

진화적 적응 웨이브릿 변환에 의한 레이다 표적의 산란 해석

Scattering Analysis of Radar Target via Evolutionary Adaptive Wavelet Transform

최인식*

Choi, In-Sik

ABSTRACT

In this paper, the evolutionary adaptive wavelet transform(EAWT) is applied to the scattering analysis of radar target. EAWT algorithm uses evolutionary programming for the time-frequency parameter extraction instead of FFT and the bisection search method used in the conventional adaptive wavelet transform(AWT). Therefore, the EAWT has a better performance than the conventional AWT. In the simulation using wire target(Airbus-like), the comparisons with the conventional AWT are presented to show the superiority of the EAWT algorithm in the analysis of scattering phenomenology. The EAWT can be effectively applied to the radar target recognition.

주요기술용어(주제어) : Evolutionary Adaptive Wavelet Transform(진화적 적응 웨이브릿 변환), Scattering Analysis(산란 해석), Time-Frequency Analysis(시간-주파수 영역 해석법), Scattering Center(산란점), Resonance Frequency(공진주파수)

1. 서론

레이다 단면적(RCS)은 산란체에 입사된 전력밀도에 대한 산란된 전력의 비를 나타내는 것으로 거리에 상관없으며 산란체 또는 표적의 고유한 특징을 나타내며 송수신 편파, 입사각, 송신주파수, 산란체의 전기적 특성들의 함수이다^[1].

이러한 레이다 단면적을 해석함으로써 우리는 표적이 가지고 있는 중요한 정보들을 추출해 낼 수 있다. 표적의 중요한 정보에는 산란점과 고유주파수가 있다. 산란점은 레이다 표적에서 전자파의 산란 세기

가 큰 점이며, 고유주파수란 표적이 가지고 있는 고유한 주파수로서 주로 물리적인 크기에 의해서 결정된다.

레이다 단면적(RCS)을 해석하기 위해서 일반적으로 사용되는 방법은 시간영역 해석과 주파수 영역 해석이 있을 수 있다. 시간영역 해석법이라 함은 주파수 영역의 RCS 데이터를 푸리에 역변환을 통하여 시간영역으로 바꿈으로써 1차원 거리 프로파일(Range Profile)을 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 1차원 거리 프로파일은 산란점을 추출할 수 있는 방법이다. 반면에, 주파수 영역에서 레이다 단면적(RCS)을 해석함으로써 우리는 표적의 고유주파수를 추출해 낼 수 있다.

이 두 가지 방법 외에 최근에 개발된 시간-주파수 영역 해석법(Time-Frequency Analysis)^[2~5]을 이용

† 2007년 7월 23일 접수~2007년 9월 7일 게재승인

* 한남대학교 공과대학 전자공학과

주저자 이메일 : recog@hannam.ac.kr

하면 우리는 표적물의 산란점과 고유 주파수 정보를 동시에 추출해 낼 수 있다. 시간-주파수 영역 해석법을 이용하면 한 번의 신호처리를 통하여 시간영역 응답과 주파수 영역 응답을 2차원 평면상에서 동시에 관찰할 수 있다.

대표적인 시간-주파수 영역 해석법에는 Short-Time Fourier Transform(STFT), Wigner-Ville Distribution(WVD), Choi-Williams Distribution(CWD), Continuous Wavelet Transform(CWT), 적응 웨이브릿 변환(AWT : Adaptive Wavelet Transform) 등이 있다. 각각의 방법들은 서로 장단점을 가지고 있으며, 이 중에서 시간 영역 해상도와 주파수 영역 해상도를 동시에 충족시키며, 고스트(ghost)나 cross-term 문제가 없는 방법으로서 AWT가 가장 좋은 성능을 가지는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 이러한 AWT 알고리즘보다도 성능이 우수한 진화적 적응 웨이브릿 변환(EAWT : Evolutionary Adaptive Wavelet Transform)^[6]을 레이다 표적의 산란 해석에 적용하였다. EAWT 알고리즘은 기존의 AWT 알고리즘이 시간-주파수 파라미터 값을 추출하기 위해 고속 푸리에 변환(FFT)와 이분 탐색 알고리즘(Bisection Search Algorithm)을 이용하는 것과는 달리 진화 프로그래밍(Evolutionary Programming)을 이용하여 추출함으로써 파라미터 값이 더욱 정확해 지는 장점이 있다. 본인은 앞서의 연구^[6]에서 EAWT 알고리즘을 레이다 영상(ISAR Image)의 이동보상기법에 적용함으로써 AWT를 이용한 이동보상기법보다 더욱 향상된 화질의 영상을 얻을 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 모멘트법(Moment Method)을 이용해서 계산한 1/100 스케일의 Airbus 표적의 산란파를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, EAWT 알고리즘이 기존의 AWT 알고리즘보다 레이다 산란 현상을 더욱 잘 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

본 논문의 구성은 2장에서 기존의 AWT 알고리즘과 EAWT 알고리즘을 비교 설명한다. 또한 3장에서는 시뮬레이션 결과를 제시하며 마지막으로 4장에서는 결과를 요약한다.

2. 적응 웨이브릿 변환(AWT)과 진화적 적응 웨이브릿 변환(EAWT)

2장에서는 기존의 잘 알려진 적응 웨이브릿 변환(AWT)과 진화적 적응 웨이브릿 변환(EAWT)을 비교하여 설명한다.

먼저 적응 웨이브릿 변환(AWT)에 대하여 먼저 설명하고자 한다. AWT는 시간 영역의 측정 신호를 가우시안 기저 함수(Gaussian basis function)의 합으로써 표현한다. AWT 알고리즘에서 시간 영역의 측정 신호 $s(t)$ 는 다음과 같이 표현된다^[7].

$$s(t) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m h_m(t) \tag{1}$$

여기서,

$$h_m(t) = (\pi\sigma_m^2)^{-1/4} \cdot \exp\left(-\frac{(t-t_m)^2}{2\sigma_m^2}\right) \exp(j2\pi f_m t)$$

이다. 기존의 AWT 방법에서는 표준편차 σ_m 과 시간-주파수 성분의 위치(t_m, f_m)와 크기 B_m 은 다음의 식(2)와 같이 $h_m(t)$ 가 $s_{m-1}(t)$ 와의 닮음(similarity) 정도가 최대가 되도록 결정된다.

$$|B_m|^2 = \max_{t_m, f_m, \sigma_m} \left| \int s_{m-1}(t) h_m^*(t) dt \right|^2 \tag{2}$$

여기서, $s_0(t) = s(t)$ 이며, 만약 m 이 1보다 크면 $s_m(t)$ 는 $s_{m-1}(t)$ 를 $h_m(t)$ 에 대해 직교 투영시킨 후의 나머지가 된다.

위의 식(2)의 근을 구하기 위해서 AWT 알고리즘에서는 고속 푸리에 변환(FFT)와 양분 탐색법(Bisection Search)를 이용하였다. 하지만, 제안하는 EAWT 방법은 진화 프로그래밍을 이용한 최적화 방법을 이용하여 근을 구한다. EAWT의 구체적인 알고리즘은 아래와 같다.

Step 1. 먼저 반복 횟수를 나타내는 인수인 m 을 1이라 두고 시간 영역에서의 측정 데이터를 $s_{m-1}(t_k)$,

$k = 1, 2, \dots, K$ 로 정의한다. 여기서 K 는 시간 샘플링의 갯수이다.

Step 2. m 번째 반복 횟수에서의 비용함수(Cost Function)를 아래 식 (3)과 같이 정의하고 그 비용함수를 최소로 만드는 상수 $(t_m, f_m, \sigma_m, B_m)$ 을 구한다.

$$J_m = \sum_{k=1}^K |s_{m-1}(t_k) - B_m h_m(t_k)|^2 \quad (3)$$

진화 프로그래밍의 서브루틴에서 개체 벡터는 4개의 구성요소로 이루어진다. 우리는 J_m 의 최소값을 모르기 때문에 미리 정해진 실행 시간이 초과하면 자동적으로 진화 프로그래밍의 서브루틴을 종료시킨다.

Step 3. Step 2에서 추출된 신호의 성분들을 $s_{m-1}(t)$ 로부터 빼 준후, $s_m(t)$ 을 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$s_m(t) = s_{m-1}(t_k) - B_m h_m(t_k), k = 1, \dots, K \quad (4)$$

Step 4. $m \rightarrow m + 1$, 만약 임계치 γ 값이 충분히 커지지 않았다면 Step 2로 되돌아가고, γ 가 미리 정해진 값을 초과하면 알고리즘을 종료한다. 이때, 임계치 γ 의 식은

$$\gamma = \sum_{m=1}^M |B_m|^2 / \sum_{k=1}^K |s(t_k)|^2 \quad (5)$$

이며, 여기서 M 은 최대 반복 횟수이다.

위와 같은 과정으로 원하는 임계치값 γ 에 도달하면 우리는 추출된 파라미터값을 이용하여 다음 식 (6)에 대입하여 시간-주파수 영역 상에서의 2차원 적응 스펙트로그램(ADS : Adaptive Spectrogram)을 구할 수 있다.

$$ADS(t, f) = \sum_{m=1}^M |B_m|^2 \exp[-\frac{(t-t_m)^2}{\sigma_m^2} - (2\pi\sigma_m)^2(f-f_m)^2] \quad (6)$$

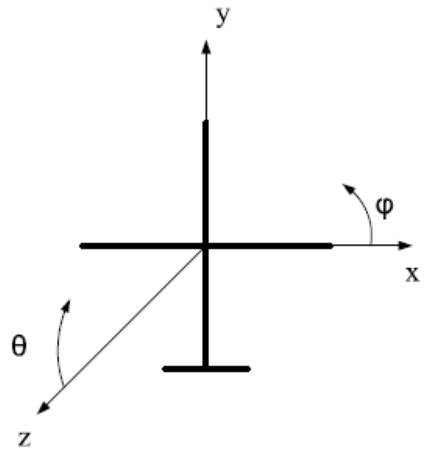
이 적응 스펙트로그램(ADS) 영상은 레이더 신호에 포함되어 있는 산란점과 고유주파수 정보를 시각적으로 잘 표현해 주게 된다.

3. 시뮬레이션 결과

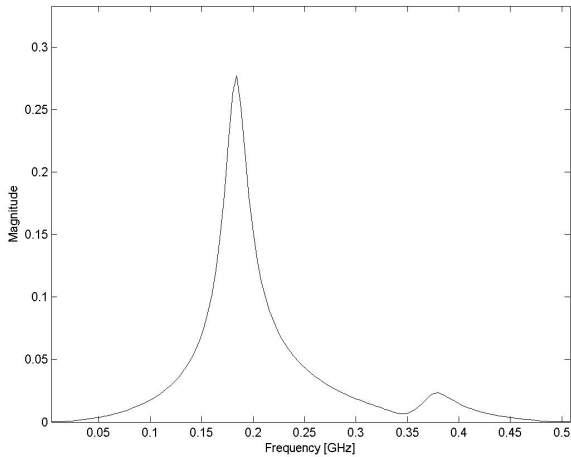
진화적 적응 웨이브릿 변환을 이용한 레이더 표적의 산란 해석을 위하여 우리는 그림 1에 나와 있는 선형 표적물(wire target)을 가정하였다^[8]. 이 표적물은 실제 Airbus 비행기의 1/100 스케일 크기를 가지고 있다. 표적을 구성하는 각 선형 구조물의 크기는 날개가 0.4484m, 몸체가 0.5408m, 꼬리가 0.1626m이다.

주파수 영역에서 표적물로부터의 레이더 반사파를 얻기 위하여 우리는 모멘트법(Moment Method)을 이용하였다. 주파수 대역은 0~0.508GHz까지이며, 주파수 간격은 4MHz이다. 즉, 총 주파수 샘플의 개수는 127이다. 아직 국내에는 저주파 영역(대부분 1GHz이하)의 공진 주파수를 관측할 수 있는 측정 시스템(Compact Range 또는 Arch Range)을 갖추고 있지 않으므로 수치해석(numerical analysis) 방법을 택할 수 밖에 없었다.

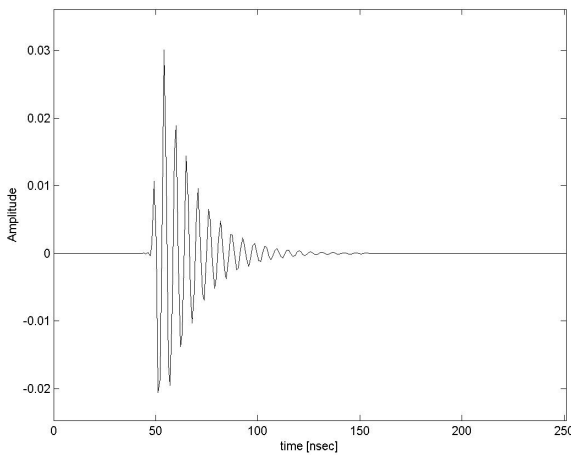
그림 2는 모멘트법으로 구해진 레이더 반사파의 주파수 영역의 응답이며, 그림 3은 이 주파수 응답을 고속 푸리에 역변환(Inverse Fast Fourier Transform)을 통하여 시간영역으로 변환한 시간응답을 나타낸다. 그림 2에서 우리는 $\theta = 60^\circ$, $\phi = 10^\circ$ 에서의 주파수 응답에 180MHz와 375MHz의 공진 주파수가 존재함을 알 수 있다.



[그림 1] 시뮬레이션에 사용된 Airbus 형상의 선형 표적물



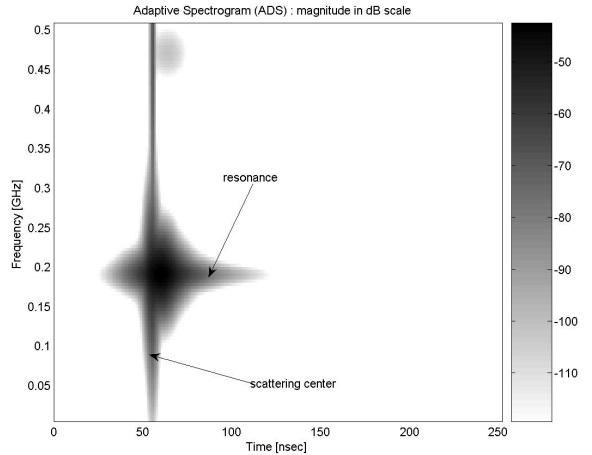
[그림 2] $\theta = 60^\circ$, $\phi = 10^\circ$ 에서의 주파수 응답



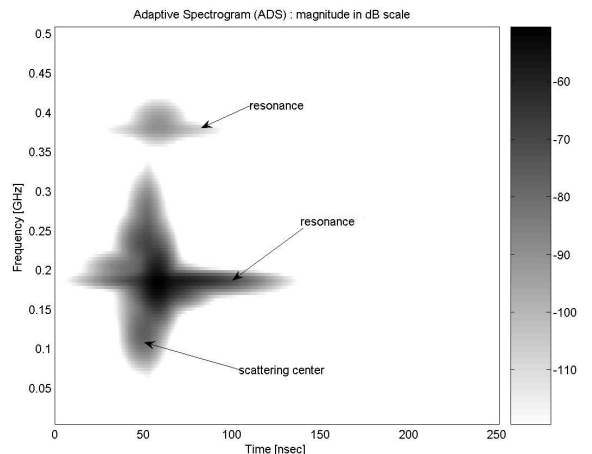
[그림 3] $\theta = 60^\circ$, $\phi = 10^\circ$ 에서의 시간응답

그림 4와 5는 각각 그림 3의 시간 응답 신호에 적응 웨이브릿 변환(AWT)과 진화적 적응 웨이브릿 변환(EAWT) 기법을 적용한 적응 스펙트로그램(ADS) 결과를 보여준다. 적응 스펙트로그램(ADS) 영상에 표시되어 있듯이 특정 주파수에서 시간 영역으로 길게 나타나는 응답은 표적의 공진 주파수(Resonance Frequency)에 해당하며, 특정한 시간에서 주파수 영역으로 길게 나타나는 응답은 산란점(scattering center)을 나타낸다.

앞의 그림 2에서 알 수 있듯이 $\theta = 60^\circ$, $\phi = 10^\circ$ 응답에서는 두개의 고유주파수(180MHz, 375MHz)가 존



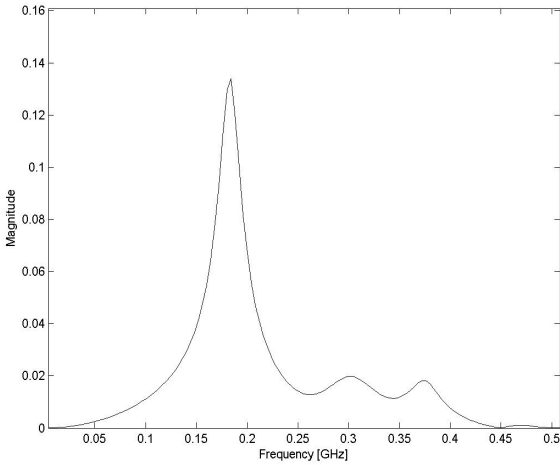
[그림 4] AWT에 의한 적응 스펙트로그램(ADS), $\theta = 60^\circ$, $\phi = 10^\circ$, $\gamma = 0.9$



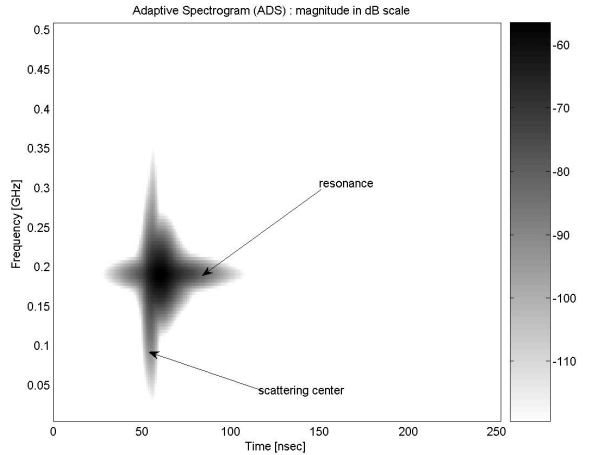
[그림 5] EAWT에 의한 적응 스펙트로그램(ADS), $\theta = 60^\circ$, $\phi = 10^\circ$, $\gamma = 0.9$

재하지만 AWT를 이용한 분석(그림 4)에서는 가장 큰 에너지를 가지는 공진 주파수(Dominant Resonance Frequency)인 180MHz는 잘 관찰할 수 있으나, 에너지가 미약한 375MHz의 공진주파수를 관찰할 수 없다. 하지만, EAWT를 이용한 ADS 결과(그림 5)에서는 두개의 공진주파수가 모두 관찰됨을 알 수 있다.

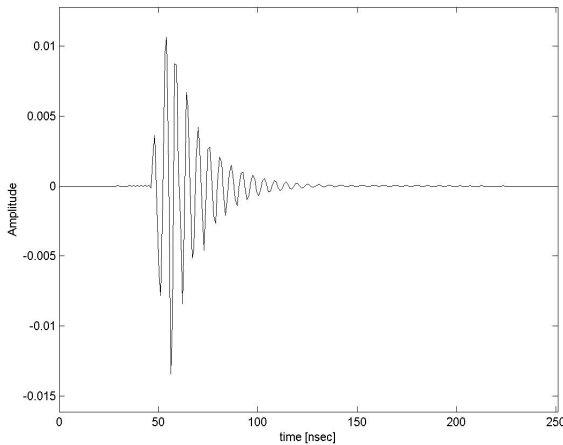
그림 6과 그림 7은 각각 $\theta = 60^\circ$, $\phi = 45^\circ$ 에서의 주파수 응답과 시간 응답을 나타내며, 그림 6의 주파수



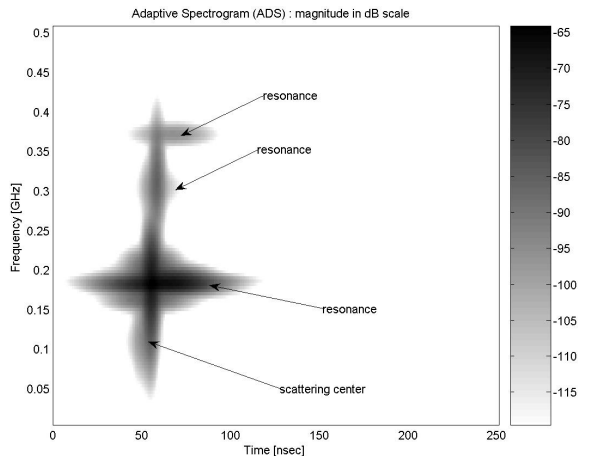
[그림 6] $\theta = 60^\circ, \phi = 45^\circ$ 에서의 주파수 응답



[그림 8] AWT에 의한 적응 스펙트로그램(ADS), $\theta = 60^\circ, \phi = 45^\circ, \gamma = 0.9$



[그림 7] $\theta = 60^\circ, \phi = 45^\circ$ 에서의 시간응답



[그림 9] EAWT에 의한 적응 스펙트로그램(ADS), $\theta = 60^\circ, \phi = 45^\circ, \gamma = 0.9$

응답에서 우리는 180MHz, 300MHz, 375MHz에 3개의 공진 주파수가 존재함을 알 수 있다. 이 중 주(dominant) 공진 주파수는 180MHz이다.

그림 7의 시간 응답(transient response)을 그림 3과 비교해 보면, 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 하지만 이를 ADS를 통해 시간-주파수 영역에서 관찰하면 확연한 차이를 보이게 된다. 이것은 바로 EAWT를 이용한 산란 분석 기법이 표적인식에도 아주 유용하게 적용될 수 있음을 보여주는 결과이다.

그림 8과 그림 9는 각각 $\theta = 60^\circ, \phi = 45^\circ$ 에서의 그림 7의 시간 응답 신호에 적응 웨이브릿 변환(AWT)

와 진화적 적응 웨이브릿 변환(EAWT) 기법을 적용한 적응 스펙트로그램(ADS) 결과를 보여준다. 결과에서 알 수 있듯이 EAWT에 의한 스펙트로그램(ADS)에서는 비록 300MHz의 고유주파수가 조금 약하게 보이긴 하지만 3개의 공진주파수를 모두 관찰할 수 있지만, 기존의 AWT에 의한 스펙트로그램에서는 공진주파수를 주(dominant) 공진 주파수인 180MHz 하나밖에 관찰할 수 없음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 진화적 적응 웨이브릿 변환(EAWT)을 레이더 표적의 산란 해석에 적용하였다. 기존에 레이더 신호의 산란 현상을 분석하기 위한 시간-주파수 영역 해석법으로는 STFT, CWT, AWT 등의 기법들이 있었지만, 본 논문에서는 그 중 가장 성능이 우수하다고 알려져 있는 AWT와 성능을 비교하였다. 모멘트법(Moment Method)을 이용해서 계산한 1/100 스케일의 Airbus 표적의 산란파를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, EAWT 알고리즘이 기존의 AWT 알고리즘보다 레이더 표적의 산란점과 고유주파수를 동시에 더욱 잘 관찰할 수 있음을 알 수 있었다. EAWT를 이용한 레이더 표적물 인식에 대한 연구는 매우 중요한 응용분야 중 하나이므로 앞으로의 연구 과제로 남겨 두기로 한다.

후 기

이 논문은 2007년도 한남대학교 학술연구조성비 지원(2007A081)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Robert B. Dybdal, "Radar Cross Section Measurements", Proceedings of the IEEE, Vol. 75, No. 4, pp. 498~516, Apr. 1987.
- [2] A. Moghaddar and E. K. Walton, "Time-frequency distribution analysis of scattering from waveguide cavity", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 41, pp. 677~680, May 1993.
- [3] In-Sik Choi and Hyo-Tae Kim, "Efficient feature extraction from time-frequency analysis of transient response for target identification", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 26, pp. 403~407, Sep. 2000.
- [4] V. C. Chen, H. Ling, Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis, Artech House, Boston, MA, 2002.
- [5] L. C. Trintinalia and H. Ling, "Interpretation of scattering phenomenology in slotted waveguide structures via time-frequency processing", IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 43, pp. 1253~1261, Nov. 1995.
- [6] In-Sik Choi, Byung-Lae Cho, Hyo-Tae Kim, "Motion compensated ISAR using evolutionary adaptive wavelet transform", IEE proceedings -Radar, Sonar and Navigation, Vol. 150, No. 4, pp. 229~233, Aug. 2003.
- [7] V. C. Chen, "Reconstruction of inverse synthetic aperture radar image using adaptive time-frequency wavelet transform", SPIE Proceedings on Wavelet Application, Vol. 2491, pp. 373~386, 1995.
- [8] Kyung-Tae Kim, In-Sik Choi and Hyo-Tae Kim, "Efficient radar target classification using adaptive joint time-frequency processing", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 48, pp. 1789~1801, Dec. 2000.