

수정된 HHT 기법을 이용하여 회전하는 프로펠러 날개에 의한 마이크로 도플러 신호의 해석

Analysis of Micro-Doppler Signatures from Rotating Propellers Using Modified HHT Method

박 지 훈 · 최 익 환* · 명 로 훈

Ji-Hoon Park · Ik-Hwan Choi* · Noh-Hoon Myung

요 약

본 논문에서는 시간-주파수 동시 해석 기법 중 하나인 수정된 HHT 기법을 이용하여 회전하는 프로펠러의 날개에서 산란되는 마이크로 도플러 신호를 분석하였다. 프로펠러의 날개 모서리에 산란되는 산란파는 등가전류법(ECM)을 이용하여 구했다. 산란파의 시간 데이터를 얻은 후, 수정된 HHT 기법을 마이크로 도플러 신호의 해석에 적용하였다. 해석 결과는 실제 날개의 동특성에 잘 부합하였으며, 회전체로부터 발생하는 마이크로 도플러의 정편파적인 특성을 보였다. 수정된 HHT를 이용한 시간-주파수 동시 해석은 작은 레이더 단면적 값을 갖는 소형 비행체를 식별하기 위한 명확한 특성을 제공하였다.

Abstract

This paper has presented the analysis of the micro-Doppler signatures scattered from the blades of the rotating propeller using the modified HHT method, one of the joint time-frequency analysis methods. The field scattered from the blade edge of the propeller was calculated using equivalent current method(ECM). After the acquisition of the scattered field data in the time domain, the modified HHT method was applied to analyze the micro-Doppler signature. The analysis results showed not only a good agreement with the realistic dynamic characteristic of the blade but also sinusoidally varying characteristics of the micro-Doppler signatures generated from rotating objects. It could be concluded that the joint time-frequency analysis via the modified HHT provided the discriminative characteristics for recognizing a small aircraft target with small RCS value.

Key words : Radar Cross Section(RCS), Equivalent Current Method(ECM), Micro-Doppler Signature, Joint Time-Frequency Analysis, Hilbert-Huang Transform(HHT)

I. 서 론

전장에서 정찰 용도로 주로 운용되고 있는 무인 항공기는 일반적인 전투 용도의 비행체와는 달리 동

체의 크기가 매우 작다. 이러한 비행체의 소형화된 특성에 의해 비행체 자체로부터 후방 산란되어 산출되는 레이더 단면적(Radar Cross Section: RCS) 또한 새의 RCS(-20 dBsm 이하)와 동일한 수준의 적은

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

*국방과학연구소(Agency for Defense Development, ADD)

· Manuscript received 2012 May 25, 2012 ; Revised August 2, 2012 ; Accepted August 6, 2012. (ID No. 20120525-04S)

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

값을 보인다. 따라서, 소형 비행체에 대한 표적 인식 및 식별이 이루어지기 위해서는 표적 식별 특성이 상대적으로 떨어지는 RCS를 이용하기 보다는 소형 비행체에 장착되어 회전하는 프로펠러로부터의 마이크로 도플러 신호를 이용하게 된다. 마이크로 도플러 신호는 산란체의 병진운동에 의해서가 아닌, 주로 산란체의 진동이나 회전 운동 등으로부터 야기되어 신호의 주파수가 시간에 따라 주기적으로 변화하는 특성을 보인다. 이러한 마이크로 도플러 신호의 해석을 위하여 신호 주파수의 시간 변화 특성을 효과적으로 관찰할 수 있는 시간-주파수 동시 해석 기법(joint time-frequency analysis)이 가장 대표적으로 적용되고 있다^{[1],[2]}. 명확하게 식별 가능한 주파수 시변 특성을 얻기 위해서는 고해상도를 갖는 시간-주파수 변환법을 적용하는 것이 요구된다^[1].

본 논문에서는 납작한 PEC 평판으로 모델링된 프로펠러 날개에 대하여 등가 전류법(Equivalent Current Method: ECM)을 이용해 변화하는 시간에 대하여 얻은 산란파 데이터를 이용하였다^{[3],[4]}. 이러한 데이터를 바탕으로 고해상도를 갖는 HHT(Hilbert Huang Transform) 기법^[5]에 1차 주파수 성분 외의 고조파 성분을 약화시키는 기법이 추가된 수정된 HHT 기법^[6]을 활용하여 회전하는 프로펠러 날개에 의한 마이크로 도플러 신호를 해석하였다.

II. 프로펠러 산란체 모델링 및 전자기 해석

프로펠러의 회전에 의해 발생하는 산란파 데이터를 얻기 위해 그림 1과 같이 프로펠러를 두께가 고려되지 않은 납작한 PEC 평판으로 간략하게 모델링하였다^{[3],[4]}. 프로펠러 날개 크기는 가로 길이 L_1 , 세로 길이 L_2 이며, 기본적으로 xz 평면상에 놓인 상태에서 시간의 수식으로 표현되는 회전 각도 θ_s (각속도 ω 의 회전 및 시간 t 에 대해 $\theta_s = \omega t$)와 xy 평면에 대한 휘어짐 각도(skewed angle) ϕ_s 를 갖는다.

이렇게 날개의 회전 및 휘어짐에 의해 변화된 위치를 갖는 날개를 기준으로 국부 좌표계 (x', y', z') 를 도입하여 회전하는 프로펠러의 표현을 용이하게 하였다. 그 후 그림 1의 단일 프로펠러 구조 여러 개를 프로펠러의 중심점으로부터 각기 다른 각도로 평행 이동시킴으로써, 그림 2와 같이 프로펠러가 다수의

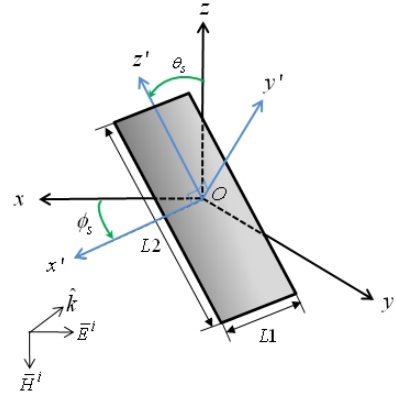


그림 1. 납작한 PEC 평판으로 간략히 모델링된 프로펠러 구조

Fig. 1. Propeller structure simply modelled as a flat PEC plate.

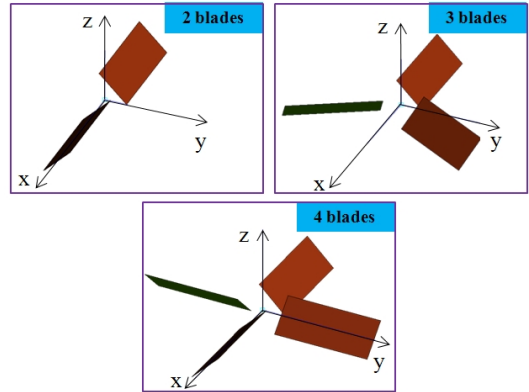


그림 2. 다수의 날개를 갖는 프로펠러 모델

Fig. 2. Propeller model with multiple blades.

날개를 갖는 경우로 확장시켰다.

시간 t 에 대해 회전하는 프로펠러 날개에 의한 RCS값을 계산하기 위해 입사파는 계산상의 편의를 위하여 식 (1)의, 고정된 고도각 $\theta=90^\circ$ 을 갖는 평면파(plane wave)의 입사를 가정하였다.

$$\begin{aligned} \vec{E}^i &= \hat{\phi} E_0 e^{jk(x \cos \phi + y \sin \phi)} \\ \vec{H}^i &= \hat{\theta} E_0 / Z_0 e^{jk(x \cos \phi + y \sin \phi)} \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 Z_0 와 k 는 각각 자유 공간에서의 파수와 특성 임피던스이다. 본 연구의 시뮬레이션에서는 임의의 입사 방위각 $\phi=20^\circ$ (광역 좌표계 기준)를 주었으며, 전자기장의 편파는 구형좌표계에서 표현되는 편파로 주었다. 입사파의 주파수는 300 MHz로 하였으

며, 각각 2개, 3개, 4개의 날개를 가지는 프로펠러가 분당 600회(회전 주파수 10 Hz)의 회전 속도를 가진다고 가정하였다. 주파수 변조가 날개의 개수에 비례하도록 하기 위해^[4] 날개 각각에는 일정한 휘어짐 각도 10°를 주었으며, L_1, L_2 는 각각 $2\lambda, 5\lambda$ 의 길이로 하여 관심 주파수와 관계없이 날개의 전기적 크기를 일정하게 하였다.

본 논문에서 사용하는 신호는 기본적으로 입사방향과 관측 방향이 서로 정반대인 상태에서 원역장을 구하는, mono-static 레이더에 의한 RCS 신호이다. 입사파가 프로펠러 날개의 모서리에 의해 후방 산란될 경우, 모서리의 회절점에는 디스크 형태의 회절 광선 다발이 형성되고, 이런 회절점은 무한히 형성될 수 있다^[7]. 따라서 그림 3과 같이 화선(caustic)상의 산란파를 계산하기 위해 모서리에 유기되는 전류를 개념적으로 생각하여 이로부터 산란파를 계산하는 등가전류법을 고려하였다. PEC로 가정된 날개의 모서리에 유기되는 전기 전류 및 자기 전류로부터 계산되는 산란파는 복사 적분의 식 (2)로 주어진다^[7].

$$\begin{aligned} \overline{E^s} = & -jkl \operatorname{sinc}\left(\frac{kgl}{2}\right) [Z_0 I^e (\hat{e} - (\hat{e} \cdot \hat{s}) \hat{s}) \\ & + I^m (\hat{e} \times \hat{s})] \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 r 은 날개 광역좌표계의 원점으로부터 관측점까지의 거리이며, \hat{e} 와 \hat{s} 는 각각 모서리에 대한 접선 방향 단위 벡터와 산란(회절) 방향 벡터이다. I_e 와 I_m 은 전기 등가 전류, 자기 등가 전류이며, 각각 식 (3)과 (4)로 표현된다^[7].

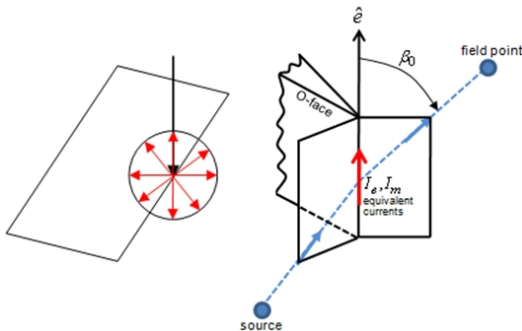


그림 3. 모서리에 수직 입사 후 산란되는 회절 광선 다발 및 등가전류법의 기본 원리
Fig. 3. Diffracted rays by the normal incidence to an edge and basic principle of ECM.

$$I^e = -\frac{\hat{e} \cdot \hat{e}^i}{Z_0 \sin \beta_0} E^i(\zeta) \sqrt{\frac{8\pi}{k}} e^{-j\pi/4} D_s(\zeta) \quad (3)$$

$$I^m = -\frac{\hat{e}^i \cdot (\hat{e} \times \hat{s}^i)}{\sin \beta_0} E^i(\zeta) \sqrt{\frac{8\pi}{k}} e^{-j\pi/4} D_h(\zeta) \quad (4)$$

위의 등가 전류의 식은 앞서 언급한 국부 좌표계와 광역 좌표계 간의 θ_s, ϕ_s 각도 회전 변환 관계에 의해서 적분을 계산하기 위한 매개변수 변환 과정을 거쳐게 된다. 행렬식의 회전각도가 시간 t 에 관한 식 ($\theta_s = \omega t$)으로 표시되므로, 결과적으로 시간 별로 산란파를 계산할 수 있다^[4].

등가전류법의 특성상, Keller cone 상에 놓이는 회절파의 성분 외에도 임의의 방향을 갖는 관측점에서 산란파를 계산할 수 있다. 그 외 \hat{e}^i 는 입사파의 편파, β_0 는 모서리와 입사 광선이 이루는 각도이고, l, ζ 은 모서리의 길이 및 길이의 매개변수이며, $D_{s,h}(\zeta)$ 는 후방 산란 및 납작한 산란체 조건 하의 GTD 회절계수이다. 위와 같이 프로펠러 날개의 각 모서리에 개념적으로 유기되는 등가 전류를 이용하여 각 등가 전류에 의한 산란파를 중첩의 원리에 의해 산출함으로써 전체 날개로부터의 산란파를 구할 수 있다. 산란파의 시간 데이터는 회전 주파수가 레이더 주파수에 비해 매우 낮고, 회전 속도가 광속에 비해 매우 느리다는 점에 착안, 준 정상 상태(quasi-stationary state)를 가정하여 구하였다^{[3],[4]}.

앞서 언급한 프로펠러 모델과 전자기 해석 방법을 통하여 시간에 따라 얻어진 산란파 데이터, 즉 회전에 의한 마이크로 도플러 신호에 대해 시간-주파수 분석을 수행하게 된다.

III. 수정된 HHT 기법 적용 및 결과

3-1 수정된 HHT 기법

II절에서 얻은 회전하는 프로펠러로부터의 마이크로 도플러 신호 데이터에 시간-주파수 변환 기법을 적용하여 신호의 시간-주파수 동시 해석을 수행하였다. 여기서 채택한 시간-주파수 변환 기법은 고해상도를 갖는 대표적인 기법인 HHT(Hilbert-Huang Transform)에 Meyer 웨이블릿 분리(Meyer wavelet decomposition)를 전 처리 과정으로 삽입한 수정된 HHT

(modified HHT) 기법^[6]이다.

기본적인 HHT는 크게 두 가지의 과정으로 구성된다. 먼저 EMD(Empirical Model Decomposition) 기법은 다중 주파수 성분으로 구성된 신호를 큐빅 스플라인 내삽법(cubic spline interpolation)을 이용하여 여러 개의 고유 모드 진동 함수(Intrinsic Mode Function: IMF)로 분리한다. 그 후 HSA(Hilbert Spectral Analysis)과정을 통해 IMF 각각에 대하여 식 (5)에 의해 정의되는 순시 주파수를 산출하게 된다.

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (5)$$

여기서 $\Phi(t)$ 는 고유 모드로 분리된 신호와 그 신호의 Hilbert 변환을 합성한 신호로부터 구한 신호의 순시 위상이다. 식 (5)는 순시 주파수의 엄밀한 정의이나, 신호 자체가 다중 주파수 성분으로 구성될 경우에는 적용할 수 없다는 한계가 있었다. 그러나 1998년에 N. E. Huang이 최초로 제안한 EMD기법을 통해 신호를 여러 고유한 모드로 분리할 수 있게 됨에 따라, 식 (5)의 유효한 적용이 가능해졌다^[5]. 이러한 HHT 기법은 신호와 윈도우 함수 간의 convolution 적분 연산을 사용하는 다른 시간-주파수 변환 기법에 비하여 고해상도를 갖게 된다. 그러나 EMD가 신호 처리의 관점에서는 dyadic filter bank 연산과 등가적이고^[8], 이로 인해 여러 HHT의 응용 분야에서 EMD가 효과적으로 신호의 모드를 분리하지 못하는 문제점이 발견되었다^[9].

본 논문에서 다루게 되는 회전에 의한 마이크로 도플러 신호는 시간에 대해 주기적인 특성을 보이므로 주파수 스펙트럼에서 다수의 고조파(harmonic)가 발생한다. 이러한 신호의 마이크로 도플러 성분을 분석하기 위해서는 첫 번째 고조파에 집중하게 되며, 첫 번째 고조파의 정확한 시변 특성을 관측하기 위해서 효과적으로 이 성분을 분리하고 고해상도의 시간-주파수 변환 기법의 적용이 요구되었다.

따라서 위에서 언급한 EMD의 한계점을 완화시키고, 보다 정확하게 마이크로 도플러 분석을 수행하기 위해 수정된 HHT 기법을 신호분석에 이용하였다. 수정된 HHT 기법은 EMD과정 전에 Meyer 웨이블릿 분리 과정을 추가적으로 삽입함으로써 구현되었다. 웨이블릿 분리 과정에 의하면 날개의 회전에

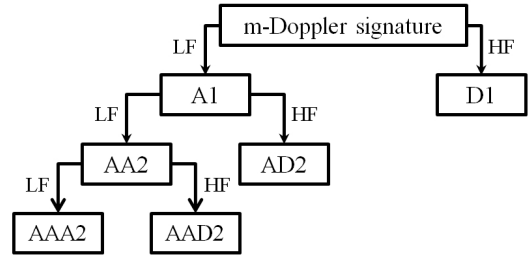


그림 4. 마이크로 도플러 신호에 대한 웨이블릿 분리의 기본 순서도

Fig. 4. Basic steps of wavelet decomposition for micro-Doppler signatures.

의해 발생한 마이크로 도플러 신호가 저대역 및 고대역 필터에 의해 각각 approximation 성분과 detail 성분으로 분리되며, 이러한 과정을 거친 후 approximation 성분이 다시 분리되는 과정을 수행한다. 이러한 과정은 분리 과정이 첫 번째 고조파 대역에 이를 때까지 반복된다. 이 때 웨이블릿 분리 과정에 쓰이게 되는 필터는 어떤 웨이블릿의 모함수(mother wavelet)를 택하느냐에 따라 다른데, 수정된 HHT 기법의 경우 고조파 분석에 유용한 Meyer 웨이블릿 분리를 차용한다. 그림 4에 이러한 웨이블릿 과정의 기본적인 순서도를 나타내었다. 이를 통해 사전에 첫 번째 고조파를 중심으로 주파수 대역을 한정시키고, 전체 구성 주파수 성분을 간단하게 만든다는 측면^[9]에서 EMD의 모드 분리 실패를 방지할 수 있다는 장점이 있다. 여기서 웨이블릿 분리 연산의 횟수를 나타내는 웨이블릿 분리계수는 데이터 샘플링 주파수와 첫 번째 고조파 주파수에 대하여 식 (6)으로 정의된다.

$$N < \lfloor \log \left(\frac{f_s/2}{f_1} \right) / \log 2 \rfloor \quad (6)$$

여기서 $\lfloor \rfloor$ 기호는 계산되는 값보다 크지 않은 최대 정수 값을 산출하는 “floor” 연산자이다.

수정된 HHT 기법의 장점을 보이고자, 식 (7)의 다수의 고조파를 갖는 신호를 임의로 생성시켰다.

$$x(t) = \sum_{n=1}^5 e^{-nt} \cos(8n\pi t + 0.5\sin(2\pi t)) \quad (7)$$

위의 식에 의해 생성된 주기 신호의 첫 번째 고조

파에 대하여 기본적인 HHT 기법과 수정된 HHT 기법 그리고 신호와 window함수 간의 convolution 적분 연산을 거치는 대표적인 기법인 짧은 시간 푸리에 변환 기법(Short-Time Fourier Transform: STFT)을 사용하여 얻은 첫 번째 고조파 성분의 시간-주파수 해석을 수행하였다. 수정된 HHT 기법이 웨이블릿 분리 연산을 추가 수행하므로 약 0.7초의 시간 지연이 존재한다. 그러나 그 결과를 도시한 그림 5에서, 주파수의 시변 특성을 정확하게 표현하지 못하는 기본적인 HHT 기법과는 달리, 수정된 HHT 기법은 삽입된 웨이블릿 분리의 작용에 의해 첫 번째 고조파 성분이 효과적으로 추출되어 더 정확한 시변 특성을 보임을 알 수 있다. 또한, 짧은 시간 window 내에 위치하는 신호의 특성이 정적인(stationary) 상태임을 가정하여(불확정성 원리) 주파수 퍼짐현상(blurring)의 발생하는 STFT 결과에 비해, 수정된 HHT 기법의 결과는 주파수의 정현파와 시변 특성이 명확히 드러나므로, 월등한 해상도를 보임을 알 수 있다.

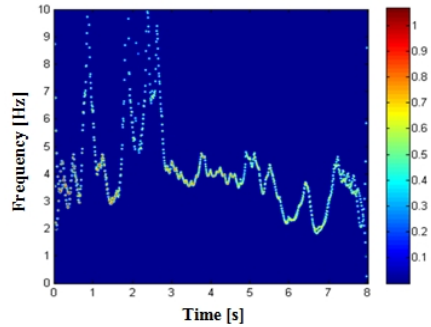
3-2 신호에 대한 시간-주파수 동시 해석 결과

앞선 2절에서 언급한 산란된 마이크로 도플러 신호 데이터에 3-1절에서 언급한 수정된 HHT 기법을 적용하여 시간-주파수 동시 해석을 수행하였다. 회전하는 프로펠러의 날개 수는 각각 2개, 3개, 4개로 변화시켰으며, 초당 10회 회전하는 조건에서 시간-주파수 동시 해석 결과를 0 Hz로 중심축을 옮겨서 그림 6과 같이 나타내었다.

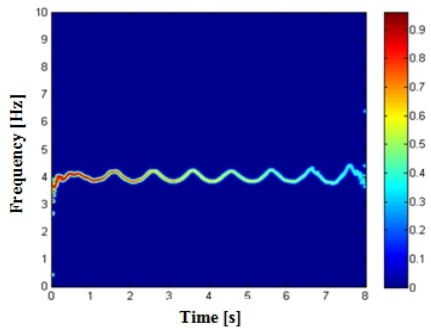
그림 6에 나타난 순시 도플러 주파수의 시변 특성을 보면, 주기가 날개의 개수 N 과 반비례 함을 알 수 있으며, 회전 주파수가 10 Hz이므로 날개의 개수가 각각 2, 3, 4개인 경우에는 순시 도플러 주파수의 주기는 각각 0.05초, 0.033초, 0.025초로 산출된다. 보다 정량적으로 신호를 분석하기 위하여 회전하는 날개에 의한 순시 도플러 주파수의 시변 특성을 나타내는 식 (8)^[2]을 고려하면 다음과 같다.

$$f_d(t) = \frac{2V_r}{\lambda} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \cos(2\pi Nf_r t + \phi_0) \quad (8)$$

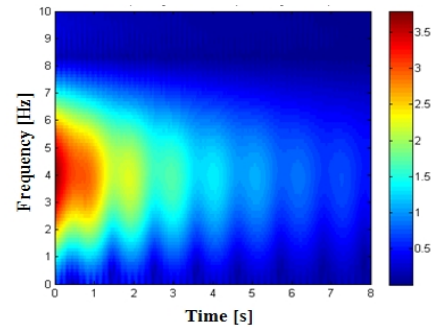
식 (8)에서 N , f_r , t , ϕ_0 는 각각 날개의 개수, 회전 주파수, 시간, 순시 도플러 주파수의 초기 위상을 나타낸다. V_r 은 식 (9)와 같이 날개의 회전 주파수 f_r 과



(a) 기본적인 HHT 기법을 이용한 결과
(a) Analysis results from the original HHT



(b) 수정된 HHT 기법을 이용한 결과
(b) Analysis results from the modified HHT



(c) STFT 기법을 이용한 결과
(c) Analysis results from the STFT

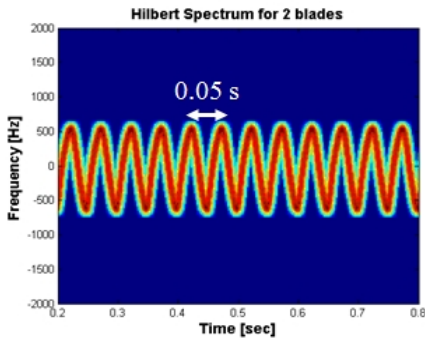
그림 5. 첫 번째 고조파 성분에 대한 시간-주파수 동시 해석 결과의 비교

Fig. 5. Comparison between joint time-frequency analysis results of first harmonic component.

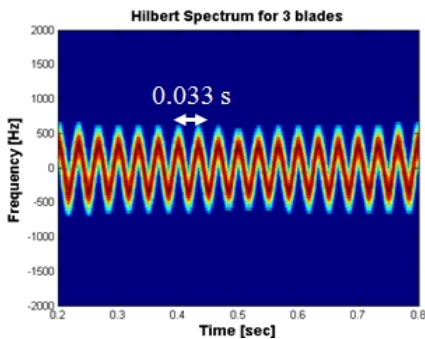
길이 L 로 표현할 수 있다.

$$V_r = 2\pi f_r L \quad (9)$$

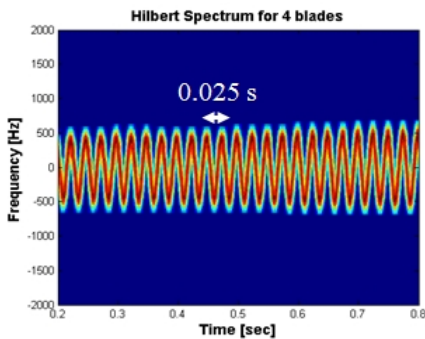
입사파의 편파와 입사 방향, 모서리의 방향을 고려하면 산란파의 성분은 주로 길이 5λ 인 모서리에



(a) 프로펠러 날개 수: 2개
(a) Case of the propeller with 2 blades



(b) 프로펠러 날개 수: 3개
(b) Case of the propeller with 3 blades



(c) 프로펠러 날개 수: 4개
(c) Case of the propeller with 4 blades

그림 6. 다른 날개 수를 가진 프로펠러에서 발생하는 마이크로 도플러 신호의 시간-주파수 동시 해석 결과

Fig. 6. Joint time-frequency analysis results from micro-Doppler signatures generated by propellers with different number of blades.

의해 발생할 것이고, 이로 인한 순시 도플러 주파수의 진폭도 이에 부합한다. 이상에서 수정된 HHT 기법을 적용하여 프로펠러의 회전으로부터의 마이크

로 도플러 신호를 분석한 결과, 시변 특성이 실제 동특성에 잘 맞을 뿐 아니라 전자파를 산란시키는 날개의 길이에 관한 정보도 예측 가능함을 알 수 있다. 또한, 기본적으로 순시 주파수의 엄밀한 정의 식을 통해 시간-주파수 특성을 산출하는 만큼, 고해상도를 갖게 되므로 회전에 의한 마이크로 도플러 고유의 정현파적인 특성을 잘 보여준다고 할 수 있다. 참고문헌 [10]에 의하면, 회전하는 제트 엔진에서 발생하는 마이크로 도플러 신호에 의해 전체 비행체의 RCS로부터 제트 엔진의 장착 위치를 판단할 수 있다. 즉, 정성적으로, 비행 동체의 산란파에 대한 회전체의 산란파의 기여분이 높음을 알 수 있다. 이러한 해석 결과는 RCS값이 적게 산출되는 소형 비행체에 대해서도 프로펠러 날개 수의 산출 등을 통해 표적 인식을 위한 특성을 제공해줄 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 납작한 PEC 평판으로 모델링한 프로펠러의 날개를 이용하여 ECM으로 산란파를 계산하여 이를 시간에 대한 데이터로 구하였다. 이러한 데이터를 바탕으로, 관심 주파수 성분을 추출하여 마이크로 도플러 신호의 시변 특성을 명확하게 보일 수 있는 수정된 HHT 기법을 적용, 최종적으로 시간-주파수 동시 해석을 수행하였다. 해석 결과, 프로펠러의 동특성과 신호의 시변 특성이 잘 부합할 뿐만 아니라, 회전에 의한 마이크로 도플러의 정현파적인 특성을 잘 보여주었다. 이러한 마이크로 도플러 해석 기법은 RCS값이 적은 소형 비행체 표적을 효과적으로 식별할 수 있는 특성을 제공하며, 다른 마이크로 도플러 신호 처리 분야로의 응용에도 적용될 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] V. C. Chen, H. Ling, *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*, Boston, MA, Artech House, pp. 181-190, 2002.
- [2] P. Pouliguen, L. Lucas, F. Muller, S. Quete, and C. Terret, "Calculation and analysis of electromagnetic scattering by helicopter rotating blades", *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 50, pp. 1396-

- 1408, Oct. 2002.
- [3] I. H. Choi, H. Lim, D. W. Seo, K. U. Bae, and N. H. Myung, "Analysis of electromagnetic backscattering from rotational flat blades", *2010 International Symposium on Antennas and Propagation*, China, Nov. 2010.
- [4] Y. S. Sun, N. H. Myung, "Analysis of electromagnetic scattering by a rotating rotor with flat blades", *SingaporeICCS'94*, Singapore, Nov. 1994.
- [5] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, 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. R. Soc. A*, vol. 454, pp. 679-699, 1998.
- [6] J. H. Park, H. Lim, and N. H. Myung, "Modified Hilbert-Huang transform and its application to measured micro Doppler signatures from realistic jet engine models", *Progress in Electromagnetic Research(PIER)*, vol. 126, pp. 255-268, Mar. 2012.
- [7] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius, and J. A. G. Malherbe, *Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction*, London, Artech House, 1990.
- [8] Patrick Flandrin, Gabriel Rilling, and Paulo Gonçalves, "Empirical mode decomposition as a filter bank", *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 112-114, Feb. 2004.
- [9] W. Yang, "Interpretation of mechanical signals using an improved Hilbert-Huang transform", *Mechanical System and Signal Processing*, no. 22, pp. 1061-1071, 2008.
- [10] H. Lim, N. H. Myung, "High resolution range profile-jet engine modulation analysis of aircraft models", *Journal of Electromagnetics Waves and Applications*, vol. 25, pp. 1092-1102, May 2011.

박 지 훈



및 전자파 수치해석

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, 전자장론

명 로 훈



전기 및 전자공학과 교수

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~2011년 12월: 전파탐지 특화연구센터 소장
 2008년 1월~2011년 12월: 인공위성 연구센터 소장
 [주 관심분야] 전파 예측 모델, 마이크로웨이브 공학, 안테나 및 레이더 공학, 이동 및 위성 통신, EMI/EMC/EMS 등

최 익 환



전자파 산란 및 영상

2009년 2월: 고려대학교 전기 및 전자공학과 (공학사)
 2011년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2011년 2월~현재: 국방과학기술연구소 연구원
 [주 관심분야] 레이더 및 전파응용,