

시간-주파수 영상을 이용한 효과적인 미사일 미세운동 변수 추출 방법

An Efficient Method to Extract the Micro-Motion Parameter of the Missile Using the Time-Frequency Image

최인오 · 김시호 · 정주호 · 김경태 · 박상홍*

In-O Choi · Si-Ho Kim · Joo-Ho Jung · Kyung-Tae Kim · Sang-Hong Park*

요 약

현대 전장에서 널리 사용되는 미사일 표적은 작은 레이더 단면적 및 빠른 기동 특성으로 인하여 탐지가 매우 힘들다. 특히 미사일과 유사한 운동 변수로 기동하는 기만체의 존재 때문에 표적의 병진운동 변수들이 아닌 다른 형태의 특성 벡터를 추출할 필요가 있다. 본 연구에서는 성공적인 미사일 표적의 식별을 위하여 미세운동을 하는 표적의 미세운동변수 및 산란점 추출을 위한 효과적인 기법을 제안한다. 제안된 기법에서는 모델링 된 미세 도플러 함수와 신호처리 된 수신신호의 시간-주파수 영상과의 정합을 비용함수로 사용하여 미세운동변수들과 산란점들의 위치를 추출하였다. 점 산란원으로 구성된 표적을 이용한 시뮬레이션 결과, 미세운동 및 산란점들의 변수가 정확하게 추출되었다.

Abstract

It is very difficult to intercept the missiles because of the small radar cross-section and the high maneuverability. In addition, due to the decoy with the similar motion parameters, additional features other than those of the translation motion parameters need to be developed. In this paper, for the successful recognition of missiles, we propose an efficient method to extract micro-motion parameters and scatterers of the missile engaged in the micro motion. The proposed method extracts motion parameters and scatterers by using the matching score between the modeled micro-Doppler function and the time-frequency binary image as a cost function. Simulation results using a target composed of the point scatterer show the parameters and the scatterers were accurately extracted.

Key words: Missile Recognition, Micro-Doppler, Frequency Scatterer, Binary Image, Particle Swarm Optimization

I. 서 론

제 2차 세계대전 기간에 독일에 의해서 V1 미사일이 사용된 이후로 현재까지 세계 각 전장에서는 다양한 형

태의 미사일이 널리 사용되고 있으며, 큰 위협이 되고 있다. 대부분의 미사일의 속도는 마하 2~4(2,448~4,896 km/h)의 범위를 가지므로 요격에 대한 그 생존성이 매우 높고, 0~수 dBsm의 저 레이더 단면적(Radar Cross Section:

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 레이더/IR 표적식별 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.」

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*부경대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pukyong National University)

· Manuscript received April 18, 2016 ; Revised June 7, 2016 ; Accepted June 15, 2016. (ID No. 20160418-042)

· Corresponding Author: Sang-Hong Park (e-mail: radar@pknu.ac.kr)

RCS)으로 인하여 탐지가 매우 어렵다. 특히 미사일이 목적지에 접근할 때, 미사일과 유사한 운동 성분 및 형상을 가지는 기만체가 함께 비행하기 때문에 미사일 요격에 보다 많은 어려움이 존재한다. 따라서 기존에 사용되는 미사일 궤적 및 속도-가속도와 같은 운동 변수로는 실시간 미사일 요격이 어려울 수 있으므로, 추가적인 특징을 이용한 특성벡터를 구성할 필요가 있다.

현재 사용되는 많은 미사일 표적들은 미세운동(micro-motion)과 함께 기동을 하며, 이러한 미세운동으로 인하여 실시간 도플러 주파수가 변화하는 미세도플러(micro-Doppler) 천이가 발생한다^[1]. 이때 이러한 미세도플러를 이용하여 미세운동 변수를 성공적으로 추출할 수 있다면, 실시간 미사일 요격 성능을 획기적으로 증대시킬 수 있다. 또한, 미세운동 변수 추출과정에서 표적의 산란점도 함께 추출되기 때문에, 이러한 산란점 위치 정보를 추가적으로 미사일 식별에 특성벡터로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 성공적인 미사일 식별을 위하여 미세운동을 하는 미사일 표적의 미세운동 변수 및 산란점 추출을 위한 효과적인 기법을 제안한다. 제안된 기법은 로드리게스(Rodrigues) 회전 공식^[2]을 이용하여 얻은 미세도플러 주파수 함수를 기저함수로 정의한 후, 이를 레이다 신호처리로 얻어진 시간-주파수 미세 도플러 영상과 정합한 기법이며, 기저함수를 구성하는 미세운동 변수들의 추출을 위하여 particle swarm optimization(PSO)^[3]이 사용되었다. 제안된 기법은 미세운동하는 점 산란원 미사일 표적을 이용하여 그 성능을 입증한다.

II. 제안된 기법

2-1 미세운동 모델링

일반적인 미사일의 미세운동은 기본적으로 미사일 내의 회전축 중심의 회전인 회전운동(spining)과 외부의 회전축 중심의 회전인 원추운동(coning)이 결합된 구조이며, 실시간 원추운동 축과 회전운동 축이 이루는 평면에서의 정현파적(sinusoidal)인 떨림인 장동운동(nutation)으로 구성된다(그림 1 참조). 회전 및 원추운동의 경우, 일반적인 회전운동 축 $\vec{w}_s(0)=[l_x, l_y, l_z]$ 주변의 회전이며, 로드리게스 회전공식을 적용할 경우, 시간 t 에 대하여 회전 행렬

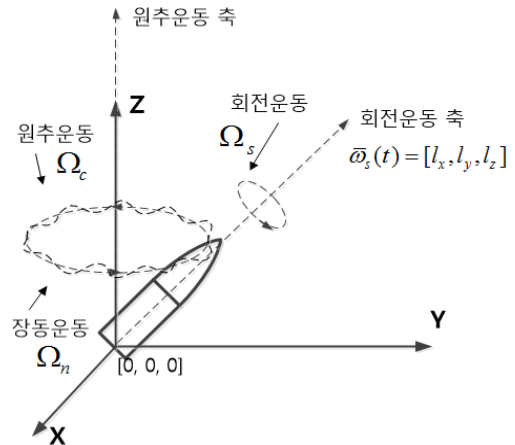


그림 1. 미사일 표적의 미세운동
Fig. 1. Micro-motion of the missile.

R 을 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다^[2].

$$R = I + \hat{e} \sin \Omega t + \hat{e}^2 (1 - \cos \Omega t) \quad (1)$$

여기서 I 는 단위행렬, Ω 는 각속도 그리고 \hat{e} 는 다음과 같다.

$$\hat{e} = \begin{bmatrix} 0 & -l_z & l_y \\ l_z & 0 & -l_x \\ -l_y & l_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

위 식에서 계산의 편의를 위하여 원추운동 축을 $\vec{w}_c(t) = [0, 0, 1]^T$ 로 가정한 후, 표적 산란원 초기 위치벡터를 회전축 위에 놓을 경우, 회전운동 각속도는 $\Omega_s = 0$ 으로 정의되고, 이때 실시간 미세운동을 하는 산란점 위치벡터 $\vec{r}(t)$ 은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\vec{r}(t) = R_c R_s \vec{r}_0 = \begin{bmatrix} \cos(\Omega_c t) - \sin(\Omega_c t) 0 \\ \sin(\Omega_c t) \cos(\Omega_c t) 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \vec{r}_0 \quad (3)$$

여기서 $\vec{r}_0 = [x_{10} \ y_{10} \ z_{10}]^T$ 는 초기 산란원 위치벡터, R_c 와 R_s 는 각각 식 (1)과 (2)를 적용한 원추 및 회전운동 행렬이며, Ω_c 는 원추운동 각속도이다.

장동운동의 경우, 실시간 회전하는 회전운동 축과 고정된 원추운동 축이 이루는 평면(장동운동 평면)에서 정현파적으로 $\pm \theta_{n0}$ 범위에서 회전하는 것으로 가정할 수

있으며, 이러한 장동운동 평면을 정의하기 위해서는 새로운 좌표계를 사용해야 한다. 이를 위하여 z 축을 새로운 x' 축으로 설정한 후, x' 축과 실시간 원추 및 회전운동을 하는 회전운동 축 $\overline{w}_s(t)=R_c R_s \overline{w}_s(0)$ 와의 외적을 이용하여 새로운 z' 축을, z' 축과 x' 축의 외적을 구성한 후, 이를 이용하여 새로운 y' 축을 구성한다.

$$\overline{x'} = [0 \ 0 \ 1]^T, \overline{z'} = \overline{x'} \times \overline{w}_s(t), \overline{y'} = |\overline{z'} \times \overline{x'}| \quad (4)$$

이때 각각의 단위벡터인 $\overline{x'}$, $\overline{y'}$, $\overline{z'}$ 을 계산하여 변환 행렬 $A_T = [\overline{x'} \ \overline{y'} \ \overline{z'}]$ 을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$A_T = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A_{11} &= A_{21} = A_{32} = A_{33} = 0, A_{31} = 1, \\ A_{12} &= l_x \cos(\Omega_c t) - l_y \sin(\Omega_c t), \\ A_{13} &= -l_y \cos(\Omega_c t) - l_x \sin(\Omega_c t), \\ A_{22} &= l_y \cos(\Omega_c t) + l_x \sin(\Omega_c t), \\ A_{23} &= l_x \cos(\Omega_c t) - l_y \sin(\Omega_c t), \end{aligned} \quad (6)$$

이를 원추운동을 하는 산란원 위치벡터와 곱할 경우, 새로운 좌표계로 변환된다. 이때 변환된 좌표계에서 장동운동의 회전특성을 적용시키기 위한 장동운동 회전행렬 B_T 는 다음과 같이 정의된다.

$$B_T = \begin{bmatrix} \cos\theta_n(t) & -\sin\theta_n(t) & 0 \\ \sin\theta_n(t) & \cos\theta_n(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \theta_n(t) = \theta_{n0} \sin\Omega_n t \quad (7)$$

여기서 θ_{n0} 는 장동운동 크기, Ω_n 는 장동운동의 각속도이다. 변환된 새로운 좌표계에서 회전 행렬 B_T 를 이용하여 정현파적으로 회전시킨 후, 원래의 좌표계로 역 변환하는 행렬인 A_T 를 곱하여 최종적으로 장동운동으로 인한 실시간 산란원 위치 좌표 $\overline{r}_n(t)$ 를 다음과 같이 모델링하였다^[4].

$$\overline{r}_n(t) = R_n R_c R_s \overline{r}_0 = (A_T B_T A_T^T) R_c \overline{r}_0 \quad (8)$$

이때 회전각 속도가 $\Omega_s=0$ 이기 때문에 R_s 는 단위행렬이고, 회전축 위에 위치한 산란점은 원추 및 장동운동만 존재하게 된다.

원추 및 장동운동을 하는 실시간 산란점 $\overline{r}_n(t)$ 이 레이

$$\begin{aligned} f_{Doppler}([x_{10} y_{10} z_{10}], \Omega_c, \Omega_n, \theta_{n0}, t) &= \frac{2}{\lambda} \frac{d(\overline{r}_n(t) \times \overline{r}_{LOS}^T)}{dt} = Q_1 \sin(\theta_n(t)) \cos(\Omega_n t) \sin(\Omega_c t) \\ &+ Q_2 \sin(\Omega_c t) \cos(\theta_n t) + Q_3 \sin(\theta_n(t)) \cos(\Omega_c t) + Q_4 \sin(\theta_n(t)) \sin(\Omega_c t) \\ &+ Q_5 \cos(\Omega_c(t)) \cos(\theta_n t) + Q_6 \sin(\theta_n(t)) \cos(\Omega_n t) \cos(\Omega_c t) + Q_7 \cos(\theta_n t) \cos(\Omega_n t) \cos(\Omega_c t) \\ &+ Q_8 \cos(\theta_n(t)) \cos(\Omega_n t) \sin(\Omega_c t) + Q_9 \cos(\theta_n t) \cos(\Omega_n t) + Q_{10} \sin(\theta_n(t)) \cos(\Omega_n t) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{2\theta_{n0}\Omega_n(r_x(y_{10}^3 + x_{10}^2 y_{10}) - r_y(x_{10} y_{10}^2 + x_{10}^3))}{a_1^2 \lambda}, Q_2 = \frac{2\Omega_c(r_x(x_{10}^3 + x_{10} y_{10}^2) + r_y(y_{10}^3 + x_{10}^2 y_{10}))}{\lambda a_1^2}, \\ Q_3 &= \frac{2\Omega_c(r_x y_{10} z_{10} - r_y x_{10} z_{10})}{\lambda a_1}, Q_4 = \frac{2\Omega_c(r_x x_{10} z_{10} + r_y y_{10} z_{10})}{\lambda a_1}, \\ Q_5 &= -\frac{2\Omega_c(r_x(x_{10}^2 y_{10} + y_{10}^3) - r_y(x_{10} y_{10}^2 + x_{10}^3))}{\lambda a_1^2}, Q_6 = -\frac{2\theta_{n0}\Omega_n(r_x(x_{10}^3 + x_{10} y_{10}^2) + r_y(y_{10}^3 + x_{10}^2 y_{10}))}{\lambda a_1^2}, \\ Q_7 &= \frac{2\theta_{n0}\Omega_n(r_x x_{10} z_{10} + r_y y_{10} z_{10})}{\lambda a_1}, Q_8 = -\frac{2\theta_{n0}\Omega_n(r_x y_{10} z_{10} - r_y x_{10} z_{10})}{\lambda a_1}, Q_9 = -\frac{2\theta_{n0}\Omega_n r_z a_1}{\lambda}, \\ Q_{10} &= -\frac{2\theta_{n0}\Omega_n z_{10} r_z}{\lambda} \end{aligned} \quad (10)$$

다 시선(Line of Sight: LOS) 방향 $\vec{r}_{LOS}=[r_x \ r_y \ r_z]$ 으로 투영될 경우, 미세도플러 주파수는 식 (9)와 같이 7차원 변수들로 구성된 함수로 정의되며, 이때 식 (9)의 각 Q 값들은 식 (10)과 같이 정의된다. 따라서 회전축 위에 위치한 산란원의 미세도플러 주파수 값이 측정될 경우, 식 (9)을 사용한 최적화 알고리즘을 통해 산란점 초기 위치 $\vec{r}_0=[x_{10} \ y_{10} \ z_{10}]^T$ 와 미세운동 변수들의 추정이 가능해진다.

회전축 위에 있지 않는 산란점의 경우, 회전운동은 더 이상 단위행렬이 아니기 때문에 회전, 원추 및 장동에 대한 미세운동을 모두 고려해야 한다. 따라서 이러한 미세운동을 모두 고려한 실시간 미세도플러 주파수는 다음 행렬식과 같이 정의된다.

$$f_{doppler}(x_{10}, y_{10}, z_{10}, l_x, l_y, l_z, \Omega_s, \Omega_c, \Omega_n, \theta_{n0}, t) = \frac{2}{\lambda} [((A'_T B_T A_T^T + A_T B'_T A_T^T + A'_T B_T A_T^T) R_c R_s + R_v R'_c R_s + R_v R_c R'_s) \vec{r}_0]_{LOS} \quad (11)$$

이때 위 식 (11)의 경우, 식 (9)와 달리 최적화 알고리즘에서 추가적으로 실시간 회전운동 축 $\vec{w}_s(t)$ 와 회전 각속도를 추정해야 한다.

2-2 제안된 기법

본 논문에서 제안된 기법은 회전운동 축 위에 있는 머리 끝부분 산란점의 변수 추정과 회전운동 축 위에 있지 않은 나머지 몸통부분 산란점의 변수 추정 2단계로 구성된다(그림 2).

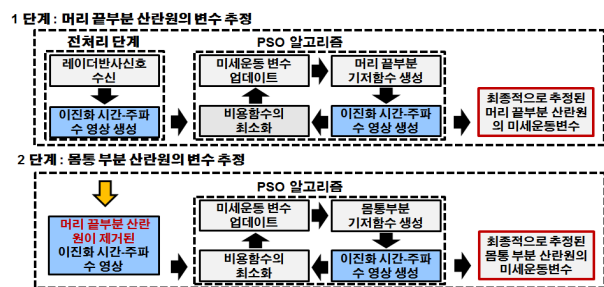


그림 2. 제안된 기법
Fig. 2. Proposed method.

먼저 전처리 단계에서 레이더 반사 신호를 획득한 후, 에너지가 가장 큰 거리성분의 신호에 short-time Fourier transform(STFT)^[5]을 사용하여 미세도플러 주파수의 시간-주파수 영상을 형성한다. 이때 산란점 크기에 의한 영향을 없애기 위하여 가장 큰 픽셀의 70 % 이상의 값들을 1로, 나머지는 0으로 정의하여 이진화 된 시간-주파수 영상 Im_{all} 을 생성한다.

다음으로 최적화 알고리즘 PSO를 이용하기 위하여, 임의의 초기 변수 값으로 생성된 식 (9)의 1차원 미세도플러 함수에서 i 번째 순서 t_i 의 주파수 값 $f_j(t_i)$ 에 해당하는 2차원 시간-주파수 영상 $Im_{tip}(t_i, f_j(t_i))$ 에 1을, 해당되지 않는 부분은 0으로 설정한다. 이후, 이 영상을 전처리 단계에서 생성된 이진화 영상 Im_{all} 과 비교하여 머리 끝부분 산란점의 초기 위치좌표, 원추 각속도, 장동 각속도 및 크기를 추정한다. 이 과정은 식 (9)를 이용한 6차원 최적화 과정이며, 이때 사용되는 6차원 세대(particle) 벡터는 다음과 같다.

$$\vec{p}_g = [x_{10}, y_{10}, z_{10}, \Omega_c, \Omega_n, \theta_{n0}] \quad (12)$$

위 식에서 g 는 PSO 알고리즘의 세대 번호이다. 이때 PSO 알고리즘에 사용되는 임의의 세대들은 다음의 규칙에 따라 진화를 수행한다^[3].

$$\vec{p}_g = \omega \vec{p}_{g-1} + c_1(\vec{p}_{pb} - \vec{p}_{g-1}) + c_2(\vec{p}_{gb} - \vec{p}_{g-1}) \quad (13)$$

위 식에서 \vec{p}_{pb} 는 개별 최적화 세대벡터, \vec{p}_{gb} 는 군중 최적화 세대벡터, ω 는 관성 가중치, c_1, c_2 는 가속도 계수이다. 최적화에 사용되는 비용함수는 각 세대 벡터를 식 (9)에 적용하여 얻어지는 이진화 미세도플러 영상 Im_{tip} 과 Im_{all} 의 동일한 위치 정합이며, 이는 다음 식과 같이 두 영상의 원소별(elementwise) 곱 후의 합이다.

$$J = \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} Im_{all}(i, j) Im_{tip}(i, j) \quad (14)$$

이는 J 가 최대가 되는 방향으로 각 세대 벡터를 갱신하여 최적의 변수를 찾는 것이다. 식 (14)를 최대화 하는 산란원의 최적 변수들을 추출한 후, 나머지 산란원의 변수 추정을 위하여 Im_{all} 에서 Im_{tip} 영역을 제거한다.

PSO를 이용하여 머리 끝부분의 좌표 $[x_{10}, y_{10}, z_{10}]$ 와 운동변수 $[\Omega_c, \Omega_n, \theta_{n0}]$ 를 먼저 추정할 경우, 이 산란점 좌표는 회전운동 축 위에 위치하므로 이후 몸통 부분의 PSO 추정에서 회전운동 축의 단위벡터를 추가적으로 추정할 필요가 없다. 따라서 제안된 알고리즘은 먼저 머리 끝부분 산란점의 6차원 최적화를 수행한 뒤, 앞서 추정된 운동변수 $[\Omega_c, \Omega_n, \theta_{n0}]$ 와 회전운동 축 정보를 사용하여 몸통 산란점의 위치좌표 $[x_{20}, y_{20}, z_{20}]$ 및 회전운동 각속도 Ω_s 을 찾는 4차원 최적화 문제로 몸통 산란점의 추정을 수행한다. 몸통 산란점 추정은 앞 단계와 마찬가지로 식 (11)의 미세도플러 함수, PSO 및 식 (14)의 비용함수를 이용하여 최적의 변수를 찾는 것이다. 몸통부분 산란점의 최적 변수들을 추출한 후에, 여분의 산란점 정보 추출을 위하여 다시 $(Im_{all} - Im_{tip})$ 에서 몸통 산란점의 이진화 영상 Im_{body} 을 제거한다.

두 번째 추정에서 Ω_s 가 성공적으로 추출된 후에는 나머지 산란점의 좌표를 추출하는 3차원 최적화 과정을 동일하게 수행하며, Im_{all} 의 전체 픽셀 값이 매우 작은 값이 될 때까지 알고리즘을 반복한다.

III. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 시, 실제 스킨드미사일을 이용하여 점 산란원을 모델링하였다(그림 3). 이때 제안된 기법의 검증을 위하여 스킨드미사일의 머리 끝부분의 산란점 1개와 몸통 부분의 산란점 2개에서 반사 신호가 나타난다고 가정하였다. 이때 사용된 미세운동, 산란점 위치 및 레이더 관측 관련 변수들은 표 1과 같다. 대역폭 50 MHz의 X-밴드 처프 모노펄스 신호를 이용하여 10,000개의 펄스별 수신 신호들을 모델링한 후^{[6],[7]}, 에너지가 가장 큰 거리성분의 데이터에 STFT를 적용하여 2차원 시간-주파수 영상을 구성하였다.

그림 4에서 보는 바와 같이, 미세운동을 하는 3개의 산란점으로 인해 시변의 미세도플러 주파수가 형성되었다. 머리 끝 산란점의 경우, 원추운동이 지배적인 성분이기 때문에 미세도플러 주파수의 변화가 원추운동의 주기를 따라 변화하고, 중심으로부터의 거리가 가장 크기 때

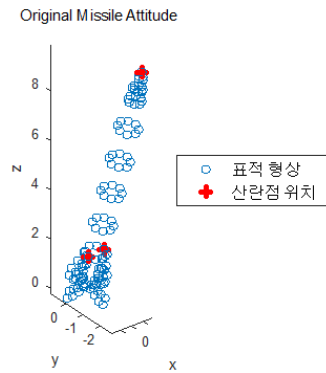


그림 3. 점 산란원 모델
Fig. 3. Point scatterer model.

표 1. 레이더 및 운동 변수
Table 1. Radar and motion parameters.

관측 시간	1 초
펄스 반복 주기	0.0001 초
회전운동 축	[0.045, -0.2549, 0.9659]
산란점 위치	[0.4602, -2.6087, 9.8865](끝점), [0.4585, -0.4154, 1.6955](몸통 1), [-0.3028, -0.4838, 1.7195](몸통 2)
산란점 크기	0.8885(끝점), 0.7713(몸통 1), 0.7596(몸통 2)
Ω_s	$2\pi \times (5 \text{ Hz})$
Ω_c	$2\pi \times (3 \text{ Hz})$
θ_n	1°
Ω_n	$2\pi \times (12 \text{ Hz})$
LOS	[-0.866, 0.5, 0]

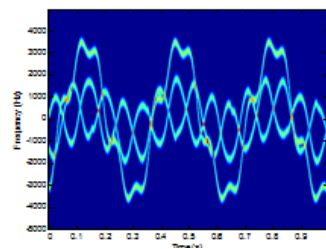


그림 4. 3개 산란점들의 미세도플러 주파수 영상
Fig. 4. Micro-Doppler image of three scatterers.

문에 전체 진폭이 상대적으로 다른 산란점보다 크게 나타난다. 반면에, 몸통 산란점은 원추운동과 회전운동이 동

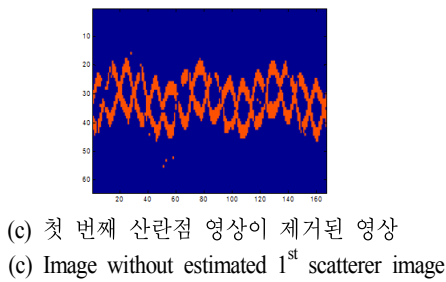
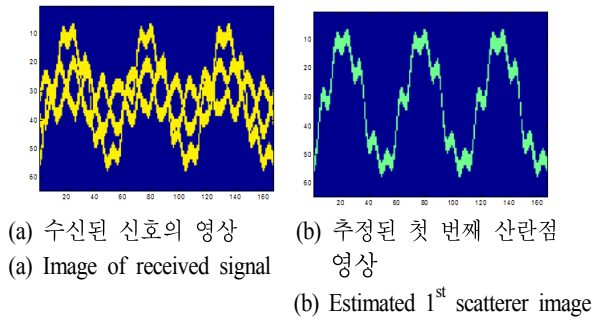


그림 5. 첫 번째 산란원 미세도플러 추정 및 제거 영상
Fig. 5. Result of micro-Doppler estimation and removal image of the first scatterer.

시에 존재하므로 더 복잡한 궤적을 형성하고, 중심으로부터 거리가 상대적으로 가까우므로 진폭의 변화가 머리 끝 산란점에 비하여 작음을 알 수 있다.

식 (9) 및 PSO를 이용하여 추정된 머리 끝부분 산란점의 미세도플러의 제거 결과는 그림 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이, 성공적으로 미세도플러가 추출되었으며, 전체 이진화 영상에서 추정된 영상의 픽셀이 제거됨을 확인할 수 있었다. 마찬가지로 나머지 두 산란원도 그림 6, 7과 같이 성공적으로 제거됨을 확인할 수 있었다.

표 2와 3은 추정 결과와 원래 값들 간의 오차이며, 괄호 안은 원래 값에 대한 오차율을 나타낸다. 표 2에서 보는 바와 같이, 시간에 따른 미세도플러의 전반적인 분포를 결정하는 운동변수 Ω_c , θ_n 및 Ω_n 이 0.4% 이내의 오차로 매우 정확하게 추정됨을 확인할 수 있다. 반면에 산란점 좌표 및 회전운동 축의 경우, 최적화 알고리즘에서 발생하는 국부최소(local minima)로 인하여 무수히 많은 해가 존재하게 되고, 이로 인해 x 좌표에 오차가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 하지만, x 좌표 값이 상대적으로

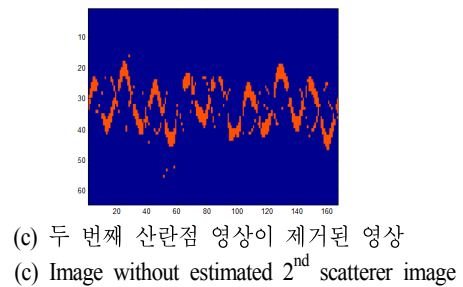
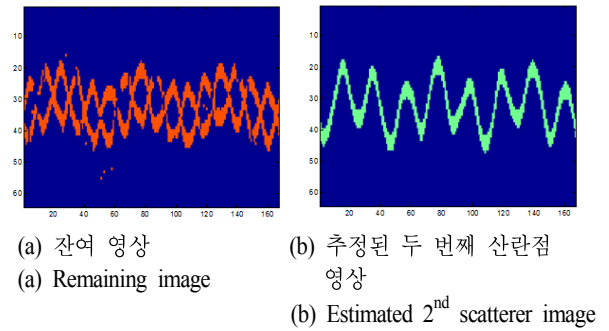


그림 6. 두 번째 산란원 미세도플러 추정 및 제거 영상
Fig. 6. Result of micro-Doppler estimation and removal image of the second scatterer.

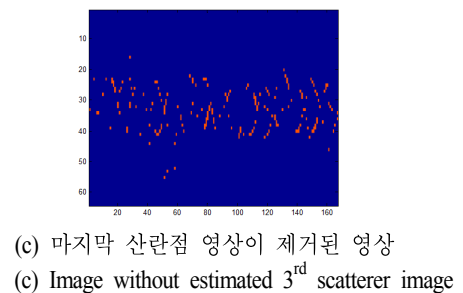
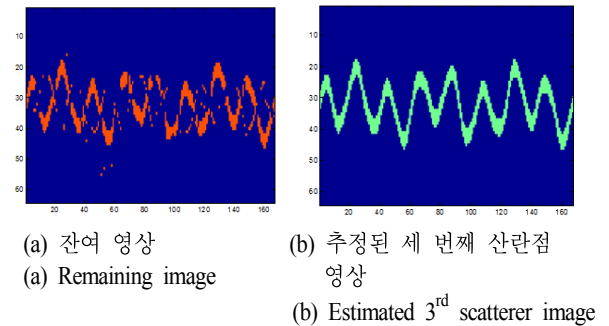


그림 7. 세 번째 산란원 미세도플러 추정 및 제거 영상
Fig. 7. Result of micro-Doppler estimation and removal image of the third scatterer.

표 2. 운동 변수 추정오차

Table 2. Estimated motion errors.

Ω_c	0.0251 rad(0.13 %)
θ_n	0.0002 rad(0.02 %)
Ω_s	0.0245 rad(0.34 %)
Ω_n	0.1068 rad(0.03 %)

표 3. 좌표 추정오차

Table 3. Estimated coordinate errors.

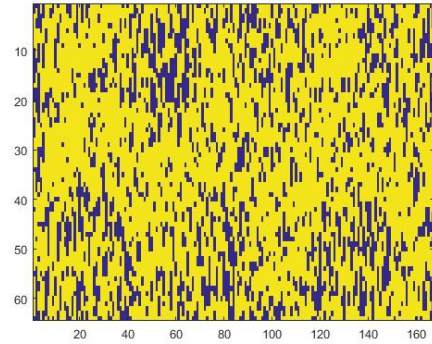
x_1	0.0443 m(9.63 %)	x_3	0.0063 m(2.1 %)
y_1	0.0048 m(0.18 %)	y_3	0.0002 m(0.04 %)
z_1	0.0825 m(0.83 %)	z_3	0.0564 m(3.3 %)
x_2	0.0014 m(0.31 %)	l_x	0.0039(8.67 %)
y_2	0.0067 m(1.61 %)	l_y	0.0025(0.98 %)
z_2	0.0068 m(0.40 %)	l_z	0.0005(0.05 %)

로 매우 작은 값이고, y 및 z 축 좌표가 매우 정확하게 추정되기 때문에 제안된 기법은 산란점들의 위치 좌표도 매우 정확하게 추출할 수 있음을 알 수 있었다.

백색 가우시안 잡음의 영향을 분석하기 위하여 Signal-to-noise ratio(SNR)를 변화시켜 미세운동변수들의 추정 오차 결과를 분석하였다(그림 8). 시뮬레이션 결과, 0 dB 이하에서 추정오차가 증가하였다. 이는 수신신호로부터 생성된 이진화 시간-주파수 영상이 더 이상 미세도플러 신호의 형상을 나타내지 못하기 때문이다.

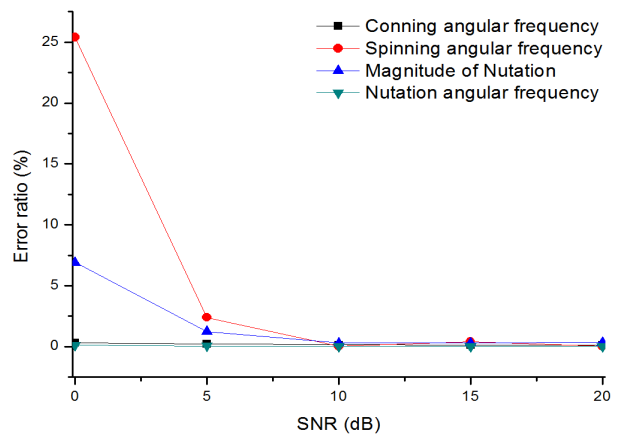
IV. 결 론

본 논문에서는 미세운동을 하는 미사일 표적에 대한 미세도플러 주파수 특성을 이용하여 효과적인 미세운동 및 산란점 위치 변수추출 기법을 제시하였다. 제안된 기법은 로드리게스의 회전 공식을 이용하여 미사일 표적의 대표적인 미세운동들인 회전, 원추 및 장동운동을 모델링한 뒤, 이로 인하여 생성되는 점 산란원의 미세도플러 주파수 함수를 사용하여 PSO 최적화를 수행하는 것이다. 특히, 이 기법은 각 산란원별 신호들을 분리(decomposition)하여 효과적인 미지변수 추출이 가능함을 보였다. 점 산란원 표적을 이용한 시뮬레이션 결과, 제안된 기법은 미세운동변수들을 오차범위 0.4 % 이내로 추출하였고,



(a) SNR=0 dB에서 수신된 신호의 영상

(a) Image of received signal with SNR=0 dB



(b) SNR에 따른 미세운동 변수 추정 오차

(b) Error of estimated motion parameters versus SNR

그림 8. 이진 영상(SNR=0 dB)과 SNR에 따른 미세운동변수의 추정 결과

Fig. 8. Binary image(SNR=0 dB) and estimation results versus SNR.

산란원의 위치벡터들을 높은 정확도로 추정하였다. 하지만 0 dB 이하의 SNR 환경에서는 이진영상에 발생하는 잡음의 영향으로 회전운동 각주파수의 추정오차가 25.4 % 까지 증가하였다. 따라서 $SNR \leq 0$ dB에서는 수신신호에 잡음을 분해하는 알고리즘을 적용하여 SNR을 높여야함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 미세운동의 수학적 모델링을 바탕으로 한 점 산란원 시뮬레이션으로 제안된 기법을 검증하였다. 하지만 실제 미세운동을 하는 표적은 각도에 따른 가림(occlusion) 및 산란점의 각도 의존성(angular dependency)

이 존재할 수 있기 때문에, 본 논문의 추정 결과와 차이가 존재할 수 있다. 현재 저자들은 이와 관련하여 실제 미세 운동을 하는 표적으로부터 레이다 반사 신호를 측정하여 미세운동변수를 추정하기 위한 연구를 수행하고 있으며, 향후에 실제 상황에서의 문제점 및 개선 결과를 후속 논문으로 다룰 예정이다.

References

[1] V. C. Chen, *The Micro-Doppler Effect in Radar*, Artech House, 2001.
 [2] V. C. Chen, F. Li, S. Ho, and H. Wechsler, "Micro-Doppler effect in radar", *IEEE Trans. Aero. Electron Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 2-21, Oct. 2006.

[3] J. Kennedy, R. C. Eberhart, *Swarm Intelligence*, Academic Press, 2001.
 [4] J. H. Jung, K. T. Kim, S. H. Kim, and S. H. Park, "Micro-Doppler extraction and analysis of the ballistic missile using RDA based on the real flight scenario", *Prog. Electromag. Res. M*, vol 37, pp. 83-93, Jun. 2014.
 [5] S. Qian, *Introduction to Time-Frequency and Wavelet Transforms*, Prentice Hall, 2002.
 [6] B. Mahafza, *Radar Systems and Design using MATLAB*, Champman & Hall/CRC Press LLC, Jan. 2000.
 [7] 강병수, 배지훈, 정성은, 김찬홍, 김경태, "ISAR 영상 형성을 위한 회전운동보상 기법 연구", *한국전자과학 회논문지*, 27(1), pp. 69-75, 2016년 1월.

최 인 오



2012년 8월: 부경대학교 전자정보통신공학과 (공학사)
 2014년 8월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)
 2015년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 미세도플러 분석, 레이다 표적인식, 레이다 신호처리, 패턴인식, 스펙트럼 추정

김 시 호



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2006년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
 2011년 1월~현재: 국방과학연구소 연구원
 [주 관심분야] 레이다 신호처리, 레이다 표적 인식

정 주 호



1991년 2월: 공군사관학교 전자공학과 (공학사)
 1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2007년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2013년 2월: 고려대학교 경영학과(MBA)
 2013년 3월~현재: 한백에너지 대표이사
 2016년 1월~현재: KAIST 국방무인화기술 특화연구센터 연구교수
 [주 관심분야] 풍력단지 EMI/EMC 분석, 포탄 RCS 분석, 레이더 표적식별, 방산경제 및 R/D 전략 등

박 상 홍



2004년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 2007년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2010년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학 (공학박사)
 2010년 9월~현재: 부경대학교 전자공학과 부교수

[주 관심분야] 미세도플러 분석, 풍력단지 EMI/EMC 분석, 레이더 표적인식, 레이더영상, 레이더 신호처리, 등

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
 2012년 9월~현재: 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실장
 [주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정