회전정보가 반영되므로, 이를 통해 회전속도, 날개개수와 같은 항공기에 탑재된 제트엔진의 고유한 정보를 획득할 수 있다. 따라서 JEM은 레이더 영상이나 거리 측면도(range profile)와 같은 타 수단을 보완하는 동시에 대표적인 레이더 표적 인식의 수단으로 활용된다.

JEM은 헬리콥터 날개로부터의 산란^[3]과는 달리 회전 산란체가 여러 회전단으로 구성되며, 회전축을 기준으로 관측 가능 범위가 약 60° 내외로 제한된다^[1]는 특징이 있다. 이는 제트엔진 터빈 날개(blade)가 제트엔진의 외벽에 둘러싸인 채 흡입구(intake)의 내부에 위치하기 때문이다. (X-band 기준 10 λ 이내) 관측각(회전축과 레이더 LOS가 이루는 각도)에 따른 JEM의 강도는 외벽의 깊이, 흡입구의 직경, 회전날개의 휘어짐 정도(skewness)등에 따라 달라질 수 있다. 그러나 일반적으로 관측각이 60°보다 커지면 레이더 신호가 제트엔진의 구조에 의해 일부 차단되어 터빈날개의 움직임을 포착하기 어려우므로, JEM 성분은 제트엔진 몸체의 산란성분(이하 body 성분)에 비해 매우 약화된다. 따라서 제트엔진을 장착한 항공기가 이러한 레이더의 관측 범위 내에 위치하면 JEM에 의한 표적 인식 성능이 저하될 우려가 있다.

기존의 JEM 신호처리에 관한 연구^{[2][4]}에서는 JEM의 선 스펙트럼이 비교적 명확히 관측될 만큼 충분한 진폭을 갖는다고 가정하였다. 그러나 여기서는 JEM이 미약하게 관측되는 범위에서 JEM 성분의 최대 진폭이 body 성분의 진폭에 비해 -15 dB 이상 작은 상황을 가정한다. 이에 본 논문에서는 복소 신호의 경험적인 모드분리법(Complex Empirical Mode Decomposition: CEMD)^[5]을 통해 레이더 수신 신호를 여러 고유 모드 함수(Intrinsic Mode Function: IMF)로 분리하는 한편, 복소 신호의 이심률(eccentricity) 개념^[6]을 기반으로 JEM의 기여도가 가장 높은 IMF의 조합을 찾아냄으로써 JEM 성분을 복원한다. 이를 통해 미약한 JEM의 관측 범위에서도 JEM에 의한 표적 인식이 유효함을 입증한다. II절에서는 미약한 JEM 성분

의 정의 및 추출기법을 다루며, III절에서는 시뮬레이션 및 측정 신호를 이용하여 제안된 기법의 성능을 시험한다. VI절에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 미약한 관측 범위에서 JEM 성분의 추출기법

2.1 시뮬레이션 신호 및 미약한 JEM 성분의 정의

본 논문에서는 그림 1과 같은 제트엔진 CAD 모델 및 여러 관측각도에 대하여, 광선밀도(ray density)가 $\lambda/10$ 인 SBR(Shooting and Bouncing Rays) 전자기 시뮬레이션을 수행하여 얻은 시뮬레이션 신호^[2]를 이용한다. 시뮬레이션 변수는 레이더 주파수 10 GHz, PRF 80 kHz, 관측시간 20 ms이며, 제트엔진 자체의 움직임은 없는 상태에서 터빈을 6,000 RPM로 회전시켰다. 또한, 레이더 신호의 관측(입사)각은 10°에서 90°까지 10° 간격으로 부여하였다. JEM에 가장 큰 영향을 미치는 1단 회전단의 날개개수는 각각의 모델에 대하여 23, 17, 24, 40개로 주었다.

획득 신호로부터 미약한 JEM 성분을 정의하기 위해 2가지의 기준치, ρ 와 M 을 도입한다. 먼저 ρ 는 선 스펙트럼 간 진폭 비의 데시벨(dB) 값이며, 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = 10 \log [J/B] \quad (1)$$

여기서 B 는 제트엔진 외벽 등에서 기인한 body 성분의 진폭이며, J 는 JEM에 의한 하모닉 선 스펙트럼 중 최대 진폭을 나타낸다. ρ 값이 적을수록 JEM 성분이 body 성분에 비해 약해짐을 뜻하므로 JEM 성분의 미약한 정도를

그림 1. 항공기 제트엔진 CAD 모델 및 모델명
Fig. 1. Aircraft jet engine CAD models and their names.

그림 2. 강한 JEM 및 미약한 JEM의 경우

Fig. 2. Cases of strong JEM and weak JEM.

판별하는 직접지표가 된다. M 은 신호의 정규화 자기상관도 R 의 평균(mean)이며, 대개 R 의 하단 포락선(lower envelope) 바로 위쪽에 값이 형성되어 마치 bias처럼 관측된다. 자기상관도는 JEM 신호의 주기성 판별에 유용하게 쓰이나^[1], 주기적인 JEM 성분이 미약해지고 비주기적인 body 성분이 강해지면 자기상관도의 bias가 증가하여, 주기성이 모호해진다. 즉, 자기상관도의 평균은 전체 신호에서 비주기적인 성분의 비중을 판별하는 간접지표가 된다.

그림 2에는 Type A 모델로부터의 신호를 이용하여 강한 JEM 및 미약한 JEM의 예시를 나타내었다. 그림 2(a)는 각각 관측각이 40°, 80°인 경우의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. JEM 선 스펙트럼이 뚜렷하게 나타나는 40° 스펙트럼과는 달리, 80° 스펙트럼에서는 정지한 제트엔진

표 1. 제트엔진 모델과 관측각 별 ρ 및 M 계산 결과Table 1. Calculation results of ρ and M by the different jet engine models and observation angles.

모델	Type A		Type B		Type C		Type D	
관측각	ρ	M	ρ	M	ρ	M	ρ	M
10°	-8.2	0.94	-4.8	0.52	-0.8	0.49	-0.7	0.56
20°	-4.9	0.74	+2.7	0.42	+0.0	0.36	-4.3	0.80
30°	+6.0	0.65	+1.3	0.31	-5.9	0.75	-1.7	0.45
40°	+0.0	0.40	+0.9	0.40	-4.3	0.58	-8.0	0.93
50°	-0.1	0.35	-4.9	0.69	-10.2	0.96	-13.5	0.99
60°	-1.1	0.54	-4.0	0.71	-5.3	0.82	-15.6	0.99
70°	-7.3	0.86	-17.3	0.99	-15.8	0.99	-25.0	0.99
80°	-22.9	0.99	$-\infty$	1.00	-17.7	0.99	$-\infty$	1.00
90°	$-\infty$	1.00	$-\infty$	1.00	$-\infty$	1.00	$-\infty$	1.00

몸체에서 산란된 성분인 0 Hz의 선 스펙트럼(zero-Doppler)에 비하면 측파대의 JEM 성분을 관측하기가 힘들다.

이 때 ρ 는 두 경우 각각 -0.06 dB, -22.9 dB로서, 80°에서 JEM 성분이 매우 미약함을 알 수 있다. 그림 2(b)는 각 관측각에 대한 정규화 자기상관도를 나타낸다. 40° 신호의 경우, JEM 특유의 주기성이 명확하게 관측되나, 80° 신호의 경우 비주기 성분의 높은 비중으로 인하여 자기상관도의 평균이 1에 근접해질 뿐 아니라, 주기성 또한 모호하다. 표 1에는 제트엔진 모델 및 관측각 별 ρ 와 M 의 계산 결과를 정리하였다. 굵은 선으로 표시한 바와 같이 대체적으로 60° 내외에서 유효한 JEM이 관측됨을 알 수 있으며, 그 이후의 관측각에서는 ρ 가 -15 dB 이하로 저하되고 M 값이 1에 가까워진다. ρ 가 $-\infty$ dB인 경우(관측각 90° 부근), 레이더 신호가 제트엔진의 외벽에 모두 차단되어 터빈에 의한 산란이 일어나지 않은 것으로 판단할 수 있다. 그 외의 미약한 JEM의 관측 범위에서는 신호 자체로는 명확한 JEM 해석이 어려우며, 유효한 JEM 성분만을 추출함으로써 JEM의 표적 인식 성능 향상을 기할 필요가 있다.

2-2 복소 신호의 이심률 개념

복소 신호의 이심률이란 직각 위상 샘플링(quadrature sampling)으로 획득한 시간범위 t 의 복소신호를 시간-실수

-허수축의 3차원 공간에 도시할 때 복소 평면의 중심축에 대한 신호의 원형 회전도(circularity)를 측정하며, 다음과 같은 통계적 수식을 통해 계산된다^[6].

$$\epsilon = \sqrt{|E[\bar{s} \cdot s^T] / E[\bar{s} \cdot s^H]|} \quad (2)$$

여기서 $\bar{s}$ 는 신호 $s(t)$ 의 벡터 형태이며, T, H 는 각각 벡터의 전치(transpose) 및 켤레(conjugate)전치이다. $E[\cdot]$ 는 기대 값, 근호 안의 분모 및 분자는 각각 공분산과 근사 공분산을 나타낸다. 이심률 ϵ 은 0부터 1의 범위를 가지며, 신호가 복소 평면의 중심축에 대해 원형으로 회전하면 0에 근접하고, 신호 회전의 중심이 중심축을 이탈하거나 신호 형태가 선형이면 1에 근접한다. JEM 성분 $s_{JEM}(t)$ 과 body 성분 $s_{body}(t)$, 이들의 합 $s(t)$ 의 개념적인 형태를 나타낸 그림 3으로부터, $s_{JEM}(t)$ 은 터빈 날개의 빠른 회전으로 인해^[7] 복소 평면의 중심축에 대해 원형의 회전 형태를 유지함을 알 수 있다. 그러나 $s_{body}(t)$ 은 표적 자체의 회전 속도가 제트엔진 터빈에 비해 매우 느리고 움직임 보상이 이루어지면 거의 정지한 것과 등가이므로^[7], 중심축에서 이탈한 선형의 형태를 갖는다. 이러한 영향으로 $s(t)$ 는 $s_{body}(t)$ 를 중심축으로 $s_{JEM}(t)$ 과 동일하게 회전하며, $s(t)$ 의 이심률은 $s_{body}(t)$ 및 $s_{JEM}(t)$ 의 이심률 사이의 값을 갖는다.

신호의 이심률 개념으로부터 신호의 회전양상(rotating behavior)이 JEM 성분과 body 성분을 구분하는 지표가 됨을 알 수 있으며, 어떤 신호에서 JEM 성분의 기여도가 클수록 해당 신호의 ϵ 값은 적을 것으로 추정할 수 있다. 이

에 본 논문에서는 미약한 JEM 성분을 추출하기 위해 원 신호를 여러 단위성분들로 분리하고, 최소의 ϵ 값을 갖도록 이들 단위성분들을 조합하는 방식으로 JEM 성분을 복원한다. 여러 가지 신호분리 기법들 중에서 본 논문에서는 입력된 신호에 따라 단위성분(기저함수)을 적응적으로 산출하는(data-driven) CEMD를 채택한다.

2-3 CEMD 및 JEM 성분의 추출

CEMD는 기존의 EMD를 복소신호에 대하여 직관적으로 확장한 개념이며, 시간-실수-허수축의 3차원 공간에서 빠르게 회전하는 순으로 신호를 구성하는 단위성분을 반복적으로 분리한다. CEMD의 절차는 다음과 같다^[5].

- ① 신호 $s(t)$ 의 $\phi_k = 2\pi k/K$, ($k = 1, \dots, K$) 방향 정사영:

$$p_{\phi_k}(t) = \text{Re}(s(t)e^{-j\phi_k}) \quad (3)$$
- ② $p_{\phi_k}(t)$ 의 극대값에 해당하는 시간위치 $\{t_j^k\}$ 추출
- ③ $\{t_j^k, s(t_j^k)\}$ 에 대한 스플라인 내삽 및 각 방향 포락선(envelope curve) $e_{\phi_k}(t)$ 획득
- ④ K 개 방향의 $e_{\phi_k}(t)$ 의 평균 $m(t)$ 산출
- ⑤ i 번째 IMF, $c_i(t)=s(t)-m(t)$ 산출 및 나머지 신호 $m(t)$ 에 대한 동일과정 반복

CEMD는 기본성분 IMF를 산출하기 위해 신호성분의 회전양상을 중요한 근거로 삼으며, 모든 복소 신호는 여러 회전성분들의 조합으로 구성되어 있음을 가정한다. 또한, IMF의 추출순서는 신호의 회전속도와 밀접한 연관을 갖는다. 이러한 CEMD의 기본 특성은 앞서 언급한 신호의 이심률 개념 및 JEM 성분의 기여도와 부합하므로, 본 논문에서 CEMD를 채택한 주요한 이유가 된다. 그림 4에는 두 개의 주파수 성분을 포함한 신호에 대한 CEMD의 추출정확도를 두 성분 간 주파수 비 f 및 진폭 비 a 를 이용하여 나타낸 그림을 참고문헌 [8]에서 참고하였다. 성분분리 가능 영역을 나타내는 검정색 부분으로부터, CEMD가 충분히 큰 주파수 거리에 대해 타 성분보다 -20 dB 가량 낮은 진폭을 갖는 미세성분도 분리할 수 있다는 것을 알 수 있다.

각각의 IMF는 신호를 구성하는 회전성분을 나타내지만 직접적으로 제트엔진의 회전 특성을 대표하지는 않는

그림 3. 신호의 이심률 개념을 위한 예시
Fig. 3. Illustration for the signal eccentricity concept.

그림 4. CEMD의 신호분리 성능

Fig. 4. Signal decomposition performance of CEMD.

그림 5. 미약한 JEM 성분을 추출하기 위한 순서도

Fig. 5. Flowchart for extracting the weak JEM component.

다. 따라서 JEM 성분의 기여도를 고려하여 빠르게 회전하는 IMF부터(추출 순서대로) 더하면서 JEM 성분을 복원한다. 이 때 $r_n(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$r_n(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) \quad (4)$$

원 신호에서 N 개의 IMF가 산출되었다고 가정하면, 1부터 N 의 범위를 갖는 정수 n 에 대해 $r_n(t)$ 또한 N 개가 산출된다. 이 때 $r_n(t)$ 는 원 신호 $s(t)$ 와 동일하며, 각각의 $r_n(t)$ 에 대해 이심률을 식 (2)에 의해 산출하여 최소의 이심률 값을 갖는 $r_n(t)$ 를 추출된 JEM 성분으로 판정한다. 그림 5에는 미약한 JEM 성분을 추출하기 위한 기법의 순서도를 요약하여 정리하였다.

III. 제안된 추출기법의 적용 및 검증

3-1 시뮬레이션 신호로의 적용 및 해석

표 2. 미약한 JEM 성분 포함 추출기법 적용대상 신호

Table 2. Signals including the weak JEM component to be applied to the extraction method.

모델	Type A	Type B	Type C	Type D
관측각	80°	70°	80°	70°
ρ	-22.86	-17.32	-17.67	-24.99
M	0.9981	0.9994	0.9980	0.9999
ϵ	0.9997	0.9996	0.9992	1.000
$r_n(t)$	$r_5(t)$	$r_2(t)$	$r_1(t)$	$r_1(t)$
ϵ'	0.1184	0.3437	0.2498	0.1537

본 절에서는 제트엔진 CAD 모델의 시뮬레이션 신호에 추출기법을 적용한다. 표 1로부터, JEM 성분이 측면 관측각에 의해 크게 약화된 경우를 각각의 제트엔진 모델에 대하여 표 2와 같이 선정하였다. 세부적인 정보표시를 위해 유효숫자를 늘렸으며, 비주기 body 성분이 차지하는 비율을 보이기 위해 신호 자체의 이심률 ϵ 을 표시하였다. 또한, CEMD 적용 후 최소 이심률을 만드는 IMF의 조합 $r_n(t)$ 및 해당 이심률 값 ϵ' 도 표시하였다.

그림 6에는 Type A 모델에 대한 추출 전후 비교결과를 자기상관도 및 STFT(Short-Time Fourier Transform) 스펙트로그램을 이용하여 나타내었다. 추출 전의 자기상관도는 그림 2(b)에서도 확인한 바와 같이 주기성이 모호하다. 그러나 추출 후의 자기상관도는 참고문헌 [1]에 제시된 자기상관도나 그림 2(b) 좌측의 40도 관측각 자기상관도에서와 같이, JEM 특유의 주기성을 명확하게 보여준다. JEM 신호의 기본 주기성이 1회전 주파수(초당 회전수, spool rate)인 100 Hz에 의해 결정되므로 자기상관도의 두드러진 스폴 첨두치(outstanding spool peak)는 10 ms마다 형성된다. 또한, 터빈의 맨 앞에 위치한 1단 회전단의 날개가 JEM에 가장 큰 영향을 미치므로, 하나의 1단 날개가 인접한 날개가 있던 위치로 이동하는 날개주기(chopping rate=1/(spool rate×1단 날개개수)=1/2.3 kHz)와 관련된 성분을 스폴 첨두치 사이의 주변 첨두치(surrounding peak)를 통해 관측 가능하다. 주변 첨두치가 뚜렷하게 형성되기 위해서는 1단 날개에 의한 레이더 신호의 변조강도가 충분해야 한다. 이러한 자기상관도로부터 스폴 첨두치 간의 시간간격(1회전 주기)을 주변 첨두치 간의 시간

(a) 자기상관도 비교(좌: 추출 전, 우: 추출 후)
(a) Auto-correlation comparison(left: before, right: after)

(b) STFT 스펙트로그램 비교(좌: 추출 전, 우: 추출 후)
(b) STFT spectrogram comparison(left: before, right: after)

그림 6. Type A 모델에 대한 추출 전후 비교, 80° 관측
Fig. 6. Comparison between before/after extraction for type A model, observed at 80°.

간격(날개주기)으로 나누어 주거나, 혹은 1회전 주기 내의 주변 침두치의 개수를 이용하여 1단 날개개수를 추정할 수 있다. 그림 6(b)의 추출 전의 신호 스펙트로그램은 강한 body 성분으로 인해 일정한 주파수 특성을 나타낸다. 반면, 추출 후의 스펙트로그램은 JEM 성분이 효과적으로 추출되어 주파수의 시변 양상을 좀 더 명확하게 보여준다.

그림 7에는 Type C 모델에 대한 추출 전후 비교결과를 나타내며, 자기상관도에서 JEM의 1회전 주기성을 나타내는 2개의 스푼 침두치 및 크기가 다른 주변 침두치가 관측된다. 그러나 그림 7(a)의 추출 후 자기상관도에 나타난 시간간격 T (1회전 주기의 1/8) 내에 위치한 주변 침두치

(a) 자기상관도 비교(좌: 추출 전, 우: 추출 후)
(a) Auto-correlation comparison(left: before, right: after)

(b) STFT 스펙트로그램 비교(좌: 추출 전, 우: 추출 후)
(b) STFT spectrogram comparison(left: before, right: after)

그림 7. Type C 모델에 대한 추출 전후 비교, 80° 관측
Fig. 7. Comparison between before/after extraction for type C model, observed at 80°.

의 개수가 불명확하다. 이는 2단 날개(43개)의 영향에 의한 것으로 추정되며, 이러한 경우 날개주기에 관한 정보를 그림 7(b)의 스펙트로그램으로부터 추가 획득하여 1단 날개개수의 추정에 이용할 수 있다.

그림 8은 Type B 및 D 모델에 대한 JEM 성분 추출 후의 자기상관도 결과를 보여준다. 그림 8 좌측의 Type B의 경우, JEM 성분 추출 후의 자기상관도에서 1회전 주기, 날개주기, 그리고 날개개수 17개를 추정할 수 있다. 그림 8 우측의 Type D의 경우, 다른 제트엔진 모델과는 달리 스푼 침두치가 1/2회전 주기마다 형성된다. 이는 Type D의 각 회전단의 날개개수가 모두 짝수이므로^[2], 모든 회전단 날개의 배치형상이 1회전이 아닌 1/2 회전마다 주기

그림 8. Type B와 D모델에 대한 추출 후의 자기상관도 결과, 70° 관측

Fig. 8. Resultant auto-correlation after extraction for type B and D model, observed at 70°.

적으로 반복되기 때문이다. 이와 같은 제트엔진의 ‘1/n 회전 대칭성’은 회전단의 날개개수들이 3을 공약수로 갖는 경우에 대해서도 확인된 바 있다^[1].

3-2 측정 신호로의 적용 및 해석

제안된 추출기법의 적용 가능성을 확인하기 위해 실험적으로 제작된 제트엔진 모델로부터 측정된 신호^[2]를 이용하였다. 측정 변수는 레이더 주파수 10 GHz, PRF 1.8 kHz이며, 관측시간 2초에 해당하는 3,600개의 샘플을 이용하였다. 레이더 신호의 관측각은 10°에서 60°까지 10° 간격으로 주었고, 제트엔진이 실험적으로 제작되었다는 점을 고려하여 회전속도는 비교적 느린 60.1 RPM으로 설정하였다. 날개개수는 1단부터 3단까지 각각 17, 29, 41개이다. 획득된 측정 신호를 검토한 결과, 제트엔진 모델의 측면에 가까운 관측각 60°에서 측정 신호의 JEM 성분이 미약해짐에 따라($\rho = -15.95$ dB, $M = 0.9823$), 이 신호를 추출기법의 적용대상으로 선정하였다.

그림 10은 측정 신호에 대한 추출 전후의 자기상관도를 나타낸다. 추출 전의 자기상관도는 높은 body 성분의 비중에 의해 전체 자기상관도의 평균이 증대되어 JEM의 주기성이 미약하게 관측된다. 그러나 추출 후의 자기상관도는 앞서 검증된 바와 같이 JEM 특유의 주기성을 뚜렷하게 보여주며, 침두치의 시간 간격을 이용하여 1회전 주기, 1단 날개개수 17개와 같은 표적 인식에 유용한 정보를 산

그림 9. 제작된 제트엔진 모델의 CAD 및 사진

Fig. 9. CAD model and photograph of the fabricated jet engine model.

그림 10. 측정 신호에 대한 추출 전후 자기상관도 비교

Fig. 10. Comparison of auto-correlation between before/after extraction for the measured signal.

출할 수 있다. 이상의 시뮬레이션 및 측정 신호로의 시험 적용을 통해 JEM 성분이 미약한 관측 범위에서도 유효한 JEM 성분의 추출 및 명료한 해석이 가능함을 보였다.

IV. 결 론

본 논문은 JEM이 미약하게 존재하는 관측 범위에서 JEM 성분을 효과적으로 추출하기 위한 기법을 제시하였다. JEM의 관측가능 범위는 통상 제트엔진 터빈의 회전축을 기준으로 60° 내외로 알려져 있어, 그 이후의 범위에 대해서는 JEM 성분이 포착되지 않거나 미약하게 존재하게 된다. 후자의 경우에 대하여 본 논문에서는 CEMD를 이용해 신호를 IMF로 분리하고, 복소 신호의 이심률 개념을 기반으로 IMF를 조합하여 JEM 성분을 추출 및

복원하였다. 다양한 신호를 이용한 검증 결과는 제안된 기법이 JEM의 표적 인식 성능을 제고할 수 있음을 입증하였다. 본 논문에서 수행된 연구는 JEM 유효관측 범위를 확장시킬 수 있을 것으로 기대되며, 추후 10° 간격의 관측각도를 세분화하여 유효 관측 범위의 확장성에 대한 정량화를 수행할 필요가 있다. 또한, JEM 성분이 항공기의 구조에 의해 약화되는 경우 및 CEMD기법의 백색잡음 취약성을 보완하기 위한 연구가 필요하다.

References

- [1] M. R. Bell, R. A. Grubbs, "JEM modeling and measurement for radar target identification", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 29, no. 1, pp. 73-87, Jan. 1993.
- [2] H. Lim, J. H. Park, J. H. Yoo, C. H. Kim, K. I. Kwon, and N. H. Myung, "Joint time-frequency analysis of radar micro-Doppler signatures from aircraft engine models", *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, vol. 25, pp. 1069-1080, 2011.
- [3] T. Thayaparan, S. Abrol, E. Riseborough, L. Stankovic, D. Lamothe, and G. Duff, "Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data", *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 1, no. 4, pp. 289-299, Aug. 2007.
- [4] J. H. Park, H. Lim, and N. H. Myung, "Analysis of jet engine modulation effect with extended Hilbert-Huang transform", *IET Electron. Lett.*, vol. 49, no. 1, pp. 215-216, Jan. 2013.
- [5] G. Rilling, P. Flandrin, P. Goncalves, and J. Lilly, "Bivariate empirical mode decomposition", *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 14, pp. 936-939, Dec. 2007.
- [6] A. Ahrabian, N. Rehman, and D. Mandic, "Bivariate empirical mode decomposition for unbalanced real-world signals", *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 20, pp. 245-248, Mar. 2013.
- [7] Q. Zhang, T. S. Yeo, H. S. Tan and Y. Luo, "Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, pp. 291-299, Jan. 2008.
- [8] G. Rilling, P. Flandrin, "One or two frequencies? The empirical mode decomposition answers", *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, pp. 85-95, Jan. 2008.

박 지 훈

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

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

김 찬 홍

1991년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2008년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1993년~현재: 국방과학연구소 책임연구원
 [주 관심분야] 레이더 및 SAR 시스템 설계/분석, 위상배열 안테나 설계/분석, 안테나 측정, 전자장 수치해석, 안테나 신호처리 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

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: 한국전자과학회 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