

약한 제트 엔진 변조 신호의 Spool Rate 추출을 위한 High-Pass Filtering 기반의 빠른 전처리 기법

Fast Preprocessing Technique based on High-Pass Filtering for Spool Rate Extraction of Weak JEM Signals

송원영 · 김형주 · 김성태* · 신인선* · 명로훈

Won-Young Song · Hyung-Ju Kim · Sung-Tai Kim* · In-Seon Shin* · Noh-Hoon Myung

요 약

제트 엔진 변조(jet engine modulation: JEM) 신호는 제트 엔진 고유의 정보를 제공하기 때문에 표적 인식 분야에서 널리 이용된다. JEM 신호의 고유 정보인 날개 수를 얻기 위해서는 날개의 회전 속도, spool rate를 추출하는 것이 중요하다. 하지만 약한 JEM 신호에서는 회전 속도를 추출하는데 어려움을 겪는다. 이에 본 논문에서는 약한 JEM 신호에서 spool rate를 추출하는 알고리즘을 제안한다. 우선 JEM 신호에서 spool rate를 추출하기 위해서 JEM 신호 성분의 강약을 구분하는 기준을 정하여 신호를 구분한다. 그 중 약한 신호를 high-pass filtering 기반의 전처리 과정을 거쳐 spool rate 추출에 용이하도록 신호를 변형해준다. Spool rate를 추출할 수 있는 신호를 얻고 난 후, peak detection 과정을 통하여 spool peak를 찾고, spool period/rate를 추출한다. 기존의 CEMD(Complex Empirical Mode Decomposition), WD(Wavelet Decomposition)와 같은 방법보다 간단하기 때문에, 추출을 정확하게 할 뿐만 아니라 시간을 매우 절약할 수 있음을 입증하였다.

Abstract

Jet engine modulation(JEM) signals are widely used for target recognition. These signals coming from a potentially hostile aircraft provide specific information about the jet engine. In order to obtain the number of blades, which is uniquely provided by the JEM signal, one must extract the spool rate, which is the rotation speed of the blades. In this paper, we propose an algorithm to extract the spool rate from a weak JEM signal. A criterion is developed to extract the spool rate from the JEM signal by analyzing the intensity of the JEM signal component. The weak signal is first subjected to a high-pass filtering-based process, which modifies it to facilitate spool rate extraction. We then apply a peak detection process and extract the spool rate. The technique is simpler than the existing CEMD or WD method, is accurate, and greatly reduces the time required.

Key words: High-Pass Filtering, Spool Rate Extraction, Weak JEM Signal, Radar Target Recognition

I. 서 론

Radar target recognition 분야에서는 널리 이용하는 영

「이 논문은 2018년도 한화시스템(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.」
한국과학기술원 전기 및 전자공학부(School of Electrical Engineering, KAIST)

*한화시스템(Hanwha Systems Co., Ltd.)

· Manuscript received January 24, 2019 ; Revised April 1, 2019 ; Accepted April 2, 2019. (ID No. 20190124-010)

· Corresponding Author: Won-Young Song (e-mail: songwonyoung@kaist.ac.kr)

상으로는 크게 세 가지가 있다. HRRP(High-Range Resolution Profile), ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar), JEM(Jet Engine Modulation)이며, HRRP는 표적의 1차원적인 반사도 분표를 말하며, ISAR는 HRRP에 추가적으로 LOS 방향에 수직인 cross-range 성분을 획득하여 표적의 반사도를 2차원 영상으로 나타낸 것을 의미한다^[1]. 이 논문에서는 다뤄질 마지막 JEM 신호는 표적 전체가 아닌 표적에 존재하는 제트 엔진에 의해 변조된 신호이며, 표적의 엔진에 대한 정보를 제공함으로써 표적 인식에 도움을 준다.

JEM 신호에 대한 연구는 이전에도 많이 진행되었다^{[2]~[8]}. JEM 신호 처리 알고리즘은 크게 두 가지 과정으로 나뉘게 된다. 첫 번째로, 날개 회전 속도에 관한 변수인 spool rate를 추출하게 된다. 여기서 spool period는 날개가 한 바퀴 회전하는데 걸리는 시간을 말하며 spool rate는 그의 역수로 RPS(revolutions for second)와 동일한 의미이다. Spool period를 추출하고 나면 다음으로 날개 수를 추출하게 된다. 이 때 spool period가 중요한 역할을 수행하게 된다. 따라서, spool period/rate 추출이 매우 중요하다.

하지만 이러한 JEM 신호는 경우에 따라 변조된 신호보다 zero-Doppler 성분의 크기가 매우 커서 spool period/rate를 추출하는데 어려움을 겪는다. 기존에 이를 해결하기 위하여 CEMD(Complex Empirical Mode Decomposition)^{[6][7]}, WD(Wavelet Decomposition)^[8] 기법을 이용하여 spool rate를 추출하기 용이하게 신호를 변형해주는 전처리 과정에 대한 연구가 수행되었다. CEMD 알고리즘은 원신호를 여러 개의 기본 모드 함수로 순차적으로 분리를 한다. 순차적으로 분리된 기본 모드 함수들의 조합 신호들 중 원하는 신호를 선택하게 된다. Spool period/rate 추출에서는 조합 신호들 중 자기상관도(autocorrelation) 함수의 평균값이 가장 낮은 신호를 선택하여 이를 spool period/rate 추출에 이용한다. WD 알고리즘은 CEMD 알고리즘과는 달리 wavelet 함수 기반으로 분리한 후, 조합 신호 중 추출에 용이한 신호를 선택한다. 이러한 알고리즘들은 JEM 신호를 전처리하여 spool period/rate 추출의 정확도를 향상하지만, 반복이 필요한 부분이 있어 경우에 따라 많은 시간이 소요된다. 비협조적 표적인식(non-cooperative target recognition: NCTR) 분야에서는 적기를 빠르게 판별하는 것이 중요하므로, 본 논문에서는 이러한 시간 소모를 줄이

기 위한 알고리즘을 제안하도록 한다.

제안하는 알고리즘은 크게 두 가지로 이루어져 있다. 첫 번째로 JEM 신호의 강약을 구분하는 기준을 정하는 것이다. 일반적으로 강한 JEM 신호의 자기상관도 함수를 보면 그 평균값이 매우 작고, 약할수록 그 값이 매우 크다는 점이다. 따라서, 이 평균값을 기준으로 삼아 약한 신호와 강한 신호를 구분하도록 한다. 두 번째로 약한 JEM 신호일 때 high-pass filtering을 하여 spool rate 추출에 용이한 신호로 변형해주는 것이다. High-pass filtering 과정은 앞서 설명한 것처럼 약한 신호는 zero-Doppler 성분이 매우 커서 상대적으로 JEM 신호가 작은 경우이므로, zero-Doppler 성분을 제거하기 위해 high-pass filter를 적용하는 것이다.

II. Spool Rate 추출 알고리즘

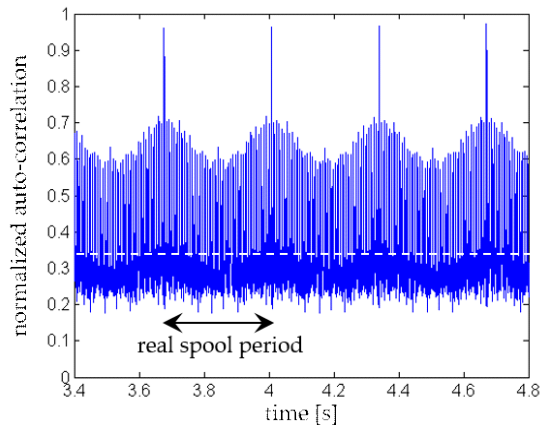
서론에서 말한 것과 같이 기존의 CEMD 알고리즘과 WD 알고리즘은 약한 JEM 신호에 대해서 전처리과정을 통해 정확한 spool rate를 추출한다. 하지만 이는 많은 시간을 필요로 하므로 이를 해결하기 위하여 새로운 알고리즘을 제시한다.

2-1 JEM 신호 구분

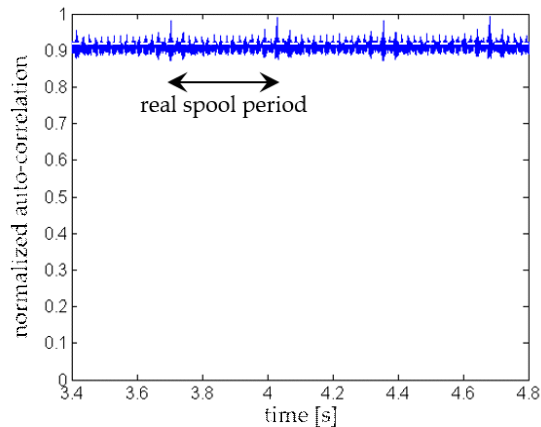
기존의 알고리즘들은 모든 JEM 신호에 대해서 수행하게 되고, 이에 따라 전처리 과정이 필요가 없는 경우에는 시간적으로 손해를 보게 된다. 따라서, 이러한 손해를 보지 않기 위하여, 강한 JEM 신호와 약한 JEM 신호를 구분하는 기준이 필요하게 된다.

JEM 신호의 구분 기준은 신호의 자기상관도 값을 이용하여 정하게 된다. 그림 1은 강한 신호와 약한 신호의 한 예로, 각각의 자기상관도 값을 나타낸 것이다. 그림 1에서 보는 것과 같이, 강한 JEM 신호의 경우에는 자기상관도 함수의 평균값이 작은 값을 가지지만, 약한 JEM 신호의 경우에는 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

따라서, 자기상관도 함수의 평균값을 이용하면 JEM 신호가 강한 경우, 약한 경우로 각각 분리할 수 있다. 하지만, 정량적인 구분 기준이 필요하고, 이는 보유 중인 JEM 신호를 이용하여 구분한다. 그림 2는 보유 중인 모든 JEM 신호의 자기상관도 함수의 평균값의 histogram이며, 아무



(a) 강한 JEM 신호
(a) Strong JEM signal

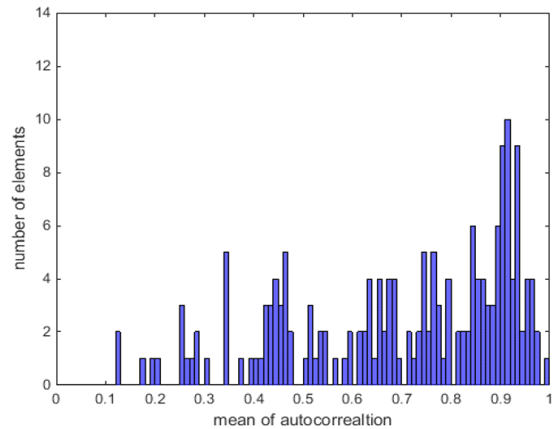


(b) 약한 JEM 신호
(b) Weak JEM signal

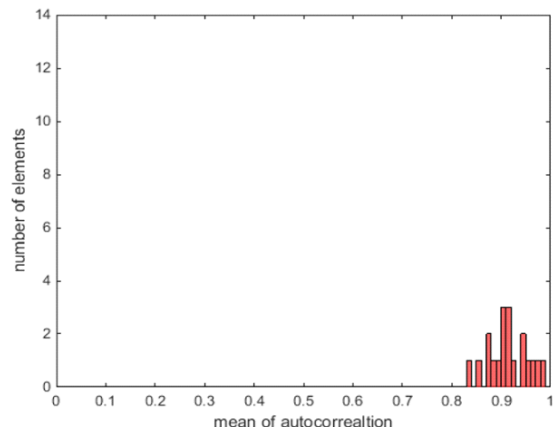
그림 1. JEM 신호의 자기상관도
Fig. 1. Autocorrelation of JEM signals.

런 전처리 없이 peak detection 알고리즘을 이용하여 추출하였을 때, 정확히 찾는 경우와 찾지 못하는 경우를 분리하여 나타내었다.

정확한 spool rate를 찾지 못하는 경우에는 모두 평균값이 큰 경우임을 알 수 있고, 그 값은 모두 0.8 이상임을 알 수 있다. 물론, 0.8 이상의 값을 가짐에도 잘 찾는 경우가 존재하지만, 정확한 값을 찾지 못하는 경우에 대한 전처리 과정을 하기 위함으므로, 구분 기준을 잘 찾지 못하는 경우가 다 포함되도록 설정한다. 본 연구에서는 잘 찾지 못하는 모든 경우를 모두 포함하며, 구분 기준을 0.8보다 작



(a) 정확한 spool rate 추출
(a) Correct spool rate extraction



(b) 잘못된 spool rate 추출
(b) Incorrect spool rate extraction

그림 2. 자기상관도 평균값의 histogram
Fig. 2. Histograms of mean of autocorrelation.

은 값인 0.75로 마진을 두어, 안정성을 더 높이도록 한다.

2-2 제안하는 추출 알고리즘

기존의 spool rate 추출 알고리즘이 비교적 복잡하고 소요 시간을 어느 정도 보장해 주어야 하는 단점을 가지고 있다. 하지만 군사 목적의 비협조적 표적인식을 위해서는 이러한 신호처리 시간이 짧아서 실시간으로 적기를 판별할 수 있어야 한다. 따라서, 알고리즘을 단순화하여 처리 시간을 줄여야 하는 필요성이 존재하고, 이를 위해 새로운 알고리즘을 제시한다. 제안하는 알고리즘의 흐름도는

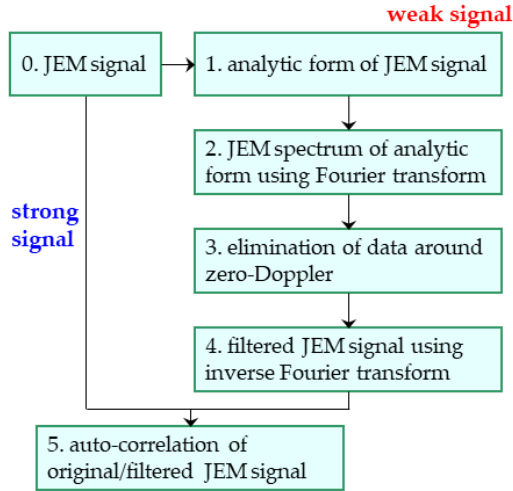


그림 3. 제안하는 알고리즘의 흐름도
Fig. 3. Flowchart of the proposed algorithm.

그림 3과 같다.

JEM 신호를 우선 앞에서 설명한 것과 같이 강한 신호와 약한 신호로 구분한다. 만약 기준보다 낮은 자기상관도 평균값을 가지고 있어 강한 신호로 분류가 되면 전처리 과정없이 peak 탐지 과정을 거치게 되고, 약한 신호로 분류가 되면 high-pass filtering 기반의 전처리 과정을 거치게 된다.

약한 JEM 신호의 경우, 그 신호를 analytic form으로 변환한다. Analytic 신호는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

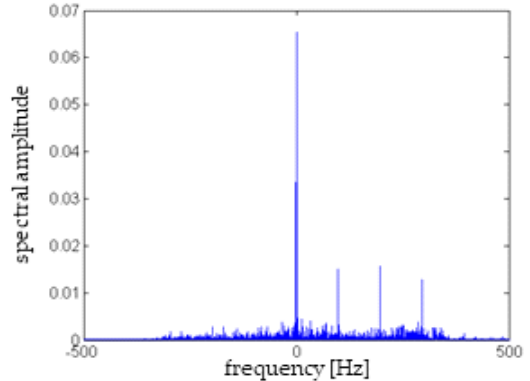
$$s_a(t) = \text{Re}(s(t)) - H[\text{Im}(s(t))] + j\{H[\text{Re}(s(t))] + \text{Im}(s(t))\} \quad (1)$$

Analytic 신호는 그림 4에서 보는 것과 같이 양의 주파수만을 고려하여 주파수 구성 성분이 복잡한 원신호의 신호성분 구성을 좀 더 단순화 시키는 한편, spool 선 스펙트럼의 진폭을 증폭시키는 효과를 가진다.

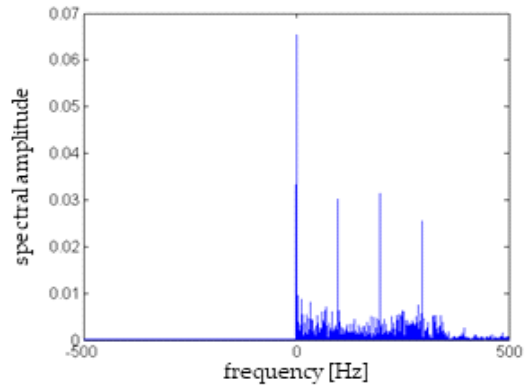
Analytic 신호로 변형해 준 다음, 상대적으로 강한 zero-Doppler 신호를 제거하기 위하여 high-pass filtering 과정을 거치게 된다. High-pass filtering 식은 다음과 같다.

$$S_{filter}(f) = S_a(f) \times w(f) \quad (2)$$

$$w(f) = \begin{cases} 0, & f < f_c \\ 1 & f \geq f_c \end{cases} \quad (3)$$



(a) 주파수 축 JEM 신호
(a) JEM spectrum

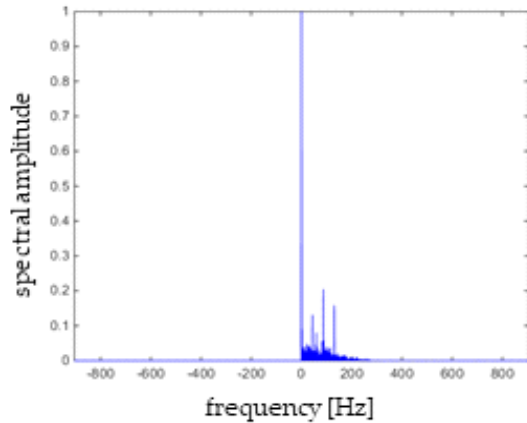


(b) 주파수 축 analytic 신호
(b) Spectrum of the analytic signal

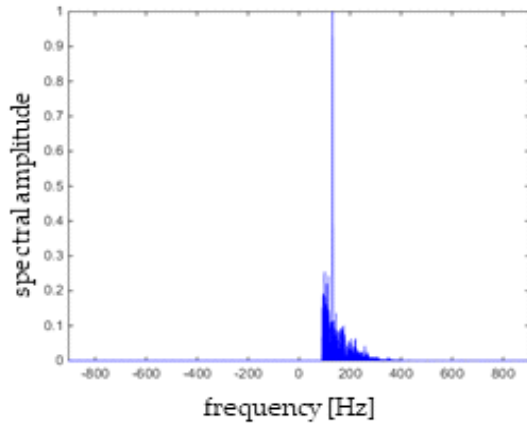
그림 4. JEM 신호 및 analytic 신호의 스펙트럼
Fig. 4. Spectrum of JEM signal and analytic signal.

$S_a(f)$ 는 analytic 신호를 푸리에 변환(Fourier transform)하여 얻은 주파수 축 analytic 신호이며, $w(f)$ 는 filtering에 사용하는 window 함수이다. 이때, cut-off frequency, f_c 는 filtering 후 선택된 고주파 성분들의 energy가 전체 신호 energy의 80%에 해당하도록 한다. 그림 5는 80% energy의 조건으로 filtering한 후의 스펙트럼이다.

그림 5(a)에서 보는 것과 같이 약한 JEM 신호는 zero-Doppler에서의 신호 크기가 매우 크기 때문에 상대적으로 JEM 성분의 크기가 작고 이로 인해 자기상관도 함수의 평균값이 크다. 하지만 그림 5(b)에서 보는 것과 같이, 이러한 zero-Doppler 신호를 high-pass filter를 이용하여 제거하였기 때문에 기존 신호에 비해 JEM 성분이 더 강하게



(a) Filtering 전 표준화된 스펙트럼
(a) Normalized spectrum before filtering



(b) Filtering 후 표준화된 스펙트럼
(b) Normalized spectrum after filtering

그림 5. Filtering 전후의 normalized 스펙트럼
Fig. 5. Normalized spectrum before filtering and after filtering.

나타나고, 또한 자기상관도 함수의 평균값도 낮출 수 있다.

최종적으로, high-pass filtering을 거친 신호에 inverse Fourier transform을 적용하여 spool rate 추정을 위한 시간 축 JEM 신호를 획득한다. 이후, peak 탐지 과정을 거쳐서 spool period와 spool rate를 추출한다.

III. 실험 결과

그림 6과 같이 실제 제작한 제트 엔진에서 획득한 JEM 신호에 제안하는 spool rate 추출을 위한 전처리 기법을



그림 6. 제작된 제트 엔진 모델
Fig. 6. Fabricated jet engine model.

적용하여 기존 CEMD, WD 기법들과 비교하여 검증하도록 한다. 제트엔진 모델과 측정 파라미터는 표 1과 같다.

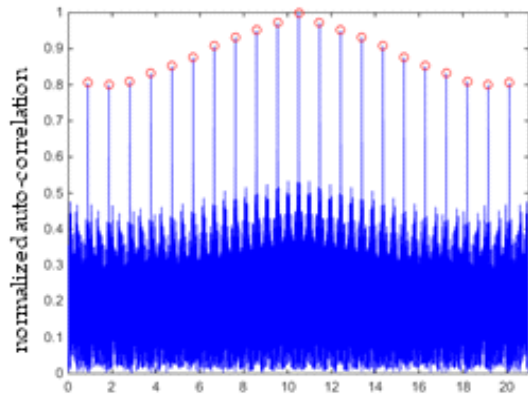
표 1에서 보인 것과 같이 두 가지 제트 엔진 모델에 대하여 신호를 획득하였다. 두 가지 신호에서 큰 차이는 표에서 보는 것과 같이 각 모델의 날개 수, RPM(Revolutions Per Minute), 입사 각도로, spool rate와 가장 연관성이 있는 파라미터는 RPM(Revolutions Per Minute)이다. Spool rate는 엔진의 회전 속도에 관한 값이므로 날개 수나 입사 각도에 대해서는 그 값이 변하지 않는다.

그림 7과 그림 8은 각각의 신호에 대해 기존 CEMD 알고리즘, WD 알고리즘과 제안하는 알고리즘을 통해서 전처리 과정을 수행한 후 자기상관도 함수에서 spool rate와

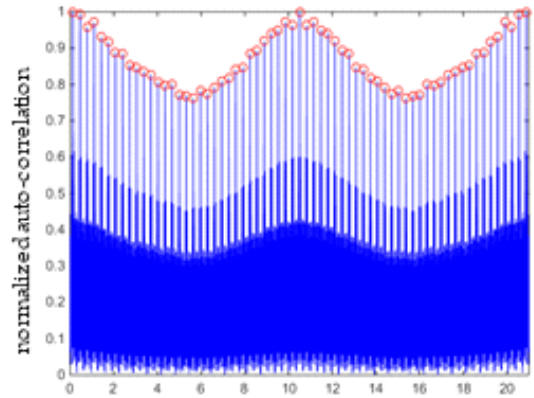
표 1. 제트 엔진 모델 및 측정 파라미터 정보

Table 1. Information on the jet engine model and measurement parameters.

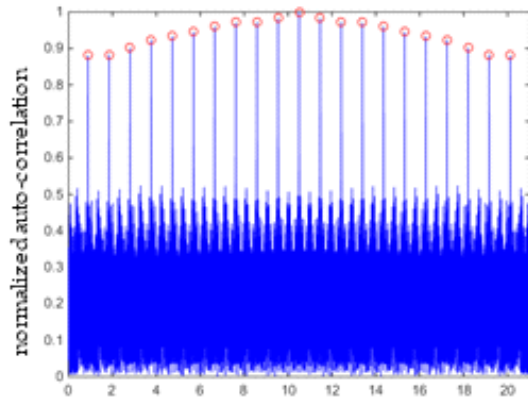
Parameters	Value	
	A	B
Engine model	A	B
Number of rotor stages	3	3
Number of blades in each stage	42, 73, 97	17, 29, 41
Radar carrier frequency	10 GHz	10 GHz
Pulse repetition frequency (PRF)	1.8 kHz	1.8 kHz
Rotation speeds	60.1	180.7
Radar incident angle	30°	60°



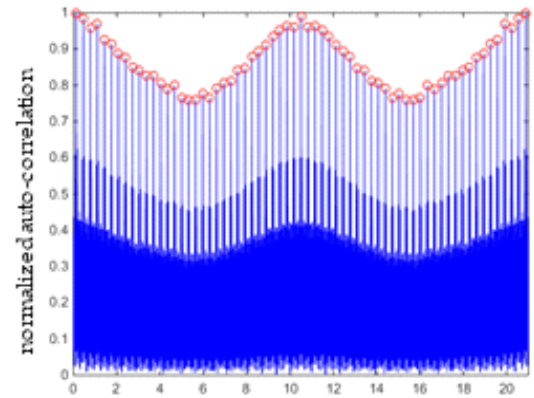
(a) CEMD



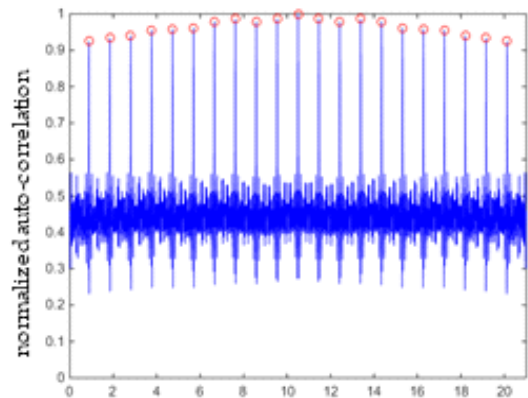
(a) CEMD



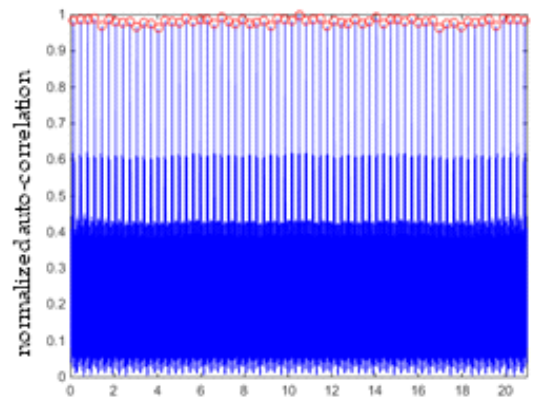
(b) WD



(b) WD



(c) 제안하는 알고리즘
(c) Proposed algorithm



(c) 제안하는 알고리즘
(c) Proposed algorithm

그림 7. Spool peak 탐지 결과 - 모델 A
Fig. 7. Results of spool peak detection - model A.

그림 8. Spool peak 탐지 결과 - 모델 B
Fig. 8. Results of spool peak detection - model B.

관련 있는 spool peak들을 찾은 결과를 나타낸다.

기존의 기법들과 제안하는 기법을 비교하여 보았을 때, 그림 7과 그림 8에서 보는 것과 같이 전처리 후의 신호의 자기상관도 함수는 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만, 추출하고자 하는 spool rate는 자기상관도 함수 모양과는 별개로 spool peak들의 간격이 중요한 값이기 때문에 모양이 달라짐에 대해서는 큰 문제가 발생하지 않는다.

탐지한 peak들을 이용하여 각각에 대해 spool rate를 구하여 보면 표 2와 같게 나타난다. Spool rate는 RPS, 즉 RPM/60과 동일한 값을 가지므로, 측정 신호의 경우 spool rate는 각각 1.0017, 3.0117 [Hz]이 된다. 기존의 기법들과 제안하는 방법을 비교하여 보았을 때, 모델 A에 대해서는 세 기법 모두 3.76 %의 오차를 가지고 추출되는 것을 알 수 있다. 또한 모델 B에 대해서는 각각 2.30 %, 2.30 %, 2.47 %의 오차를 가지고 추출되는 것을 알 수 있다.

세 기법 모두 정확한 spool rate를 추출한다는 점은 동일하지만, 계산 시간에서 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 표 3은 각 기법에 대한 계산 시간을 말하는 것으로 모델 A와 모델 B에 대해서 모두 제안하는 방법이 기존의 기법들에 비해 매우 감소하는 것을 알 수 있다. 기존 기법들의 경우, 모델 A와 B의 소요 시간이 다른 것을 알 수 있는데, 이는 각 신호의 시간 샘플의 수가 약 13만 개, 20만 개이기 때문에 모델 B의 경우 더 오래 걸리게 된다. 하지만 제안하는 알고리즘의 경우에는 간단한 high-pass

표 2. Spool rate 추출 결과

Table 2. Spool rate extraction result.

Model	Spool rate [Hz]			
	Real	CEMD	WD	Proposed
A	1.0017	1.0393	1.0393	1.0393
B	3.0117	3.0808	3.0808	3.0861

표 3. 전처리 과정 소요 시간

Table 3. Processing time of pre-processing.

Model	Processing time [sec]		
	CEMD	WD	Proposed
A	1.3387	1.4528	0.0279
B	2.9303	2.3440	0.0203

표 4. 전처리 과정 소요 시간

Table 4. Processing time of pre-processing.

	Processing time [sec]		
	CEMD	WD	Proposed
Average	1.89	1.93	0.031

filtering이므로 이러한 샘플 수 차이에는 시간적으로 큰 차이를 보이지 않는다.

보유 중인 모든 약한 JEM 신호에 대해 계산 시간을 비교하였을 때, 그 결과는 표 4와 같다. 표 4에서 보이는 것과 같이 제안하는 방법이 기존 CEMD, WD 기법에 비해 약 1/60의 시간을 필요로 하는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 JEM 신호에서 spool rate를 추출하는 알고리즘을 제시하였다. JEM 신호의 자기상관도 함수의 평균값을 구하여 제트 엔진에 의해 변조된 성분의 강약을 구분하였고, 상대적으로 약한 경우에 대하여 high-pass filtering 기법을 적용하여 전처리를 함으로써 정확한 spool rate 추출이 가능하게 하였다. 본 논문에서 제안하는 방법을 실제 측정 신호에 적용하여 spool rate를 추출하였을 때 빠르면서 정확도는 유지하는 것을 확인하였다. 따라서, 제안하는 알고리즘은 실시간으로 표적을 인식해야 하는 비협조적 표적인식 분야에서 매우 중요한 역할을 할 수 있다.

References

- [1] P. Tait, *Introduction to Radar Target Recognition*, London, The Institution of Engineering and Technology, 2005.
- [2] M. R. Bell, R. A. Grubbs, "JEM modeling and measurement for radar target identification," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 73-87, Jan. 1993.
- [3] S. Cuomo, P. F. Pellegrini, and E. Piazza, "Model validation for 'jet engine modulation' phenomenon," *Electronics Letters*, vol. 30, no. 24, pp. 2073-2074, 1994.
- [4] H. Lim, J. H. Yoo, C. H. Kim, K. I. Kwon, and N. H.

Myung, "Radar cross section measurement of a realistic jet engine structure with rotating parts," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 25, no. 7, pp. 999-1008, 2011.

[5] J. H. Park, H. Lim, and N. H. Myung, "Analysis of jet engine modulation effect with extended Hilbert-Huang transform," *Electronics Letters*, vol. 49, no. 3, pp. 215-216, 2013.

[6] J. H. Park, W. Y. Yang, J. W. Bae, S. C. Kang, C. H. Kim, and N. H. Myung, "Extraction of jet engine modulation component weakly present in measured signals for enhanced radar target recognition," *Journal of Electro-*

magnetic Waves and Applications, vol. 28, pp. 963-975, 2014.

[7] 박지훈, 양우용, 배준우, 강성철, 김찬홍, 명로훈, "복소 EMD를 이용한 미약한 JEM의 관측 범위에서 JEM 성분의 추출," *한국전자파학회논문지*, 25(6), pp. 700-708, 2014년 6월.

[8] W. Y. Yang, J. H. Park, W. Y. Song, and N. H. Myung, "Robust and fast algorithm for estimating fundamental periodicity of jet engine modulation signals," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 10, no. 7, pp. 1286-1294, Aug. 2016.

송 원 영 [한국과학기술원/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1159-0571>



2008년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학사)
 2008년 9월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석·박사 통합과정
 [주 관심분야] 전자파 산란 및 영상, 레이다 신호처리

김 성 태 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9354-1807>



1996년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)
 2002년 8월~현재: 한화시스템(주) 레이다·PGM연구소 연구원
 [주 관심분야] 레이다 신호처리, 레이다 시스템

김 형 주 [한국전자통신연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3593-4113>



2010년 2월: 경북대학교 전기 및 전자공학과 (공학사)
 2012년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학석사)
 2018년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학박사)
 2018 12월~현재: 한국전자통신연구원
 [주 관심분야] 전자파 산란 및 영상, 레이다 신호처리

다 신호처리

신 인 선 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8135-2387>



2014년 8월: 한국해양대학교 제어자동화공학과 (공학사)
 2016년 8월: 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학석사)
 2016년 7월~현재: 한화시스템 항공레이다팀
 [주 관심분야] NCTR, Avionics Interface, System Engineering

명 로 훈 [한국과학기술원/명예교수]

<https://orcid.org/0000-0002-6161-3287>



1976년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1982년 12월: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학석사)

1986년 8월: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학박사)

2006년 1월~2006년 12월: 한국전자과학회 학회장

2004년 3월~2009년 12월: 전파탐지 특화연구센터 소장

2008년 1월~2011년 12월: 인공위성 연구센터 소장

1986년 9월~2019년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 교수

2019년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 명예교수
[주 관심분야] 전파 예측 모델, 마이크로웨이브 공학, 안테나 및 레이더 공학, 이동 및 위성통신, EMI/EMC/EMS 등