

미세운동을 가지는 탄두 및 기만체의 새로운 레이다 수신신호 모델링 방법

Modeling Method of Receiving Radar Signals from Warhead and Decoy with Micro-Motion

최인오 · 박상홍* · 강기봉 · 김경태

In-Oh Choi · Sang-Hong Park* · Ki-Bong Kang · Kyung-Tae Kim

요 약

최근 탄두와 기만체 간의 변별을 수행하기 위하여 미세도플러 현상과 관련된 연구들이 활발히 진행되어 왔다. 여기서, 탄두와 기만체는 다양한 형상들로 정의될 수 있으며, 이들은 일반적으로 각각의 고유한 미세운동을 가지면서 기동한다. 이때, 이 표적들의 미세도플러 현상은 크기 및 위상 변조 특성으로 나뉘어 해석될 수 있으며, 대부분의 기존 연구들에서는 다양한 형상에 상관없이 크기 변조 특성을 근사적인 수학적 식으로만 정의하였다. 하지만, 보다 효율적인 변별을 위해서는 이 표적들의 크기 변조 현상에 대한 정확한 수학적 표현이 필요하다. 본 연구에서는 물리광학 기반의 크기 변조 특성을 모델링하기 위하여 다양한 형상의 탄두 및 기만체에 대한 새로운 레이다 수신신호 모델을 제안한 후, 전자기 수치해석 도구 및 캐드 모델을 사용한 수신신호들과 비교하여 제안된 레이다 수신신호 모델의 타당성을 검증하였다.

Abstract

Recently, several studies were conducted on the micro-Doppler(MD) phenomenon to identify a warhead from decoys. Both, the warhead and decoy, can be modeled as various shapes and maneuver with their own micro-motion. Their MD phenomenon can be demonstrated by amplitude modulation and phase modulation. Most studies have utilized approximate solutions to express the amplitude modulation regardless of various warhead and decoy shapes. However, the exact solution of the amplitude modulation is required for more effective warhead identification. In this study, we proposed a new modeling method of receiving radar signals from warheads and decoys based on physical optics. The proposed solution was evaluated using an electromagnetic prediction technique and computer-aided design models.

Key words: Effective Scatterer, Occlusion Effect, Micro-Doppler Effect, Coning Angle, Wobbling Angle Amplitude

I. 서 론

고도 100 km 이상의 외기권 내에 진입한 탄도미사일은

레이다에 의한 탐지 및 요격 미사일에 의한 격추를 방지하기 위하여 탄두와 함께 기만체를 방출한다^{[1]~[5]}. 그 결과, 레이다 신호처리 분야에서 탄두와 기만체간의 변별문

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

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

· Manuscript received January 3, 2019 ; Revised February 11, 2019 ; Accepted February 11, 2019. (ID No. 20190103-002)

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

제가 매우 중요한 이슈로 떠오르고 있다.

일반적으로 탄두와 기만체는 고유의 미세운동을 가지면서 기동한다. 이때, 탄두의 미세운동은 회전(spinning), 원추(coning) 및 장동(nutation)으로 구성되는 반면, 기만체의 미세운동은 떨림(wobbling)으로 정의된다. 만약 이 표적들로부터 레이더 수신신호를 획득할 경우, 이 신호에는 미세운동에 의한 변조 현상이 나타나게 된다. V. Chen^[1]은 이러한 변조 특성을 미세 도플러 현상이라고 정의하였으며, 이 현상과 미세운동 방정식 간의 관계를 수학적으로 규명하였다. 이후, 탄두 및 기만체 표적에서 수신되는 레이더 수신신호의 보다 심층적인 분석을 위하여 H. Gao^[2]는 원뿔 형상을 가지는 탄두 표적을 3개의 유효(effective) 산란원 구조로 정의하였다. 여기서, “유효”는 산란원의 위치가 관측각도(aspect-angle)에 따라 변화함을 의미한다. 게다가 H. Gao^[2]는 원뿔 표적에 대한 레이더 수신신호의 변조 특성을 크기 및 위상 측면에서 나누어 정의하였다. 먼저, 크기 변조는 원뿔 형상에 대한 radar cross section (RCS) 변화를 의미하는 반면, 위상 변조는 미세운동에 의한 미세도플러 주파수 변화를 의미한다. 여기서 주목할 점은 관측각도 변화에 따라 특정한 유효 산란원이 보이지 않는 현상인 가려짐(occlusion) 효과를 정의한 것이다. 하지만, 대부분의 연구들^{[2]~[4]}에서는 수식의 간편성을 위하여 이 효과를 근사적인 방식으로 표현하였으며, 그 과정에서 실제 RCS의 크기 변화 모델링은 고려하지 않았다. 그 결과, 최근에 수행된 탄두와 기만체간의 변별 연구는 레이더 수신신호에 대한 시간-주파수(joint time-frequency: JTF) 영상을 획득한 후, 고전적인 영상처리기법들 중 하나인 2차원 모멘트 추출기법으로 수행되어 왔으며^[3], 이는 변별 시 많은 계산량을 야기하였다. 따라서 보다 효율적인 특징벡터를 추출하기 위해서는 정확한 레이더 수신신호 모델링을 통해 탄두와 기만체간의 근본적인 미세운동 차이점이 무엇으로 기인되는 것인지 수학적으로 규명해야 한다.

본 연구에서는 향후 보다 효과적인 변별 연구를 수행하기 위하여 다양한 형상의 탄두 및 기만체에 대한 새로운 레이더 수신신호 모델링 기법을 제안한다. 먼저 다양한 형상의 표적들에 대한 RCS 모델링을 수행하기 위하여 대표적인 고주파 해석 기법인 physical optics(PO)^[5]를 사

용하였다. 이를 바탕으로 새로운 레이더 수신신호 모델링을 수행한 후, 이를 전자기 수치해석 도구(VIRAF) 및 computer-aided design(CAD) 모델을 사용한 수신신호와 비교하여 제안된 모델링 기법의 타당성을 검증하였다.

II. 제안된 기법 및 미세운동 차이점 분석

2-1 RCS 모델링

다양한 형상들에 대한 RCS 모델링을 위하여 탄두와 기만체 표적을 크게 1) 원뿔, 2) 날개 달린 원뿔 및 3) 원통으로 정의한다(그림 1 참조). 이때 이 표적들에 대한 RCS 모델링은 고주파 근사기법인 PO를 사용한다^[5].

먼저 그림 1(a)의 원뿔 형상에 대한 RCS $\sigma_{con}(\theta_a)$ 는 다음과 같이 근사식으로 표현된다^[5].

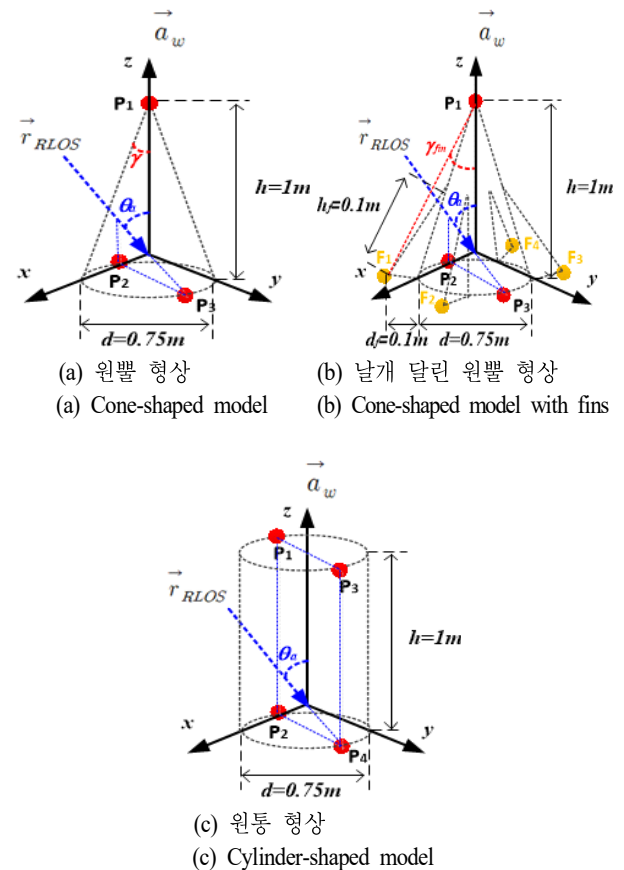


그림 1. 탄두와 기만체의 다양한 형상들
Fig. 1. Various shapes for warhead and decoy.

$$\sigma_{con}(\theta_a) = \frac{\lambda h \tan(\alpha)}{8\pi \sin(\theta_a)} \tan^2(\theta_a + \alpha), \quad (1)$$

여기서 $\tan(\alpha) = (d/2)/h$, λ 는 파장, h 과 d 는 각각 원뿔의 높이 및 직경, 그리고 θ_a 는 원통 바닥의 법선벡터 \vec{a}_w 와 레이더 시선 방향벡터(radar line-of-sight: RLOS) \vec{r}_{RLOS} 로 결정되는 관측각도이며, 다음과 같이 표현된다^[5].

$$\theta_a = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{a}_w \cdot \vec{r}_{RLOS}}{\|\vec{a}_w\|_2 \|\vec{r}_{RLOS}\|_2} \right), \quad (2)$$

여기서 $\|\cdot\|_2$ 는 2-norm 연산자이다.

다음으로 날개달린 원뿔 형상(그림 1(b))의 경우, 앞서 정의된 원뿔의 RCS 외에 j 번째 날개 F_j 에 대한 RCS $\sigma_{fin,j}(\theta_{a,j}, \phi_{a,j})$ 를 다음과 같이 추가적으로 고려해야 한다^[5].

$$\sigma_{fin,j}(\theta_{a,j}, \phi_{a,j}) = \frac{4\pi A^2 \cos^2(\phi_{a,j})}{\lambda^2} \sigma_0, \quad (3)$$

여기서

$$\sigma_0 = \frac{[\sin^2(\beta) - \sin^2(\gamma/2)]^2 + \sigma_{01}}{\beta^2 - (\gamma/2)^2},$$

$$\sigma_{01} = 0.25 \sin(\theta_{a,j}) ((2h_f/d_f) \cos(\theta_{a,j}) \sin(\gamma) - \sin(\theta_{a,j}) \sin(2\beta))^2,$$

$\beta = 2\pi h_f \sin(\phi_{a,j}) \cos(\theta_{a,j}) / \lambda$, $\gamma = 2\pi d_f \sin(\phi_{a,j}) \sin(\theta_{a,j}) / \lambda$, $A = h_f d_f / 2$, d_f 와 h_f 는 날개의 직경 및 높이, 그리고 $\theta_{a,j}$ 와 $\phi_{a,j}$ 는 식 (2)와 유사하게 j 번째 날개의 법선벡터와 \vec{r}_{RLOS} 로 결정되는 고각 및 방위각이다.

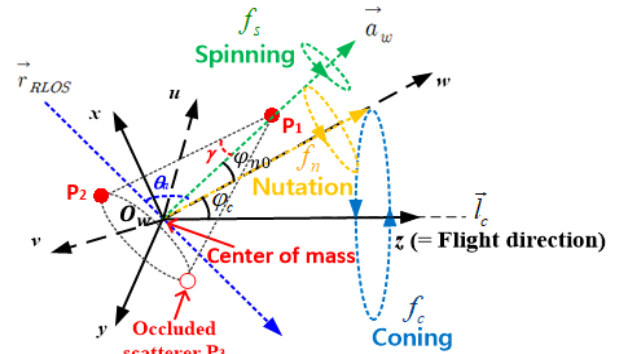
마지막으로 그림 1(c)의 원통 형상에 대한 RCS $\sigma_{cyl}(\theta_a)$ 는 다음과 같다^[5].

$$\sigma_{cyl}(\theta_a) = \frac{\lambda d \sin(\alpha)}{8\pi \cos^2(\theta_a)}, \tan(\alpha) = \frac{d}{2h}. \quad (4)$$

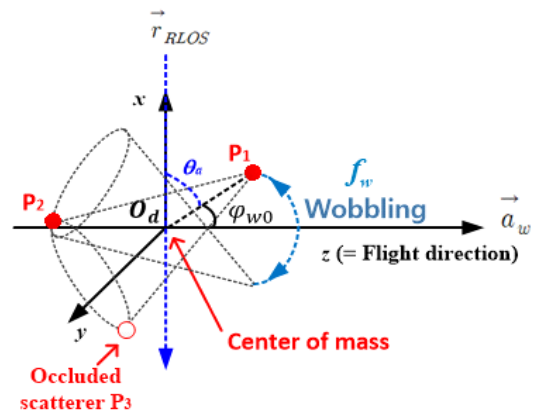
2.2 제안된 레이더 수신신호 모델링

2.2에서는 앞서 서술된 수식들을 사용하여 RCS 크기 변화 현상을 표현하기 위한 새로운 레이더 수신신호 모

델을 제안한다. 먼저 탄두에 대한 레이더 수신신호 모델을 위하여 크게 원뿔 형상 및 날개 달린 원뿔 형상의 2가지 모델을 사용한다^{[2]~[4]}. 만약 원뿔 형상 탄두의 병진운동이 사전에 보상되고, z 축을 기동방향이라고 가정할 경우^[4], 탄두의 미세운동은 그림 2(a)와 같이 회전, 원추 및 장동운동으로 구성된다. 원뿔 형상의 탄두는 일반적으로 3개의 유효 산란원^[2]들로 구성되며, 이 산란원들은 원통 바닥의 법선벡터 \vec{a}_w 와 레이더 시선 방향벡터 \vec{r}_{RLOS} 에 의해 결정되는 평면에 항상 위치하기 때문에 원뿔 형상에서는 회전운동에 의한 영향이 나타나지 않는다^[3]. 따라서 원뿔 형상 탄두의 미세운동은 원추 및 장동운동으로만 구성된다. 이때 원추운동의 모델링은 로드리게스(Rodrigues)



(a) 탄두의 미세운동
(a) Micro-motion for warhead



(b) 기만체의 미세운동
(b) Micro-motion for decoy

그림 2. 탄두와 기만체의 미세운동
Fig. 2. Micro-motion for warhead and decoy.

방정식을 사용하여 정의될 수 있다^[4]. 만약 유효 산란원이 원추운동 축 $\vec{l}_c = [l_x, l_y, l_z]^T$ 을 중심으로 원추운동 주파수 f_c 에 의해 회전될 경우, 원추운동 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{R}_c = \mathbf{I} + \mathbf{L} \sin(2\pi f_c t) + \mathbf{L}^2 (1 - \cos(2\pi f_c t)), \quad (5)$$

여기서 \mathbf{I} 는 3×3 단위행렬, 그리고 \mathbf{L} 은 다음과 같다.

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & -l_z & l_y \\ l_z & 0 & -l_x \\ -l_y & l_x & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

다음으로 장동운동은 원통 바닥의 법선벡터 \vec{a}_w 와 원추운동 축 \vec{l}_c 이 이루는 평면에서의 정현파적인 떨림으로 정의되며^[4](그림 2(a) 참조), 이 평면을 구성하기 위해서는 기존 좌표계 $[x, y, z]^T$ 에서의 각 산란원 위치 벡터들을 새로운 좌표계 $[u, v, w]^T$ 로 변환해야 한다. 이후, 변환된 벡터들은 장동 주파수 f_n 과 장동 각도 크기 ϕ_{n0} 으로 구성된 실시간 장동 각도 $\phi_n(t) = \phi_{n0} \sin(2\pi f_n t)$ 로 회전된다. 회전된 벡터들은 다시 기존 좌표계 $[x, y, z]^T$ 로 변환된다. 이 과정은 다음 같은 회전 행렬들로 표현된다.

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{T} \cdot \mathbf{R}_a \cdot \mathbf{T}^T, \quad (7)$$

여기서

$$\mathbf{R}_a = \begin{bmatrix} \cos(\phi_n(t)) & -\sin(\phi_n(t)) & 0 \\ \sin(\phi_n(t)) & \cos(\phi_n(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

\mathbf{T} 는 $[x, y, z]^T$ 좌표계 내에서 $[u, v, w]^T$ 좌표계 단위 벡터들로 구성된 3×3 행렬이다. 만약 m 번째 유효 산란원이 초기위치 $\vec{r}_{w,m}(0) = [x_m, y_m, z_m]^T$ 에서 원추 및 장동을 가질 경우, 이 산란원의 실시간 위치벡터는 다음과 같다.

$$\vec{r}_{w,m}(t) = \mathbf{R}_n \cdot \mathbf{R}_c \cdot \vec{r}_{w,m}(0). \quad (9)$$

이때 초기위치 $\vec{r}_{w,m}(0)$ 는 일반적으로 원통 바닥의 법선벡터 \vec{a}_w 와 원추운동 축 \vec{l}_c 가 이루는 평면을 기준으로 원추 각도 ϕ_c 만큼 회전된다(그림 2(a) 참조). 최종적으로 원뿔형상 탄두에 대한 기저대역 continuous wave(CW) 기반의

새로운 레이더 수신 신호는 식 (1)과 함께 다음과 같이 정의된다.

$$s_{w1}(t) = \sum_{m=1}^3 \sigma_{con}(\theta_a) h_m(t) \times \exp\left(\frac{j4\pi}{\lambda} \vec{r}_{w,m}(t) \cdot \vec{r}_{RLOS}\right), \quad (10)$$

여기서 $h_m(t)$ 는 m 번째 유효 산란원의 가려짐 효과를 표현하기 위한 함수^[3]로, 그림 2(a)과 같이 θ_a 와 사이각 γ 에 의해 결정되는 함수이며, 경험적으로 유효 산란원 P_1 의 RCS 크기가 P_2 및 P_3 의 RCS 값들보다 약 10배 정도 크기 때문에 표 1과 같이 정의된다. 이때 식 (10)의 RCS $\sigma_{con}(\theta_a)$ 는 미세운동으로 변화하는 실시간 원통 바닥의 법선벡터 $\vec{a}_w = \mathbf{R}_c \cdot \mathbf{R}_n \cdot \vec{r}_{w,1}(0)$ 을 식 (1)에 대입하여 정의된다.

다음으로 날개 달린 원뿔 형상의 탄두에 대한 레이더 수신신호 모델링을 고려한다(그림 1(b)). 이때, 날개는 유효 산란원들과 달리 고정된 산란원으로 더 이상 관측각도에 따라 위치가 변화하지 않는다^[2]. 따라서 이러한 산란원들은 회전, 원추 및 장동운동을 모두 가진다. 이때 j 번째 날개 산란원 F_j 에 대한 실시간 위치벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{r}_{F,j}(t) = \mathbf{R}_n \cdot \mathbf{R}_c \cdot \mathbf{R}_s \cdot \vec{r}_{F,j}(0), \quad (11)$$

여기서 \mathbf{R}_s 는 \vec{a}_w 를 회전축으로 원추운동 주파수 f_c 와 함께 회전하는 회전운동 행렬이며, $\vec{r}_{F,j}(0)$ 는 j 번째 날개 산란원 F_j 의 초기 위치 벡터이다. 결과적으로, 날개 달린 원뿔형상의 탄두에 대한 새로운 레이더 수신신호 모델

표 1. 원뿔형상 탄두의 가려짐 효과^[3]

Table 1. Occlusion effect of cone-shaped warhead^[3].

	$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
$0^\circ \leq \theta_a < \gamma$	1	0.1	0.1
$\gamma \leq \theta_a < 90^\circ - \gamma$	1	0.1	0
$90^\circ - \gamma \leq \theta_a < 90^\circ$	1	0.1	0
$90^\circ \leq \theta_a < 180^\circ - \gamma$	1	0.1	0.1
$180^\circ - \gamma \leq \theta_a \leq 180^\circ$	0	0.1	0.1

은 식 (3), (10) 및 (11)과 함께 다음과 같이 정의된다.

$$s_{w2}(t) = s_{w1}(t) + \sum_{j=1}^{N_{fin}} \sigma_{fin,j}(\theta_{a,j}) \exp\left(\frac{j4\pi}{\lambda} \vec{r}_{F,j}(t) \cdot \vec{r}_{RLOS}\right), \quad (12)$$

여기서 N_{fin} 은 날개의 개수이다. 여기서 주목할 점은 날개마다 고정된 단일 산란원이 한 개씩 존재하기 때문에 날개에 대한 가려짐 효과 함수는 존재하지 않으며, 이때 식 (3)의 RCS는 $\theta_{a,j} \leq \gamma_{fin}$ 의 조건에서 급격히 감소한다(그림 1(b) 참조).

다음으로 기만체에 대한 레이더 수신신호 모델링을 위하여 원뿔 형상 및 원통 형상의 2가지 모델을 사용한다^{[2],[3]}. 먼저 원뿔 형상 기만체의 미세운동은 앞서 언급된 탄두와 달리 떨림으로 정의된다. 이때 떨림 운동은 탄두의 미세운동과 달리 기동방향(z축)에 상관없이 임의의 떨림 운동 축 \vec{l}_w 를 가지며, 식 (7)의 장동운동과 동일한 방식으로 정의될 수 있다^[2](그림 2(b)). 이때 원뿔 형상 기만체의 m 번째 산란원에 대한 실시간 위치벡터 $\vec{r}_{d1,m}(t)$ 는 다음과 같다.

$$\vec{r}_{d1,m}(t) = \mathbf{R}_w \cdot \vec{r}_{d1,m}(0), \quad (13)$$

여기서 \mathbf{R}_w 는 떨림 주파수 f_w 와 떨림 각도 크기 ϕ_{w0} 를 사용한 실시간 떨림 각도 $\phi_w(t) = \phi_{w0} \sin(2\pi f_w t)$ 로 구성된 3×3 떨림 운동 행렬이며, $\vec{r}_{d1,m}(0)$ 는 m 번째 유효 산란원의 초기 위치벡터이다. 여기서, 원뿔 형상 탄두와 달리 원뿔 형상 기만체의 위치 벡터들은 상대적으로 가벼운 무게 때문에 무게 중심이 탄두보다 높다(i.e. $O_d > O_w$) (그림 2 참조). 따라서 원뿔 형상 기만체의 새로운 CW 레이더 수신신호는 식 (1)과 (13)을 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$s_{d1}(t) = \sum_{m=1}^3 \sigma_{con}(t) p_m(t) \times \exp\left(\frac{j4\pi}{\lambda} \vec{r}_{d1,m}(t) \cdot \vec{r}_{RLOS}\right), \quad (14)$$

여기서 $p_m(t)$ 는 원뿔 형상 기만체에 대한 m 번째 유효 산란원의 가려짐 효과를 표현하기 위한 함수이다^[3](표 2 참조).

표 2. 원뿔 형상 기만체의 가려짐 효과^[3]

Table 2. Occlusion effect of cone-shaped decoy^[3].

	$p_1(t)$	$p_2(t)$	$p_3(t)$
$0^\circ \leq \theta_a < \gamma$	1	0.1	0.1
$\gamma \leq \theta_a < 90^\circ$	1	0.1	0
$90^\circ \leq \theta_a < 180^\circ - \gamma$	1	0.1	0.1
$180^\circ - \gamma \leq \theta_a < 180^\circ + \gamma$	0	0.1	0.1
$180^\circ + \gamma \leq \theta_a \leq 270^\circ$	1	0.1	0.1
$270^\circ \leq \theta_a \leq 360^\circ - \gamma$	1	0	0.1
$360^\circ - \gamma \leq \theta_a \leq 360^\circ$	1	0.1	0.1

마지막으로 원통 형상 기만체에 대한 레이더 수신신호 모델링을 위하여, 원통 바닥의 법선벡터 \vec{a}_w 와 RLOS \vec{r}_{RLOS} 가 이루는 평면 내에 존재하는 4개의 유효 산란원들을 고려한다^{[2],[3]}(그림 1(c) 참조). 이때 이 표적에 대한 새로운 레이더 수신신호는 다음과 같다.

$$s_{d2}(t) = \sum_{m=1}^4 \sigma_{cyl}(t) x_m(t) \times \exp\left(\frac{j4\pi}{\lambda} \vec{r}_{d2,m}(t) \cdot \vec{r}_{RLOS}\right), \quad (15)$$

여기서 $x_m(t)$ 는 원통 형상 기만체에 대한 m 번째 유효 산란원의 가려짐 효과를 표현하기 위한 함수이며^[3](표 3 참조), $\vec{r}_{d2,m}(t)$ 는 m 번째 유효 산란원의 초기 위치벡터 $\vec{r}_{d2,m}(0)$ 을 $\vec{r}_{d1,m}(0)$ 대신에 식 (13)에 대입한 결과이다.

III. 실험

제안된 레이더 수신신호 모델링 기법을 검증하기 위

표 3. 원통 형상 기만체의 가려짐 효과^[3]

Table 3. Occlusion effect of cylinder-shaped decoy^[3].

	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$x_3(t)$	$x_4(t)$
$0^\circ \leq \theta_a < 90^\circ$	1	1	1	0
$90^\circ \leq \theta_a < 180^\circ$	1	1	0	1
$180^\circ \leq \theta_a < 270^\circ$	0	0	1	1
$270^\circ \leq \theta_a < 360^\circ$	1	0	1	1

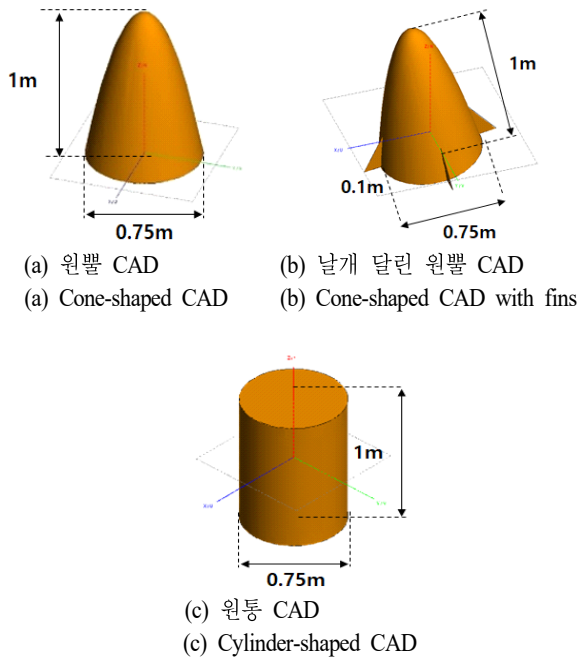


그림 3. 탄두와 기만체의 CAD 모델들
Fig. 3. CAD models for warhead and decoy.

하여 그림 1과 같은 3가지 형상의 CAD 모델들(그림 3 참조)을 사용하였다. 그리고 이 CAD 모델들에 대한 수신신호 데이터를 획득하기 위하여 PO 및 physical theory of diffraction(PTD) 기반의 VIRAF(virtual aircraft framework)를 사용하였으며, 관련 실험 변수들은 표 4와 같다. 이때 미세운동을 가지는 표적의 VIRAF 수신신호는 사전에 전 관측 각도에서 획득된 수치해석 데이터베이스로부터 미세운동에 의해 변화하는 관측각도에서의 데이터들을 추출하여 구성된다. 본 실험에서는 이러한 VIRAF 수신신호가 제안된 기법의 수신신호와 얼마나 유사한지를 검증하기 위하여, RCS 및 2D JTF 영상을 비교 및 분석하였다.

그림 4(a)~그림 4(d) 및 그림 4(e)~그림 4(h)는 각각 제안된 레이더 수신신호 모델들 및 VIRAF 수신신호들의 RCS 변화를 보여준다. 이때 원뿔 기만체의 경우, PO 기반의 제안된 수신신호 모델(그림 4(d) 참조)과 PO+PTD 기반의 VIRAF 수신신호(그림 4(h) 참조) 간의 미세한 차이점이 나타났다. 이는 원뿔 구조체가 다른 표적들보다 상대적으로 회절에 의한 영향을 더 받기 때문이다. 하지만, 여기서 주목할 점은 기존의 연구들^{[2]~[4]}과 달리, 제안

표 4. 실험 변수들

Table 4. Experiment parameters.

Carrier frequency	10 GHz
Observation time	0.5 s
Sampling frequency	2 kHz
Wave length λ	0.03 m
Coning frequency f_c	8 Hz
Coning angle ϕ_c	10°
Wobble frequency f_w	5 Hz
Wobble angle amplitude ϕ_{w0}	10°
Polarization	HH
Aspect angle θ_a	85°
Height h	1 m
Diameter d	0.75 m
Diameter for fin d_f	0.1 m
Height for fin h_f	0.1 m

된 레이더 수신신호 모델링 기법은 VIRAF 수신신호와 매우 유사한 RCS 크기 변화 특성을 보여주는 것이다.

다음으로 그림 5(a)~그림 5(d) 및 그림 5(e)~그림 5(h)는 각각 제안된 레이더 수신신호 모델 및 VIRAF 수신신호들의 2D JTF 영상들을 보여준다. 이때, 레이더 수신신호로부터 2D JTF 영상을 생성하기 위하여 spectrogram^{[6],[7]}을 사용하였다. 이 JTF 영상들은 시간-주파수 공간상에서 다중 산란원들의 존재와 이들의 가려짐 효과를 효과적으로 보여줄 수 있다. 먼저 그림 5(a) 및 그림 5(e)를 비교할 때, 매우 유사한 미세 도플러 현상이 나타남을 확인할 수 있었다. 특히, 원뿔 형상 탄두의 유효 산란원 P_1 이 매우 지배적인 에너지를 가지면서, 동시에 유효 산란원 P_2 는 상대적으로 작은 에너지를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 게다가 유효 산란원 P_3 는 가려짐 효과에 의하여 시간-주파수 영상 내에서 존재 확인이 불가능하였다. 다음으로 그림 5(b) 및 그림 5(f)을 비교할 때, 두 경우 모두 날개들에 의해 도플러 주파수 천이가 900 Hz까지 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 그림 5(c) 및 그림 5(g)의 원뿔 기만체 경우에도 마찬가지로 관측각도에 따라 2개의 유효 산란원 P_1 , P_2 만 정확히 나타남을 확인할 수 있었다.

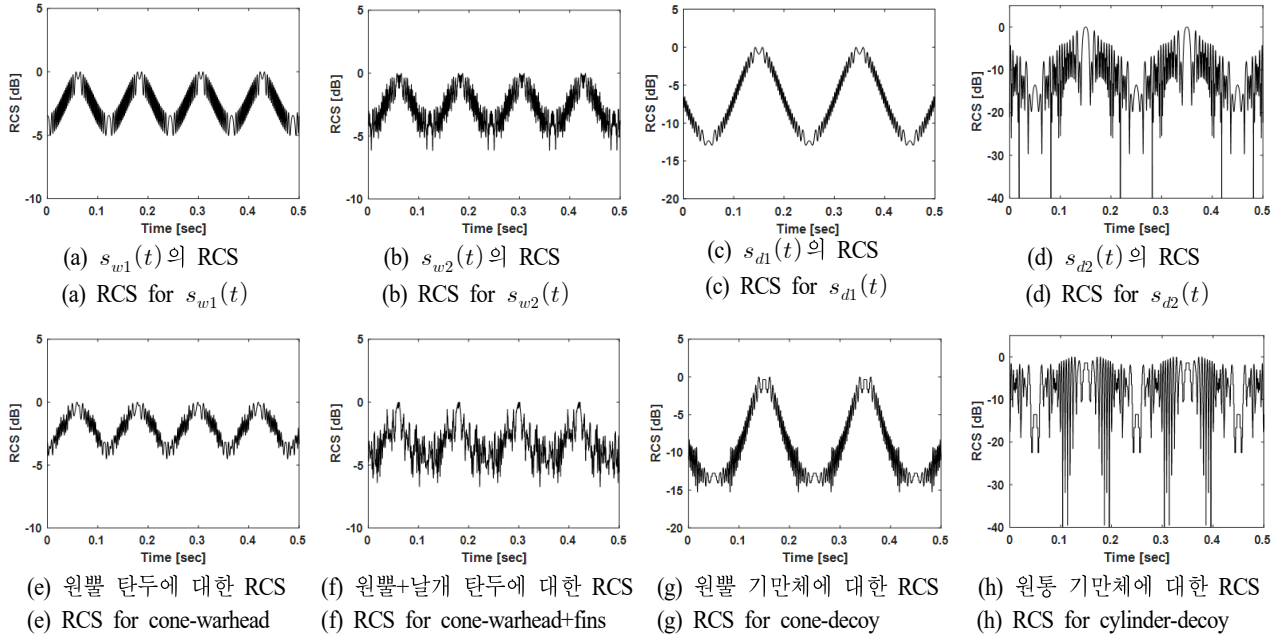


그림 4. 제안된 레이더 수신신호((a)~(d))와 VIRAF 수신신호((e)~(h))의 정규화된 RCS 비교

Fig. 4. Comparison of normalized RCSs to evaluate the similarity between the proposed signal models((a)~(d)) and VIRAF signals((e)~(h)).

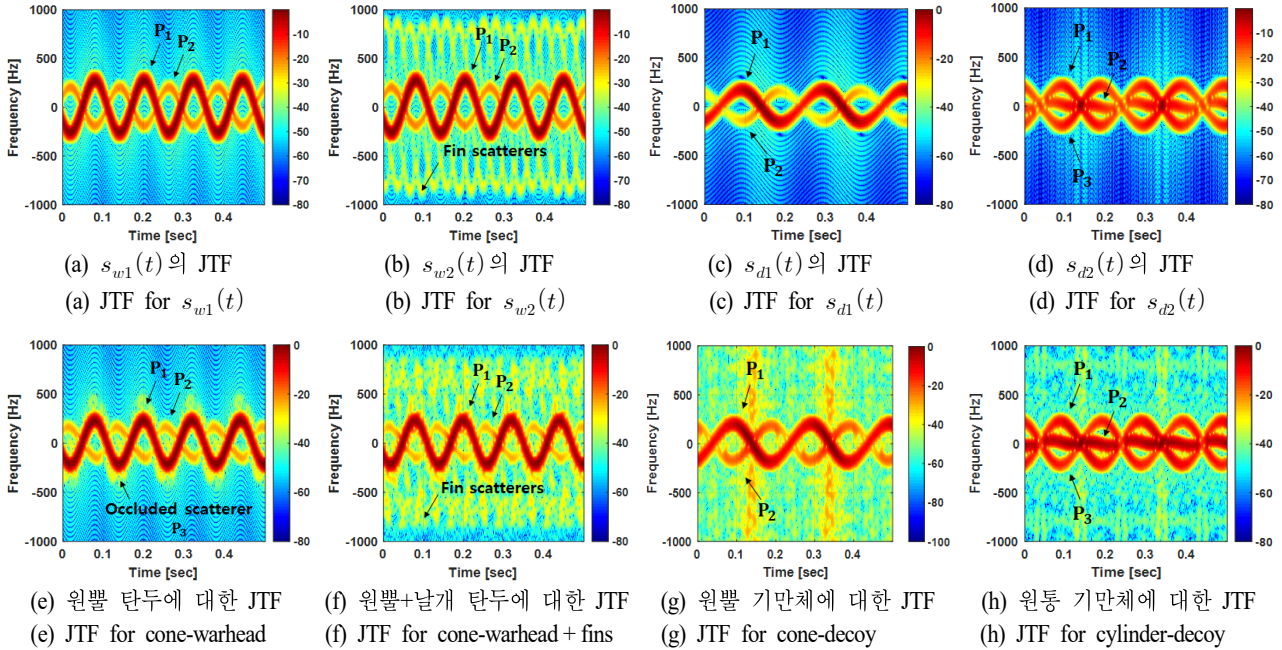


그림 5. 제안된 레이더 수신신호((a)~(d))와 VIRAF 수신신호((e)~(h))의 정규화된 JTF 영상 비교

Fig. 5. Comparison of normalized JTF images to evaluate the similarity between the proposed signal models((a)~(d)) and VIRAF signals((e)~(h)).

반면에 그림 5(d) 및 그림 5(h)의 원통 기만체 경우, 제안된 기법과 VIRAF 수신신호 모두 원뿔 기만체와 달리 유효 산란원 P_3 가 추가적으로 나타남을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 RCS 크기 변화를 표현하기 위하여 새로운 레이더 수신신호 모델링 기법을 제안하였다. 먼저 제안된 수신신호 모델링기법을 위하여 PO 기반의 RCS 모델들과 기존의 수신신호 모델링 방식을 결합하였으며, 이 결과들이 VIRAF 수치해석도구 및 CAD 모델들을 사용한 데이터들과 매우 유사하다는 것을 검증하였다. 향후에는 본 연구에서 분석된 결과들을 바탕으로 최적의 특징벡터 추출 기법을 개발함으로써, 기존의 영상처리기반 기법들과 비교하여 보다 효율적이고 안정적인 변별 기법을 개발할 것이다.

References

[1] V. C. Chen, F. Li, S. Ho, and H. Wechsler, "Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 2-21, Jan. 2006.

[2] H. Gao, L. Xie, S. Wen, and Y. Kuang, "Micro-Doppler signature extraction from ballistic target with micro-mo-

tions," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 46, no. 4, pp. 1969-1982, Oct. 2010.

[3] A. R. Persico, C. Clemente, D. Gaglione, C. V. Ilioudis, J. Cao, and L. Pallotta, et al., "On model, algorithms, and experiment for micro-Doppler-based recognition of ballistic targets," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 3, pp. 1088-1108, Jun. 2017.

[4] I. O. Choi, S. H. Kim, J. H. Jung, K. T. Kim, and S. H. Park, "An efficient method to extract the micro-motion parameter of the missile using the time-frequency image," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 6, pp. 557-565, Jun. 2016.

[5] B. Mahafza, *Radar Systems and Design using MATLAB*, Chapman & Hall/CRC Press LLC, Jan. 2000.

[6] K. W. Yoo, J. H. Jun, and C. H. Ryu, "Multi-target position estimation technique using micro-Doppler in FMCW radar system," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 11, pp. 996-1003, Nov. 2016.

[7] C. Hoffmann, H. H. Slim, and P. Russer, "System strategies for time-domain emission measurements above 1 GHz," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 11, no. 4, pp. 304-310, Dec. 2011.

최 인 오 [포항공과대학교/박사과정]



2012년 8월: 부경대학교 전자정보통신공학과 (공학사)
2014년 8월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)
2015년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 미세도플러 분석, 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 패턴인식, 스펙트럼 추정

박 상 홍 [부경대학교/정교수]



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

과 정교수

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

강 기 봉 [포항공과대학교/박사과정]



2015년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학사)

2017년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)

2018년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 드론 및 새 표적식별, 레이더 신호처리, 표적 탐지, 미세도플러 분석 등

김 경 태 [포항공과대학교/정교수]



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~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실실장

2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장

[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 추정