

표적 식별 성능 향상을 위한 EMD를 이용한 HRRP의 잡음 제거 기법

De-Noising of HRRP Using EMD for Improvement of Target Identification Performance

박준용 · 이승재* · 양은정 · 김경태*

Joon-Yong Park · Seung-Jae Lee* · Eunjung Yang · Kyung-Tae Kim*

요 약

본 논문에서는 레이다 표적식별 성능을 향상시키기 위하여 고해상도 거리측면도(High Resolution Range Profile: HRRP)에 포함된 잡음을 효과적으로 제거하는 방법을 제안한다. 제안된 기법은 HRRP에 포함된 잡음의 통계적인 특성과 EMD(Empirical Mode Decomposition) 알고리즘을 이용하여 HRRP에 포함된 잡음을 효과적으로 제거한다. 잡음 제거 실험 결과에서는, 본 논문에서 제안한 기법이 잡음을 효과적으로 제거하면서, 표적 식별 성능을 크게 향상시키는 것을 수치적으로 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, we propose an efficient method to remove noise component contained in high resolution range profile(HRRP) to improve target identification performance. The proposed method can effectively eliminate the noise component using both the statistical characteristics of the noise component and EMD algorithm. Experimental results show that the proposed method can substantially improve the identification capability, removing the noise component effectively.

Key words: De-Noising, EMD, HRRP, Target Identification

I. 서 론

고해상도 거리 측면도(High Resolution Range Profile: HRRP)^[1]는 표적의 전자기적 산란 분포를 레이다 가시선(Radar Line of Sight: RLOS) 방향으로 도시하는 1차원 레이다 영상이다. HRRP는 2차원 레이다 영상인 ISAR 영상에 비하여 실시간으로 획득이 가능하지만, 이를 이용한 표적식별 연구들은 비교적 잡음에 취약한 식별결과를 보였다. 따라서 잡음으로 인한 식별 성능의 저하를 막기 위

해서는 HRRP에 포함된 잡음을 사전에 제거하는 방법이 필요하다. 하지만 HRRP에 포함된 잡음을 제거하는 연구는 표적의 각도 변화가 미세한 경우나 기상 레이다와 같은 매우 제한적인 경우에 대해서만 연구^{[2],[3]}가 이루어지는 등 실질적으로 연구가 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 잡음으로 인한 식별기의 성능 저하를 막기 위해서 HRRP에 포함된 잡음을 효과적으로 제거하는 전처리(pre-processing) 방법^[4]를 제안한다.

잡음 제거 기법은 크게 필터를 이용한 방법, 웨이블릿

「이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 레이더/IR 표적식별 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었음.」

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

*포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electrical Engineering, POSTECH)

· Manuscript received February 14, 2017 ; Revised March 20, 2017 ; Accepted April 11, 2017. (ID No. 20170214-012)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

을 이용한 방법 그리고 empirical mode decomposition (EMD)^[5]를 이용한 방법으로 구분할 수 있다. 그러나 앞서의 두 가지 방법은 매우 제한적인 측면이 있다. 먼저 필터를 이용할 경우, 잡음이 분포하는 주파수 대역을 사전에 알아야 한다는 점에서 그 한계가 있고, 웨이블릿을 이용한 방법의 경우, 입력 신호를 분해하는 기저함수(basis function)를 사용자가 결정해야 한다는 점에서 그 한계가 있다. 반면, EMD를 이용한 기법의 경우, 잡음의 분포를 사용자가 사전에 알 필요가 없으며, 기저함수 또한 순수하게 입력신호에 의해서 결정되는 등 잡음 제거에 유용한 특성을 지니고 있다. 따라서 본 논문에서는 EMD 잡음 제거 기법을 기반으로 HRRP에 포함된 잡음을 효과적으로 제거하는 방법을 제안한다.

II. EMD를 이용한 HRRP의 잡음 제거 기법

2-1 Empirical Mode Decomposition(EMD)

EMD^[5]는 신호를 분해하는 기법으로서, 입력신호 $x(t)$ 를 intrinsic mode function(IMF)라 불리는 기저함수들과 그 나머지 성분인 residue로 분해하는 기법이다. EMD가 가진 특징 중 중요한 두 가지는 IMF 성분들이 입력 신호 $x(t)$ 에 의해서 결정이 된다는 것과 IMF 성분들이 마치 입력 신호 $x(t)$ 에 대한 filter bank처럼 동작^[6]한다는 점이다.

EMD가 입력신호 $x(t)$ 를 분해하는 방법은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) $x(t)$ 의 모든 극값들을 찾는다.
- 2) 1)에서 찾은 극대값과 극소값들에 대해 각각 보간법을 적용(cubic spline 권장^[5])하여 $c_{\max}(t)$ 와 $c_{\min}(t)$ 를 구한다.
- 3) $c_{\max}(t)$ 와 $c_{\min}(t)$ 에 대해 평균을 취하여 $m_{10}(t)$ 를 얻는다. $m_{10}(t) = \{c_{\max}(t) + c_{\min}(t)\}/2$
- 4) 잠재적인 IMF 성분인 $h_{10}(t) = x(t) - m_{10}(t)$ 을 구한다.
- 5) 1)~4)의 과정을 k 번 반복하여 $h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1(k-1)}(t)$ 을 구한다.

- 6) $\sum_{t=-\infty}^{\infty} \frac{|h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} < 0.4$ 를 만족하는 $h_{1k}(t)$ 을 첫 번째 차수의 IMF 성분 $c_1(t) = h_{1k}(t)$ 으로 결정한다.
- 7) 새로운 입력 $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ 에 대하여 1)~6)의 과정을 반복하여 다음 차수의 IMF 성분을 결정한다.
- 8) N 번째 입력 $r_N(t) = r_{N-1}(t) - c_N(t)$ 의 극값이 2개 이하라면 알고리즘을 종료한다.

상기의 EMD 알고리즘에 따라 입력 신호 $x(t)$ 를 분해하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = \sum_{i=1}^N c_i(t) + r_N(t) \quad (1)$$

입력신호 $x(t)$ 와 EMD를 이용하여 $x(t)$ 를 분해한 결과는 각각 그림 1과 그림 2에 도시되어 있다. i 번째 차수의 IMF 성분인 $c_i(t)$ 를 결정하는 1)~7)의 과정을 sifting이라고 하며, 각각의 IMF는 평균이 0이며, 평균에 대하여 대칭적인 분포를 갖는다. 또한, $c_i(t)$ 는 차수가 낮을수록 상대적으로 입력 신호의 고주파수 성분을 포함하는 특성을 갖게 된다. 즉, $c_1(t)$ 가 입력 신호 $x(t)$ 의 가장 고주파수 성분을 포함하고, $c_N(t)$ 가 입력 신호 $x(t)$ 의 가장 저주파수 성분을 포함하게 된다. 이와 같은 특징 때문에 각

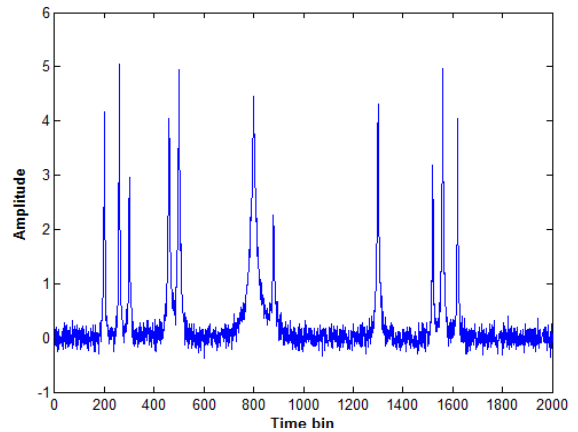
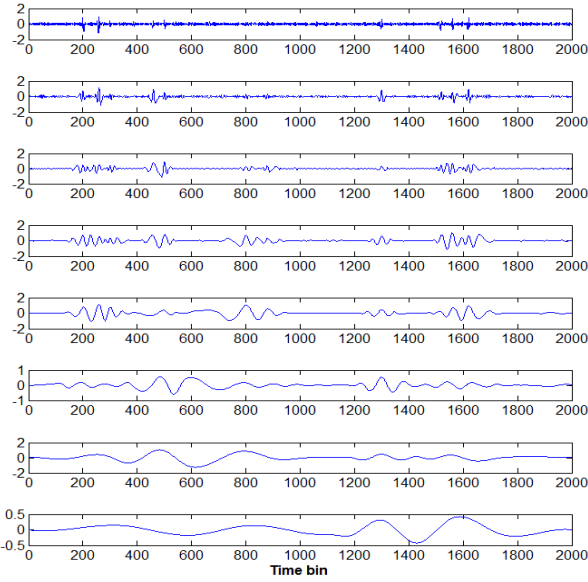


그림 1. 입력 신호 $x(t)$

Fig. 1. Input signal $x(t)$.

그림 2. $x(t)$ 의 EMD 분해 결과Fig. 2. IMFs and residue of input signal $x(t)$.

각의 IMF 성분들은 앞서 언급한 것처럼 $x(t)$ 의 filter bank로서 동작할 수 있게 된다.

2-2 기본적인 EMD 잡음 제거 원리

일반적으로 EMD를 이용하여 잡음을 제거^{[7]~[9]}하기 위해서는 다음의 세 가지 가정이 필요하다: 1) 신호의 크기가 잡음보다 더 크다, 2) 잡음이 평균이 0인 가우스 분포를 이루고 있다, 3) 잡음 성분은 대부분 고주파수 성분에 분포하고 있다. 상기 세 가지 가정들을 이용하여, 신호의 고주파수 성분에 대하여 특정 문턱 값보다 크기가 작은 신호를 가우스 잡음으로 구분하고, 해당하는 잡음을 제거하는 것이 EMD 잡음 제거 기법의 원리이다.

평균이 0인 가우스 잡음을 제거하는 기준이 되는 문턱 값 λ 는 L. Donoho가 제안한 보편 문턱값(universal threshold)^[10](식 (2), (3))을 일반적으로 사용한다. 보편 문턱 값은 입력 신호 $x(t)$ 의 i 번째 IMF 성분 $c_i(t)$ 와 표본 시간의 개수 N 에 의해 각 $c_i(t)$ 마다 각각 결정되며, 그 표현식 λ_i 는 다음과 같다.

$$\lambda_i = \tilde{\sigma}_i \sqrt{2 \log N} \quad (2)$$

$$\tilde{\sigma}_i = \frac{\text{median}(|c_i(t) - \text{median}(c_i(t))|)}{0.6745} \quad (3)$$

각 $c_i(t)$ 에 포함된 잡음은 문턱 값 λ_i 를 기준으로 구분할 수 있으며, 구분된 잡음을 처리하는 방식은 크게 다음의 두 가지 방식^[15]으로 나눌 수 있다.

$$T_{\text{soft}}(c_i(t)) = \begin{cases} c_i(t) - \lambda_i & \text{for } |c_i(t)| \geq \lambda_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$T_{\text{hard}}(c_i(t)) = \begin{cases} c_i(t) & \text{for } |c_i(t)| \geq \lambda_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

식 (4)의 방식을 소프트 스레시홀딩(soft thresholding)이라 하고, 식 (5)의 방식을 하드 스레시홀딩(hard thresholding)이라 한다. 소프트 스레시홀딩을 이용하면 원본 신호가 필연적으로 제거되지만, 복원된 신호가 하드 스레시홀딩을 이용한 방법보다 연속적이라는 특징이 있고, 하드 스레시홀딩을 이용하면 소프트 스레시홀딩을 이용할 때보다, 신호 성분이 덜 제거되며, 복원된 신호가 보다 불연속적이라는 특징이 있다. 본 논문에서는 표적 식별률을 높이기 위하여 신호가 더 많이 보존되는 하드 스레시홀딩을 이용하였다.

관측된 실수 신호 $y(t)$ 가 원본 신호 $x(t)$ 와 가우스 잡음 $n(t)$ 를 포함할 때, $y(t)$ 는 EMD를 이용하여 식 (6)처럼 분해할 수 있고, $y(t)$ 의 각 IMF에 하드 스레시홀딩을 적용한 신호 $\tilde{y}(t)$ 를 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = x(t) + n(t) = \sum_{i=1}^N c_i(t) + n(t) \quad (6)$$

$$\tilde{y}(t) = \sum_{i=1}^M T_{\text{hard}}(c_i(t)) + \sum_{j=M+1}^N c_j(t) + r_N(t) \quad (7)$$

이 때, M 은 IMF의 특정 차수를 나타내며, 식 (7)은 IMF의 M 번째 차수까지만 잡음 성분을 제거하겠다는 것을 표현하고 있다. 본 논문에서는 M 을 $N/2$ 로 설정하였다. 또한, 평균이 0인 가우스 잡음은 IMF 성분에서도 평균이 0인 가우스 잡음^{[8],[10]}이 되기 때문에 위와 같이 IMF 성분에 보편 문턱값을 이용하여 잡음을 제거할 수 있다.

2-3 레이더 수신신호 내 잡음의 통계적인 특성

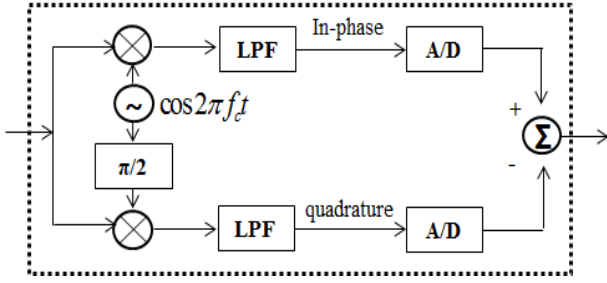


그림 3. 직교 변조기

Fig. 3. Quadrature demodulator.

레이다 수신 시스템은 일반적으로 직교 복조기를 사용한다. 이 때 수신 신호를 $x(t)$ 라 하면 디지털 신호처리부 내에서는 직교 복조기를 통과한 동상(in-phase) 성분 $x_I(t)$ 와 직교(quadrature) 성분 $x_Q(t)$ 를 이용하여 복소 포락(complex envelope) 신호 $x_c(t)$ 를 획득한다.

$$x_c(t) = x_I(t) + jx_Q(t) \quad (8)$$

이 때, 수신부에 열잡음이 추가된 경우를 생각해 보자. 수신 시스템에서 생성된 잡음 $n(t)$ ^[12]가 직교 변조기를 통과하면, 디지털 신호처리부 내에서 복소 포락 잡음 $n_c(t)$ 가 $x_c(t)$ 에 추가되며, 식 (9)와 같이 $y_c(t)$ 가 출력된다.

$$y_c(t) = x_c(t) + n_c(t) = y_I(t) + jy_Q(t) \quad (9)$$

$$n_c(t) = n_I(t) + jn_Q(t) \quad (10)$$

여기서, $y_I(t)$ 와 $y_Q(t)$ 는 각각 $y_c(t)$ 의 실수 성분과 허수 성분이며, $n_I(t)$ 와 $n_Q(t)$ 는 각각 잡음의 실수 및 허수 성분이다. 이 때, 직교 변조기 내 저역 통과 필터(Low Pass Filter: LPF)의 임펄스 함수(Impulse function)를 $h_L(t)$ 이라고 하면, $n_I(t)$ 와 $n_Q(t)$ 는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$n_I(t) = \int_{-\infty}^{\infty} n(\tau) \cos(2\pi f_c \tau) h_L(t - \tau) d\tau \quad (11)$$

$$n_Q(t) = - \int_{-\infty}^{\infty} n(\tau) \sin(2\pi f_c \tau) h_L(t - \tau) d\tau \quad (12)$$

$n_I(t)$ 와 $n_Q(t)$ 는 가우스 잡음 $n(t)$ 의 선형 결합

(linear combination) 이므로, $n_I(t)$ 와 $n_Q(t)$ 는 가우스 분포^[12]를 이룬다. 또한, $n(t)$ 의 평균은 0이기 때문에 $n_I(t)$ 와 $n_Q(t)$ 도 식 (13), (14)와 같이 평균이 0인 가우스 분포를 따르게 된다.

$$E[n_I(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} E[n(\tau)] \cos(2\pi f_c \tau) h_L(t - \tau) d\tau = 0 \quad (13)$$

$$E[n_Q(t)] = - \int_{-\infty}^{\infty} E[n(\tau)] \sin(2\pi f_c \tau) h_L(t - \tau) d\tau = 0 \quad (14)$$

2.4 제안하는 잡음 제거 기법

계단 주파수 파형(Stepped Frequency Waveform: SFW)^[1]을 사용하는 레이다의 경우, 주파수 f 를 f_1, f_2, \dots, f_k 로 바꾸어가며, 각 f 에 대한 표적의 산란신호를 획득하기 때문에 $y_c(t)$ 는 f 에 대한 함수인 $y_c(f)$ 로 표현 가능하다. 이 때, 잡음 $n(t)$ 는 수신단의 특성에 의해 결정되며, 수신 파형의 주파수 f 와는 무관하다. 따라서 $y_c(f)$ 에 포함된 복소 포락 잡음 $n_c(f)$ 는 식 (11)~(14)와 같은 원리로 실수 성분 $n_I(f)$ 와 허수 성분 $n_Q(f)$ 가 각각 평균이 0인 가우스 분포를 따르게 된다.

복소 HRRP를 형성하기 위해, 복소 포락 신호 $y_c(f)$ 에 f 방향으로의 푸리에 역변환(Inverse Fourier Transform: IFT)을^[16] 수행하면 복소 HRRP $Y_c(r)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_c(r) = \frac{1}{M} \sum_{t=0}^{M-1} y_c(f) e^{j \frac{2\pi r}{M} f} = X_c(r) + N_c(r) \quad (15)$$

여기서, $X_c(r) = \frac{1}{M} \sum_{t=0}^{M-1} x_c(f) e^{j \frac{2\pi r}{M} f}$ 는 잡음이 없는 복소 HRRP를 나타내고, $N_c(r) = \frac{1}{M} \sum_{t=0}^{M-1} n_c(f) e^{j \frac{2\pi r}{M} f}$ 는 잡음이 없는 복소 HRRP에 추가되는 잡음을 나타내며, $N_c(r)$ 의 평균 $E[N_c(r)] = \frac{1}{M} \sum_{t=0}^{M-1} E[n_c(f)] e^{j \frac{2\pi r}{M} f}$ 는 0

이다. 잡음 $N_c(r)$ 는 $n_c(f)$ 의 선형결합이므로 가우스 분포^[12]를 따르며, 평균은 0이 된다. 따라서 $N_c(r)$ 의 실수 성분 $N_I(r)$ 와 허수 성분 $N_Q(r)$ 도 가우스 분포를 따르고 평균이 0이 된다. 본래 EMD 잡음 제거 기법은 신호가 실수이고, 신호에 포함된 잡음이 평균이 0인 가우스 잡음일 때 사용할 수 있는 신호처리 기법이다. 따라서 본 논문에서는 EMD 잡음 제거 기법을 $Y_c(r)$ 의 실수 성분 $Y_I(r)$ 와 허수 성분 $Y_Q(r)$ 에 각각 적용한 후, 잡음이 제거된 실수 성분 $\widetilde{Y}_I(r)$ 와 허수 성분 $\widetilde{Y}_Q(r)$ 를 더하여, 다음과 같이 잡음이 제거된 신호 $\widetilde{Y}_c(r)$ 를 획득한다.

$$\widetilde{Y}_c(r) = \widetilde{Y}_I(r) + j\widetilde{Y}_Q(r) \quad (16)$$

마지막으로, 다음과 같이 $\widetilde{Y}_c(r)$ 에 절대값을 취하여, 잡음이 제거된 HRRP를 획득할 수 있다.

$$\widetilde{RP}(r) = |\widetilde{Y}_c(r)| \quad (17)$$

III. 실험 결과

3-1 실험 환경

레이다 수신 데이터를 획득하기 위해 포항공과대학교(POSTECH)의 단축거리 전자파 무반향실(compact range) (그림 4)에서 5개의 축소 표적(F4, F14, F16, F22, F117)에 대해 측정을 수행하였다. 측정을 위해 이용한 레이다의 사양은 표 1에 명시되어 있다. 측정 데이터는 항온 · 항습

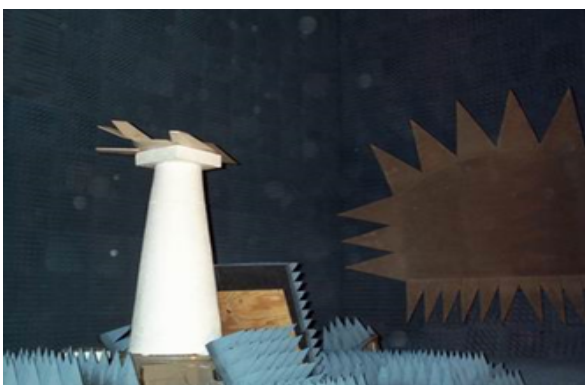


그림 4. 단축거리 전자파 무반향실
Fig. 4. Compact range facility.

표 1. 레이다 사양

Table 1. Radar specifications.

과 형	Stepped frequency waveform(SFW)
시작 주파수	8.3 GHz
끝 주파수	12.3 GHz
주파수 간격	10 MHz
주파수 개수	401 개

의 조건이 유지되며, 표적과의 거리가 가까운 매우 안정적인 상황이므로 SNR이 매우 높다. 따라서 인위적으로 잡음을 부가하였으며, 구체적으로는 직교 복조기를 통과한 이후의 복조 신호에 부가 백색 가우스 잡음(additive white gaussian noise: AWGN)을 부가하였다.

본 논문에서는 HRRP의 잡음 제거를 다음의 두 가지 방법으로 수행하였다.

방법 1: $RP(r) = |Y_c(r)|$ 에 직접 EMD 잡음 제거 기법을 적용하여 잡음이 제거된 $\overline{RP}(r)$ 형성.

방법 2: 제안하는 EMD 기반 잡음 제거 방법을 적용하여 잡음이 제거된 $\widetilde{RP}(r)$ 형성.

상기 두 가지 잡음 제거 기법의 성능은 신호 대 잡음 비(Signal-to-Noise Ratio: SNR)와 표적 식별률을 이용하여 평가되었다. 본 논문에서는 신호의 SNR을 식 (18)과 같이 정의하였다.

$$SNR = 10 \log \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \quad (18)$$

여기서, P_{signal} 은 잡음이 없는 상태에서의 신호의 파워이고, P_{noise} 는 잡음의 파워이다. 또한, 표적 식별률 η (%)는 식 (19)와 같이 정의하였다.

$$\eta = \frac{N_{correct}}{N_{total}} \quad (19)$$

이 때, N_{total} 은 식별기의 성능 평가를 위한 전체 시험 데이터의 수이고, $N_{correct}$ 는 N_{total} 중 정확히 식별된 시험 데이터의 수이다.

3-2 SNR의 평가 결과

상기 두 가지 잡음 제거 방법의 성능 평가를 위해 먼저 F117 축소 표적에 대하여 $y_c(f)$, $f = f_1, f_2, \dots, f_{401}$ 를 획득한 후, 이에 AWGN을 부가하였다. 그림 5는 $y_c(f)$ 로부터 획득한 $RP(r)$, $y_c(f)$ 에 AWGN을 부가하여 획득한 SNR이 5.5 dB인 $RP(r)$, 방법 1과 방법 2를 각각 적용하여 획득한 $\overline{RP}(r)$ 와 $\widetilde{RP}(r)$ 를 도시한다. 또한, 표 2는 이들에 대한 SNR을 정량적으로 평가한 결과를 보여준다.

표 2에서 제안된 방법(방법 2)를 통해 복원된 신호의 SNR이 방법 1을 통해 복원된 신호의 SNR보다 높다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는, $RP(r)$ 에 포함된 잡음이 평균이 0인 가우스 분포를 따르지 않기 때문에, EMD 잡음 제거 기법을 $RP(r)$ 에 적용하더라도 SNR이 크게 개선되지 않기 때문이다.

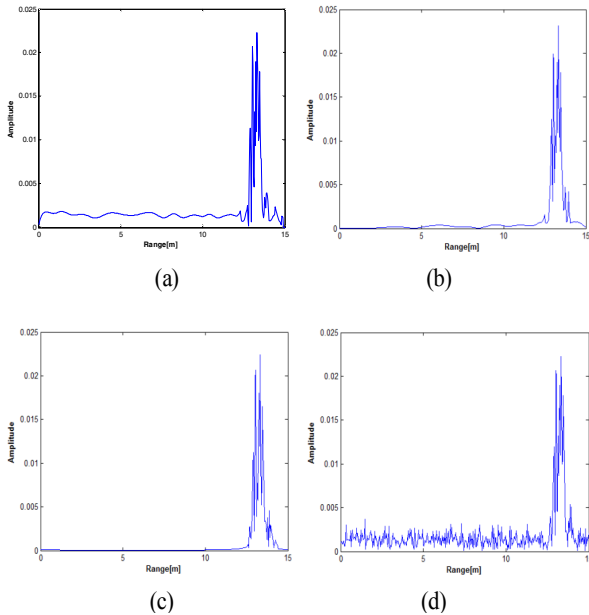


그림 5. (a) $RP(r)$, (b) 잡음을 부가한 $RP(r)$ (SNR=5.5 dB), (c) 방법 1를 이용하여 잡음을 제거한 $\overline{RP}(r)$ (SNR=6.2 dB), (d) 방법 2를 이용하여 잡음을 제거한 $\widetilde{RP}(r)$ (SNR=12.2 dB)

Fig. 5. (a) $RP(r)$, (b) $RP(r)$ with AWGN (SNR=5.5 dB), (c) de-noised $\overline{RP}(r)$ using method 1(SNR=6.2 dB), (d) de-noised $\widetilde{RP}(r)$ using method 2(SNR=12.2 dB).

표 2. SNR(dB)의 비교

Table 2. Comparison of SNR(dB).

	적용 전	방법 1		방법 2	
		적용 후	이 득	적용 후	이 득
시행 1	-6.49	-6.40	0.09	1.49	7.98
시행 2	-2.85	-2.40	0.45	5.56	8.41
시행 3	-0.77	-0.08	0.69	6.76	7.52
시행 4	2.77	3.59	0.82	10.18	7.41
시행 5	5.52	6.16	0.64	12.20	6.72

3.3 식별률의 평가 결과

먼저 식별 실험을 위해 5개의 축소 표적 F4, F14, F16, F22, F117)을 선택하였다. 훈련 데이터베이스(database: DB) 형성을 위해서는, 각 표적마다 0° 부터 180° 까지 0.5° 간격으로 $y_c(f)$, $f = f_1, f_2, \dots, f_{401}$ 을 획득하였다. 또한, 시험 DB를 형성하기 위해서는, 각 표적마다 0° 부터 180° 까지 2.5° 간격으로 $y_c(f)$, $f = f_1, f_2, \dots, f_{401}$ 을 획득하였다. 그 후, 시험 DB의 SNR을 $-6 \sim 6$ dB까지 3 dB 간격으로 변화시켜가며 표적식별을 수행하였다. 이때, 식별기로는 최근린(nearest neighbor) 식별기^[14]를 이용하였다. 표 3은 시험 DB에 대한 잡음 제거를 수행하지 않고 표적식별을 수행한 결과, 시험 DB에 대해 방법 1과 방법 2를 각각 적용하여 잡음 제거를 수행한 후, 표적식별을 수행한 결과를 보여준다.

표 3에서 제안하는 방법(방법 2)은 모든 SNR에 대해 식별률을 향상시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 특히 SNR이 0 dB 이하인 저 SNR에서는 상승률이 10~23 %로

표 3. 식별률(%)의 비교

Table 3. Comparison of correct classification rates(%).

SNR (dB)	적용 전	방법 1		방법 2	
		적용 후	이 득	적용 후	이 득
-6	44.11	36.99	-7.12	53.15	9.04
-3	60.27	53.15	-7.12	76.44	16.17
0	78.08	75.07	-3.01	85.75	7.67
3	91.23	89.04	-2.19	92.60	1.37
6	93.70	92.60	-1.10	93.42	-0.28

매우 높았다. 반면, 방법 1의 경우, SNR이 상승함에도 불구하고, 모든 SNR에서 잡음 제거를 수행하지 않았을 때보다 식별률이 저하되었다. 이는 신호의 통계적인 특징을 고려하지 않고 EMD를 적용하여, 표적들을 구분하기 위한 세부 정보들이 과도하게 제거되었기 때문이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 EMD 알고리즘과 HRRP 내 포함된 잡음의 통계적인 특성을 이용하여 효과적으로 HRRP에 포함된 잡음을 제거할 수 있는 기법을 제안하였다. 실험 결과에서는 제안한 EMD 기반 잡음 제거 방법을 이용하여 HRRP의 SNR과 HRRP를 이용한 표적 식별 성능을 크게 향상시키고 있다는 것을 수치적으로 확인하였다. 향후, 제안하는 EMD 기반 잡음 제거 기법은 저 SNR에서의 HRRP를 이용한 표적의 산란현상 분석 및 표적식별에 유용하게 이용될 수 있다.

References

- [1] C. Ozdemir, *Inverse Synthetic Aperture RADAR Imaging with MATLAB Algorithms*, Wiley, 2012.
- [2] A. Zyweck, R. E. Bogner, "Radar target classification of commercial aircraft", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 2, 598-606, 1996.
- [3] N. Padmaja, S. Varadarajan, and R. Swathi, "Signal processing of RADAR echoes using wavelets and Hilbert Hung transform", *SIPIJ*, vol. 2, no. 3, pp. 101-119, Sep. 2011.
- [4] 박준용, 이승재, 양은정, 김경태, "EMD를 이용한 HRRP의 잡음 제거 기법", 2015년도 한국전자과학회 종합학술대회 논문집, 25(1), p. 11, 2015년 11월.
- [5] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shin, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis", *Proc. Royal Soc. London A*, pp. 903-995, 1998.
- [6] P. Flandrin, G. Rilling, and P. Goncalves, "Empirical mode decomposition as a filter bank", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 11, no. 2, pp. 112-114, Feb. 2004.
- [7] J. Huang, J. Xie, F. Li, and L. Li, "A threshold denoising method based on EMD", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 47, no. 1, pp. 419-424, Jan. 2013.
- [8] A. O. B, J. C. Cexus, "Denoising via empirical mode decomposition", in *Proc. ISCCSP 2006*, 2006.
- [9] Y. Kopsinis, S. McLaughlin, "Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, no. 4, Apr. 2009.
- [10] D. L. Donoho, "De-noising by soft-thresholding", *IEEE Trans. Inform. Theory*, pp. 613-627, 1995.
- [11] Z. Wu, N. E. Huang, "A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method", *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, pp. 1597-1611, Jun. 2004.
- [12] M. P. Fitz, *Fundamentals of Communications Systems*, McGraw-Hill, 2007.
- [13] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*, John Wiley Inc, pp. 7-46, New York, 1999.
- [14] R. O. Duda, P. E. Hart, and D. G. Stork, *Pattern Classification*, 2nd, Wiley, 2001.
- [15] D. Baleanu, "Advances in wavelet theory and their applications in engineering", *Physics and Technology*, In-Tech, 2012.
- [16] B. P. Lathi, *Linear Systems and Signals 2nd*, Oxford, 2009.

박 준 용



2014년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사)
 2014년 3월~2016년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2016년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 추정론, 능동 위상 배열 레이더

양 은 정



2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 2006년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2011년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 2011년 1월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더 신호처리, ISAR 이동보상

이 승 재



2012년 2월: 한양대학교 전자 및 통신공학과 (공학사)
 2014년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2014년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호처리, 패턴인식

김 경 태



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
 [주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호처리, 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정