



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

Monostatic/Bistatic 미세도플러 영상을 이용한 효과적인 탄도미사일 식별 연구



2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

스 마 트 로 봇 융 합 응 용 고 학 과

손 재 환

공 학 석 사 학 위 논 문

Monostatic/Bistatic 미세도플러 영상을 이용한 효과적인 탄도미사일 식별 연구

지도교수 박 상 홍

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

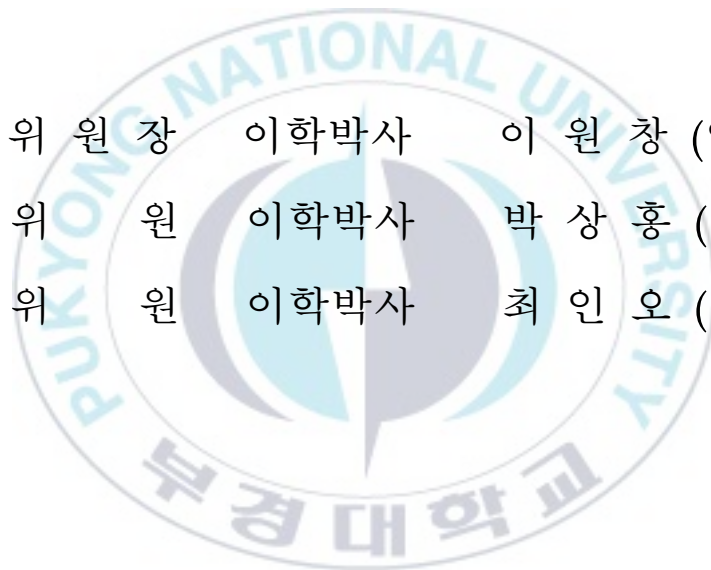
스 마 트 로 봇 융 합 응 용 공 학 과

손 재 환

손재환의 공학석사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일

위 원 장	이학박사	이 원 창 (인)
위 원	이학박사	박 상 홍 (인)
위 원	이학박사	최 인 오 (인)



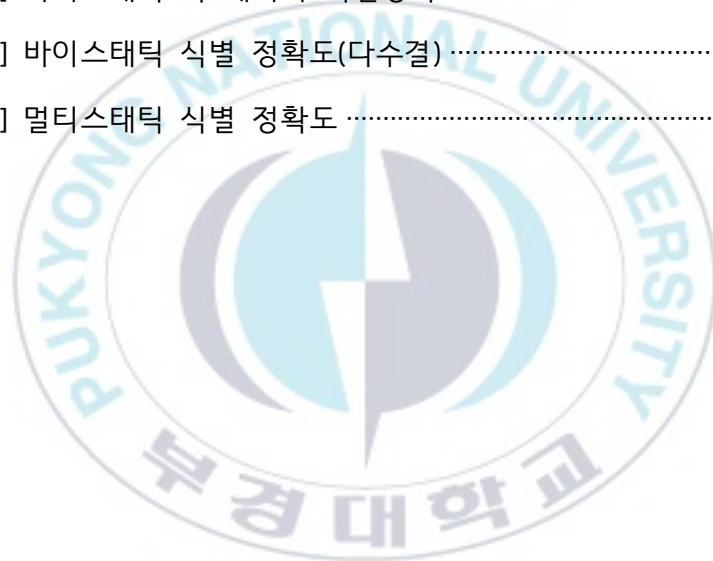
<목 차>

I. 서론	1
II. 본론	3
1. 미세운동 모델링	3
2. PO 기법	6
3. Stepped frequency waveform을 이용한 RP 생성	8
4. 제안된 미세운동 신호처리 절차 및 개발된 소프트웨어	11
5. 미세도플러를 이용한 구분기법 연구	15
III. 실험 결과	17
1. 시뮬레이션의 조건	17
2. PS모델와 PO모델의 MD영상을 비교	18
3. 모노스택/바이스택 MD 영상의 비교	21
4. CNN를 이용한 탄두 구분	24
IV. 결론	32
V. 참고문헌	34

<그림 목차>

[그림 2-1] (a) 탄두의 미세운동, (b) 기만체의 미세운동	3
[그림 2-2] 변환 행렬 구성	4
[그림 2-3] 고정 표적의 미세운동을 궤도에 맞춰 변환	5
[그림 2-4] RCS 좌표계	7
[그림 2-5] 임의의 물체로부터의 원거리장 산란	8
[그림 2-6] SFW 구조	9
[그림 2-7] SFW 원리	10
[그림 2-8] 전체 절차	12
[그림 2-9] 미세도플러 레이더 신호형성 소프트웨어	13
[그림 2-10] (a)모노스테틱 위상보상 시나리오, (b)바이스테틱 위상보상 시나리오	14
[그림 2-11] 모노스테틱과 바이스테틱의 도플러 주파수 차이	15
[그림 2-12] CNN구조	15
[그림 3-1] (a)PO모델, (b)PO 모델	17
[그림 3-2] 탄도미사일 비행 궤도	18
[그림 3-3] 모노스테틱 시나리오	19
[그림 3-4] δ_m 에 따른 MD 진폭 비교	20
[그림 3-5] PS모델과 PO모델의 MD 비교	21
[그림 3-6] 바이스테틱 시나리오	22
[그림 3-7] 모노스테틱과 바이스테틱 의 MD 진폭 비교	23
[그림 3-8] 모노스테틱과 바이스테틱 의 MD 진폭 비교($\delta_m = 15^\circ$ 와 δ_r $= 30^\circ$)	23
[그림 3-9] 탄두 모델 (a)원뿔 표적 (b)날개 달린 원뿔 표적	24

[그림 3-10] 표적 탐지 간격	25
[그림 3-11] 모노스태틱 관측 시나리오	26
[그림 3-12] 모노스태틱의 식별절차	26
[그림 3-13] 바이스태틱 시나리오	27
[그림 3-14] 바이스태틱 식별절차	27
[그림 3-15] 모노스태틱 각 레이더 식별정확도	29
[그림 3-16] 모노스태틱 식별 정확도(다수결)	29
[그림 3-17] 바이스태틱 각 레이더 식별정확도	30
[그림 3-18] 바이스태틱 식별 정확도(다수결)	30
[그림 3-19] 멀티스태틱 식별 정확도	31



<표 목차>

[표 3-1] 시뮬레이션 조건 변수	18
[표 3-2] 설정된 미세운동 변수	25
[표 3-3] 테스트 데이터	28



Zai Huan Sun

in Department of Smart Robot Convergence and Application, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

A ballistic missile (BM) is a missile that follows a sub-orbital ballistic flightpath. Due to the high speed and low radar cross section (RCS), it is very difficult to intercept the ballistic warhead so the defensive interception of ballistic missiles has been a major topic of research in the radar society. The flight trajectory of an intercontinental ballistic missile is generally divided into three phases: boost phase, mid-course phase, and terminal phase. If the warhead can be detected, confirmed and tracked in the boost phase, the danger can be minimized. However, because detection in boost phase is a very difficult task, interception is performed in the mid-course phase when the warhead is outside the atmosphere and the missile is divided into the warhead and the decoy. These two targets have the characteristics of small size, high height, fast moving speed, and similar RCS values which cause difficulty in interception. In order to defend against such high-threat units, a significant identification is through different micro-motion of warhead and decoy by high frequency resolution. The ballistic warhead has three kinds of micro-motion during the flight, which are spinning, conning and nutation whereas the decoy is generally engaged in tumbling and wobbling motion. Because these two motion components are time-varying, the micro-Doppler (MD) in time-frequency domain can be a very good signature to discriminate the warhead and the decoy.

This thesis proposes an efficient method to simulate the micro-Doppler (MD) frequency of the ballistic warhead based on the real flight scenario at monostatic and bistatic observations. Because it is very difficult to obtain the radar signal by changing the observation angle as the conventional electromagnetic software does to obtain the reflected signal for a fixed target, we transformed the pose of the model engaged in micro-motion in a local coordinate into that on the trajectory by constructing the transformation matrix. Then, we obtained the radar signal by using the point scatterer (PS) model and the high frequency estimation method, physical optics (PO), and the MD results were compared by using the short-time Fourier transform. In addition, this thesis proposes an efficient classification method to identify the warhead and the decoy for various observation scenarios by using the convolution neural network (CNN) classifier and the MD image. In simulations for various observation scenarios, MD signatures were successfully obtained, scattering characteristics were accurately analyzed, and high classification results close to 100 % were obtained.

I. 서론

탄도미사일의 비행은 일반적으로 추진, 중간 및 종착의 3단계로 구성되며, 통상적으로 추진 단계에서 발사 장소가 은밀하고 멀리 위치하기 때문에 레이더 탐지에 어려움이 있다. 반면에 중간 단계에서의 탄도미사일 수평거리는 방어 레이더와 가깝고 동시에 대기권 높이의 고도에 도달한다[1]. 하지만 탄도미사일은 레이더에 의한 탐지 및 요격을 피하고자 주요 탄두와 기만체들로 나뉜다. 이 두 표적은 외형이 비슷하여 RCS(radar cross section)가 유사한 특징을 가진다. 따라서 탄두와 기만체를 효과적으로 구분하는 방법이 필요하다.

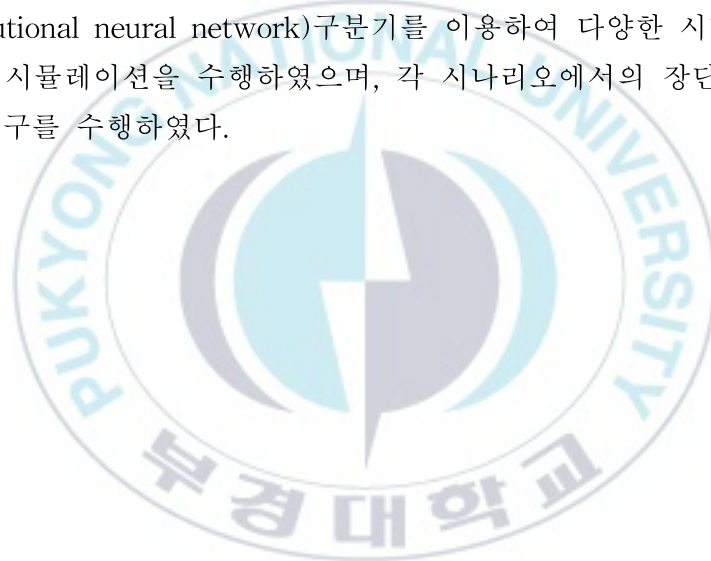
자동 표적식별에는 대표적으로 RP(range profile)[2]와 ISAR(inverse synthetic aperture radar)[3] 같은 영상이 사용하지만 탄두와 기만체는 비슷한 크기와 RCS 가지기 때문에 이 두 방법으로는 두 대상을 분류하기 적합하지 않으므로 다른 기법이 요구된다. 일반적으로 탄두와 기만체는 서로 다른 미세운동을 가지며 이로 인하여 레이더 수신신호를 시간-주파수 영역에서 표현할 경우, 표적 고유의 시변하는(time-varying) 미세도플러(micro-Doppler)가 형성되므로 이를 이용하여 효과적으로 표적 구분을 수행할 수 있다. 탄두의 경우 일반적으로 회전(spinning), 원추(coning), 장동(nutation) 운동을 수행하며 기만체의 경우 떨림(wobbling) 운동을 수행하므로 시간-주파수 영상 기반의 MD 영상을 사용하면 둘의 차이점을 효과적으로 나타낼 수 있다[4].

탄도미사일 요격 시뮬레이션을 현실화하기 위해 탄두와 기만체의 모델은 RCS특성을 추가하여 실제 비행 모습과 비슷한 모델링 방법이 필요하다. 그리고 3차원 표적에 대한 RCS예측 방법이 몇 개 있지만, 대부분의 예측 기법이 많은 양의 컴퓨터 자원과 처리 시간이 필요하다. 또한, 대부분의 RCS 계산 소프트웨어는 LOS(line-of-sight)가 표적에 고정하여 계산하기 때문에 실제 궤도를 따라 비행하며 미세운동하는 탄도미사일 시뮬레이션에는 적합하지 않다. 따라서 새로운 시뮬레이션을 기법이 필요하다.

본 연구에서는 모노스태틱(Mono-static)과 바이스태틱(bi-static) 관측 시나리오에서 궤도를 따라 비행하는 탄두에 대한 MD를 얻기 위하여 효율적인 시뮬레이션의 방법을 제안하였으며, CNN 구분기를 이용하여 탄도미

사일에 대한 다양한 구분 실험을 실행하였다. 제안된 기법의 경우, 고정된 지역좌표(local coordinate)에서 탄두와 기만체의 미세운동을 시뮬레이션하였으며, 미세운동의 원추축과 시나리오의 실시간 속도 벡터 사이관계를 변환행렬로 구하였고, 변환행렬을 이용하여 탄도를 따라 실시간으로 비행하는 상태를 구현하였다.

레이더는 모노스테틱과 바이스테틱 두 종류의 시나리오로 모델링하여 PO (Physical optics)기반의 신호를 얻기 위해 시뮬레이션하였다. PS(point scatterer) 모델에서 계산된 데이터의 STFT(short-time Fourier transform)을 이용하여 얻은 MD 영상과 비교한 결과 PO 모델이 모노스테틱과 바이스테틱 시나리오 모두에서 유용함을 보였다. 이를 바탕으로 CNN(convolutional neural network)구분기를 이용하여 다양한 시나리오 상황에서 구분 시뮬레이션을 수행하였으며, 각 시나리오에서의 장단점 및 융합에 관한 연구를 수행하였다.



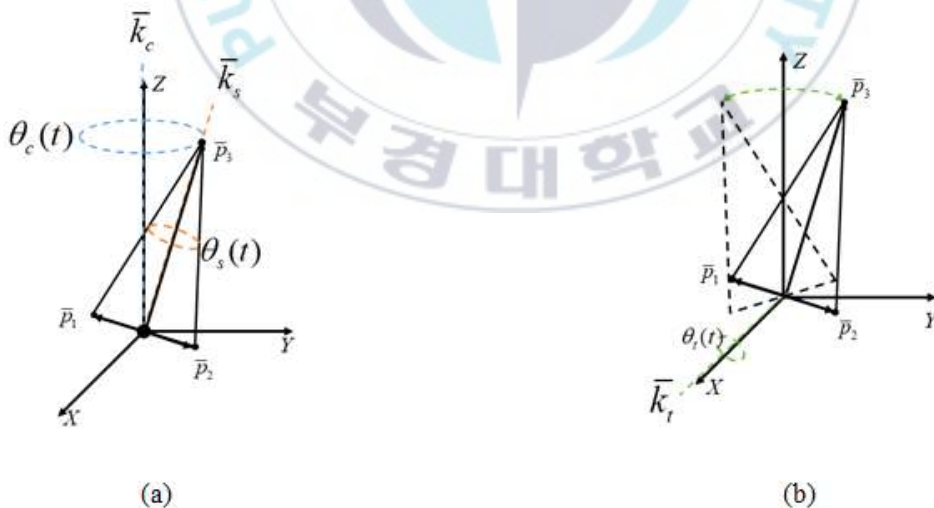
I. 본론

본론에서는 탄두와 기만체의 미세운동을 설명하고 실제 trajectory 따라 변환 기법이 제안된다. 그리고 PO 기반의 RCS 예측 기법을 설명하며 시물레이션 방법을 제안하였다.

1. 미세운동 모델링

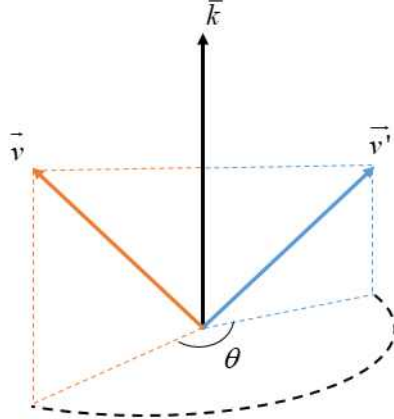
(1) 탄두와 기만체 모델링

탄도의 미세운동은 일반적으로 회전(spinning), 원추(coning), 장동(nutation) 운동한다. 모델이 수직 위쪽에 있다고 한다면 회전축은 z -축에 대한 각도 β 에 의해 기울어진 것을 가정한다(그림 2-1(a)). 장동운동은 원추축과 회전축에 의해 형성된 평면에서 운동하며 통상적인 영향은 주지 않기 때문에 본 논문에서는 회전운동과 원추운동만을 고려한다[4, 6].



[그림 2-1] (a) 탄두의 미세운동, (b) 기만체의 미세운동

회전 모델링은 로드리게스(Rodrigues) 회전 행렬[9] 방정식 이용하며 (그림 2-2)와 같다.



[그림 2-2] 변환 행렬 구성

벡터 $\bar{v}$ 는 축 $\bar{k}$ 를 따라 θ 각도로 회전시킨 회전벡터 $\bar{v}'$ 은 식(1)과 같다.

$$\bar{v}' = R(t)\bar{v}, \quad (1)$$

여기서 회전행렬 $R(t)$ 는 다음과 같다.

$$R(t) = I + [\sin\theta(t)]K + [1 - \cos\theta(t)]K^2, \quad (2)$$

I 는 단위행렬, θ 는 회전 각도, K 는 cross-product matrix이며 다음과 같다.

$$K = \begin{pmatrix} 0 & -k_z & k_y \\ k_z & 0 & -k_x \\ -k_y & k_x & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

탄도의 경우 일반적으로 회전운동에서 회전축 $\bar{k}_s$ 를 중심으로 $\theta_s(t)$ 각도를 따라 운동하고 원추운동에서 원추축 $\bar{k}_c$ 를 중심으로 $\theta_c(t)$ 각도를 따라 운동한다(그림 2-1(a)). 모델이 있는 원점부터 각 모델의 위치를 $\bar{p} = (p_1, p_2, p_3)^T$ 로 정의하며 식(1)을 이용하여 탄도 모델의 미세운동은 다음과 같다.

$$\bar{p}_{wh}(t) = R_c(t)R_s(t)\bar{p}, \quad (4)$$

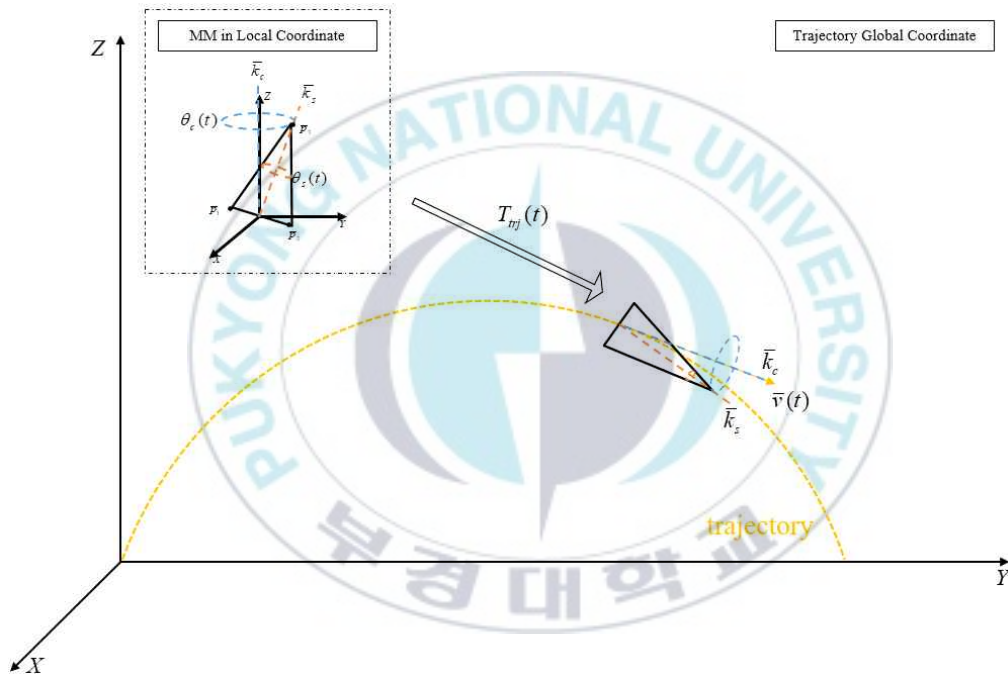
여기서 $R_c(t)$ 와 $R_s(t)$ 는 식(2)와 식(3)에서 얻은 원추 행렬 및 회전 행렬이다.

반면에, 기만체는 질량 차이와 자세제어장치의 유무로 인해 떨림(wobbling)운동이 발생한다. 떨림운동은 축 $\bar{k}_t$ 를 중심으로 원추축과 회전축에 의해 형성된 평면에서 수행한다(그림 2-1(b)).

$$\bar{p}_{dc}(t) = R_t(t)\bar{p}, \quad (5)$$

(2) 실제 시나리오 응용

앞서 설명한 미세운동은 독립된 지역좌표에서 이루어지기 때문에 미사일의 궤도가 중심이 되는 절대좌표 상으로 옮긴다(그림 2-3)[4].



[그림 2-3] 고정 표적의 미세운동을 궤도에 맞춰 변환

궤도 위치가 시간 t 따라 이동하는 좌표 $\bar{p}_{trj}(t)$ 와 진행방향의 벡터 $\bar{v}_{trj}(t)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{p}_{trj}(t) = (X_{trj}(t), Y_{trj}(t), Z_{trj}(t))^T, \quad (6)$$

$$\bar{v}_{trj}(t) = \bar{p}_{trj}(t) - \bar{p}_{trj}(t + dt). \quad (7)$$

$\bar{l}(t)$ 가 표적의 지역좌표 z -축과 $\bar{v}_{trj}(t)$ 서로 수직이고 다음과 같아,

$$\bar{l}(t) = (l_x(t), l_y(t), l_z(t)) = cross_u(\bar{v}(t), \bar{z}), \quad (8)$$

여기서 $cross_u(\bar{v}(t), \bar{z})$ 는 $\bar{v}(t)$ 와 $\bar{z}$ 외적의 단위 벡터.

식 (1)를 이용 하여 표적의 지역좌표 z -축과 $\bar{v}_{trj}(t)$ 의 변환행렬 $T_{trj}(t)$ 는 식(2)과 같은 다음으로 나타난다.

$$T_{trj}(t) = I + [\sin\theta(t)]K(t) + [1 - \cos\theta(t)]K(t)^2, \quad (9)$$

$K(t)$ 와 $\theta(t)$ 는 다음과 같다.

$$K(t) = \begin{pmatrix} 0 & -l_z(t) & l_y(t) \\ l_z(t) & 0 & -l_x(t) \\ -l_y(t) & l_x(t) & 0 \end{pmatrix}, \quad \theta(t) = \cos^{-1}(\bar{v}(t)^T \bar{z}) \quad (10)$$

마지막으로 $\bar{p}_{wh}(t)$ 와 $\bar{p}_{dc}(t)$ 는 $T_{trj}(t)$ 와 $\bar{p}_{trj}(t)$ 를 적용하여 미세운동하는 표적이 궤도를 따라 비행하는 탄도 $\bar{p}_{wh_trj}(t)$ 와 기만체 $\bar{p}_{dc_trj}(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{p}_{wh_trj}(t) &= T_{trj}(t)\bar{p}_{wh}(t) + \bar{p}_{trj}(t), \\ \bar{p}_{dc_trj}(t) &= T_{trj}(t)\bar{p}_{dc}(t) + \bar{p}_{trj}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

2. PO 기법

도플러 효과는 시간에 따라 도플러 주파수가 변화하는 것을 의미한다 [12]. 시뮬레이션을 통해 효과적으로 MD를 얻기 위해 전자파 반사가 큰 표적부위를 점산란원으로 지정하지만, 실제 물체의 전자파 반사 능력은 외형과 재질에 따라 영향을 받는다. 예를 들면 특정 탄두의 nose tip은 전자파에 대한 산란이 크지만 그렇지 않은 다른 경우 또한 존재한다. 따라서 실제 표적의 산란특성을 모사하기 위하여 점산란이 아닌 PO(physical optics, 물리광학) 기법을 사용한다.

PO은 3차원 물체의 RCS를 예측하는 편리한 방법이다. 고주파 영역(또는 광학 영역) 예측이며 파장보다 훨씬 큰 치수를 가진 물체에 대해 최상의 결과를 제공한다. PO 방법은 조명이 들어오는 표면에는 적용되지만 모서리 굴절, 다중 반사 또는 표면파는 적용하지 않는다.

모델의 복잡한 표면은 facet라고 불리는 많은 작은 표면으로 나눌 수 있다. PO 면 모델에 사용되는 면은 삼각형 평판이다. 각 면의 산란장은 다른 면의 영향을 고려하지 않고 격리된 것처럼 계산할 수 있다. 따라서 입사 필드에 의해 조명되는 면의 경우 표면 전류 및 산란 필드를 계산할 수

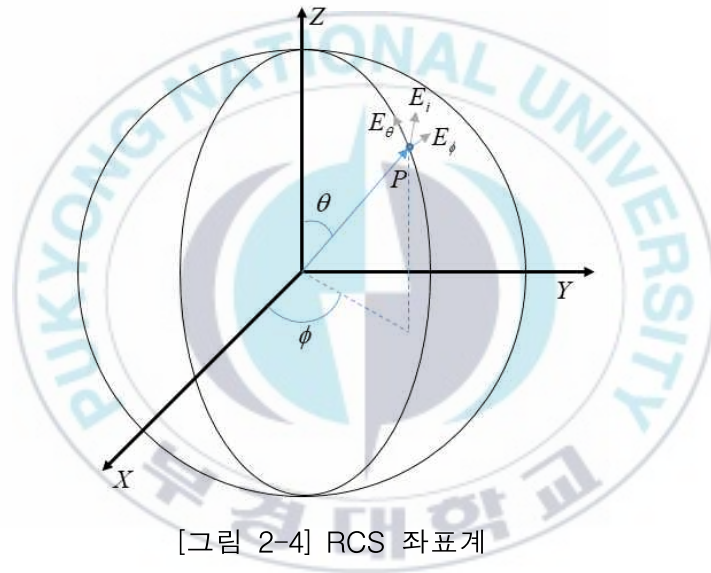
있다. 음영 처리된 표면의 경우 표면 전류는 0으로 설정된다.

좌표가 $r(x, y, z)$ 인 곳에 P의 facet이 있다고 전자기장 발사원은 원심에 있다고 가정하면 RCS는 다음과 같다:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}, \quad (12)$$

위 식에서 r 은 표적과 소스(레이더) 사이의 범위 이고 $|E_s|$ 과 $|E_i|$ 는 각각 산란 전기장 진폭(scatter electric field amplitude)과 입사 전기장 진폭(incident electric field amplitude)이다.

일반적으로 입사 전기장 E_i 는 그림 2-4 과 같다 xy 평면상 x 축과 ϕ 각



[그림 2-4] RCS 좌표계

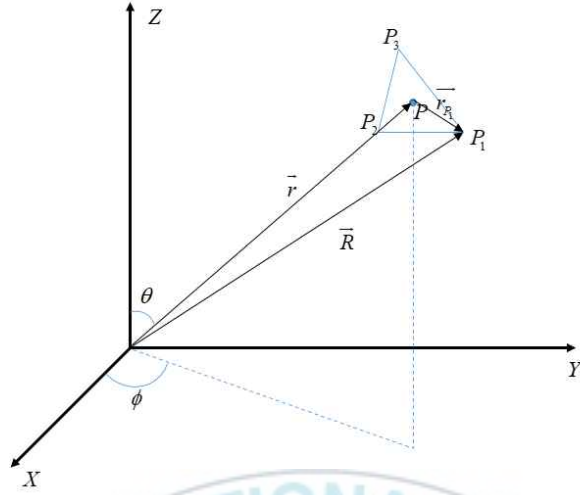
을, z 축과 θ 각을 표현하고 $\vec{E}_i$ 는 다음식 과 같은 분리할 수 있다.

$$\vec{E}_i = E_{i\theta}\hat{\theta} + E_{i\phi}\hat{\phi}, \quad (13)$$

여기서 $\hat{\theta}$ 과 $\hat{\phi}$ 는 단위 방향 이고, $E_{i\theta}$ 및 $E_{i\phi}$ 는 $\hat{\theta}$ 와 $\hat{\phi}$ 방향상에 E_i 이다.

그리고 LOS가 $[uvw]$ 으로 표시하고 다음과 같다

$$u = \sin\theta \cos\phi, \quad v = \sin\theta \sin\phi, \quad w = \cos\theta, \quad (14)$$



[그림 2-5] 임의의 물체로부터의 원거리장 산란

$r(x, y, z)$ 가 아주 먼 위치에 있고 facet P가 점 P_1, P_2, P_3 의 3개로 구성되어 있고 P_1 과 중심 P의 거리가 $\vec{r}_{p1}(x', y', z')$ 임을 가정 하면, P_1 의 관측 거리 $\vec{R}$ 은 다음과 같다

$$\vec{R} = \vec{r} + \vec{r}_{p1}, \quad (15)$$

위 식에서 거리가 매우 멀기 때문에 $\vec{R}$ 과 $\vec{r}$ 은 평행관계로 볼 수 있고 P_1 의 $\vec{E}_s$ 는 다음과 같다.

$$\vec{E}_s(R, \theta, \phi) = E_\theta(R, \theta, \phi)\hat{\theta} + E_\phi(R, \theta, \phi)\hat{\phi} = \frac{-jkZ_0}{4\pi R} e^{-jkR} \iiint_V \vec{J} e^{jk(r_p[u, v, w])} dv', \quad (16)$$

여기서 $\vec{J}$ 가 표면전류, Z_0 가 자유 공간의 임피던스, k 는 $2\pi/\lambda$ 이다.

위 수식을 근사화 시킨 후 입사 전기장의 크기 E_i 와 산란 전기장의 크기 E_s 의 행렬 관계는 다음과 같다.

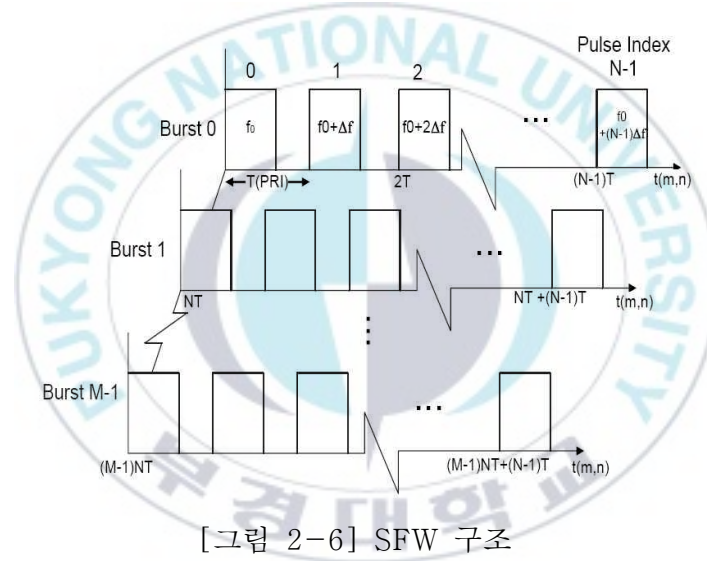
$$\begin{bmatrix} E_{s\theta} \\ E_{s\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_H u^2 - R_E v^2 & (R_H + R_E)uv \\ (R_H + R_E)uv & R_H v^2 - R_E u^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i\theta} \\ E_{i\phi} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

여기서 R_H 와 R_E 가 자기장 및 전기장 분극(polarizations)의 반사성분이다 [5]. 식 (17)을 이용할 경우, facet에서 산란된 필드는 facet 영역에 걸쳐 표면 전류를 통합하여 계산할 수 있다.

3. Stepped frequency waveform을 이용한 RP 생성

Stepped frequency waveform(SFW)는 하나의 주파수를 가지는 일련의 모노톤(monotone) 펄스를 송, 수신하여 주파수 영역에서 표적의 응답을 샘플링(sampling)한 후, IFT(inverse Fourier transform)을 수행하여 RP를 형성한다. SFW는 하드웨어 구조가 간단하면서도 고해상도를 얻을 수 있는 장점이 있다.

여러 관측각도에서 거리측면도를 구성할 경우, 그림 4와 같이 N개의 펄스로 이루어진 M개의 burst로 구성되며, 각 burst별로 하나의 RP가 형성된다.

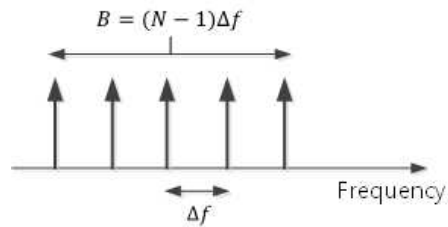


[그림 2-6] SFW 구조

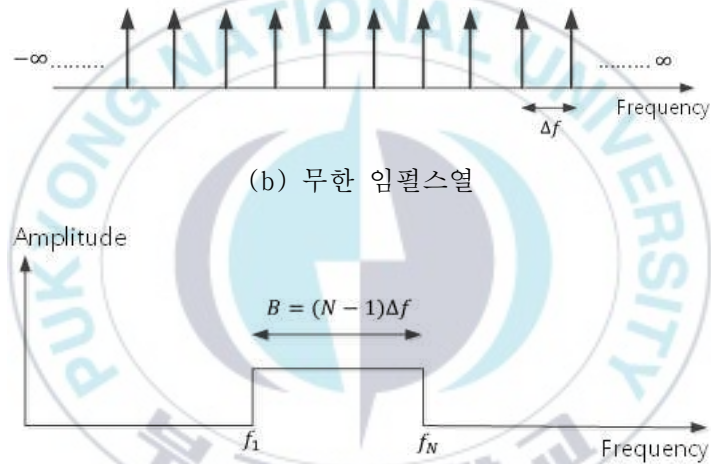
한 burst 내에서 각 주파수 성분은 $f_n = f_0 + n\Delta f$ 이고, f_0 는 시작 주파수, Δf 는 주파수 스텝(frequency step)을 나타내며, burst별로 N개의 펄스가 사용되므로 각 burst의 총 밴드폭(band width)은 $(N-1)\Delta f$ 가 된다. T 는 PRI(pulse repetition interval)이며, $1/T$ 는 PRF(pulse repetition frequency)이다.

SFW 펄스 내의 동일한 시간에 샘플링 된 신호를 사용할 경우, 주파수 영역의 신호는 (그림 2-7(a))와 같고, 이는 무한 임펄스열(impulse train) (그림 2-7(b))과 주파수 영역의 사각 윈도우(window)(그림 2-7(c))의 곱으로 나타낼 수 있다. 따라서 $(N-1)\Delta f$ 밴드폭의 SFW 신호의 IFT한 결과

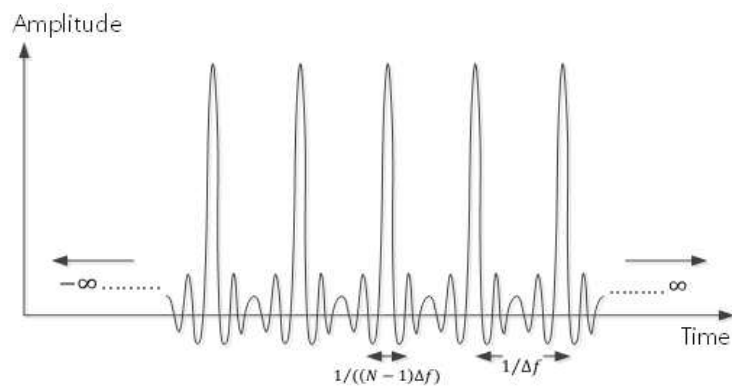
는 (그림 2-7(d))에서 보는 바와 같이 (그림 2-7(b))를 IFT한 무한 임펄스 열과 (그림 2-7(c))를 IFT한 싱크(sinc) 함수와의 컨볼루션(convolution) 한



(a) SFW의 주파수 영역 신호



(c) 주파수 영역 사각 윈도우



(d) IFT 결과

[그림 2-7] SFW 원리

결과와 동일하며, 이는 시간 영역에서 여러 개의 고해상도의 싱크 함수를 송신한 것과 동일하다. 여기서 시간 영역에서 싱크 함수의 폭 $1/(N-1)\Delta f$ 가 SFW 신호의 해상도이며, 싱크 함수 사이의 간격 $1/\Delta f$ 가 SFW 레이더의 unambiguous range이다.

본 연구에서 각 burst 시간동안 RLOS는 고정된 것으로 가정하며, 표적의 산란특성을 분석을 극대화 하기 위하여 펄스간 이동은 없는 것으로 간주한다(=stop-and-go approximation). 그렇지 않을 경우, 최적화 알고리즘 등을 이용하여 펄스간 요동에 대한 보상을 수행해야 한다. 일반적으로 K개의 산란원으로 구성된 표적으로부터 반사되어 수신된 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(m,n) = \sum_{k=1}^K a_k \exp \left[-j \frac{4\pi f_n}{c} r_k(m) \right] \quad (18)$$

$$r_k(m) = r_k(0) + v_r(m)NT + \frac{1}{2}a_r(m)(NT)^2$$

위 식에서 K는 산란원의 개수, a_k 는 k번째 산란원의 크기, $r_k(m)$ 은 m번째 burst에서 RLOS방향으로 투영된 k번째 산란원의 거리이다. $r_k(0)$ 는 k번째 산란원의 초기거리이며, v_r 과 a_r 은 각각 RLOS 방향의 속도와 가속도를 나타낸다. 하지만 산란원의 정보는 실제 관측 시에 제공되지 않았으므로, 식 (18)의 데이터는 PO를 이용하여 구성하였다.

4. 제안된 미세운동 신호처리 절차 및 개발된 소프트웨어

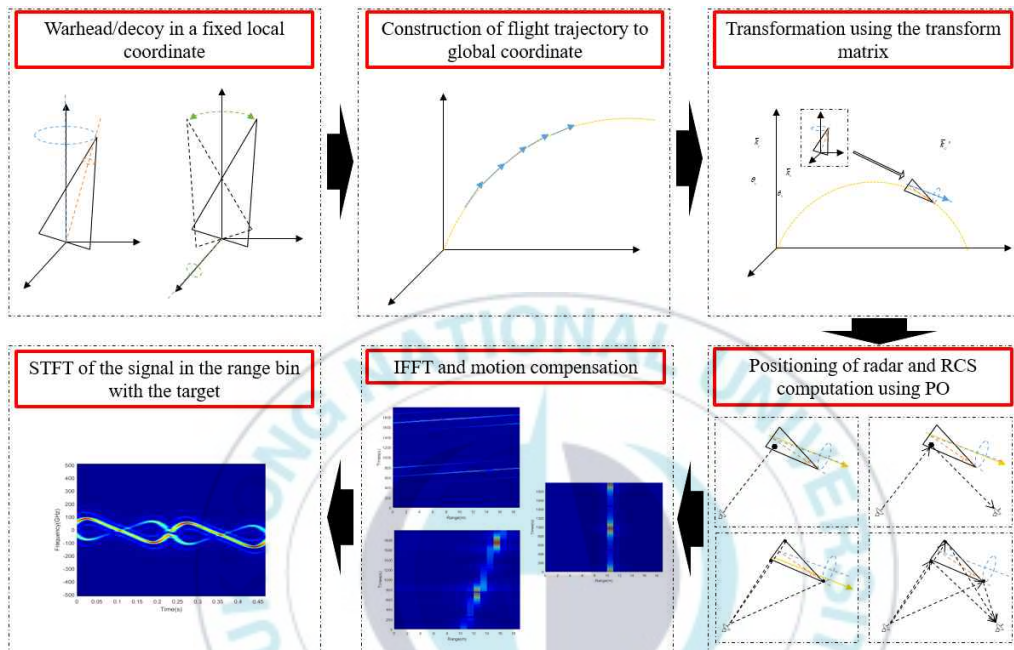
(1) 신호 처리를 위한 전체 절차

MD를 추출하는 전체 절차는 그림2-8 와 같이 6단계로 구성된다.

- ① 탄두와 기만체의 미세운동을 지역좌표에서 시뮬레이션한다.
- ② 탄도방정식[2]을 이용하여 비행 궤도를 생성한다.
- ③ 식 (6)-(9) 이용하여 변환행렬을 구하고 지역좌표에 있던 표적이 식 (10)로 궤도상에 위치하도록 한다.
- ④ 모노스테틱과 바이스테틱 시나리오 따라 레이더의 위치를 지정한다.
- ⑤ IFFT(inverse fast Fourier transform)으로 RP들을 획득한다.
- ⑥ 표적이 궤도에 다른 위치로 병진운동(translational motion)으로 인한

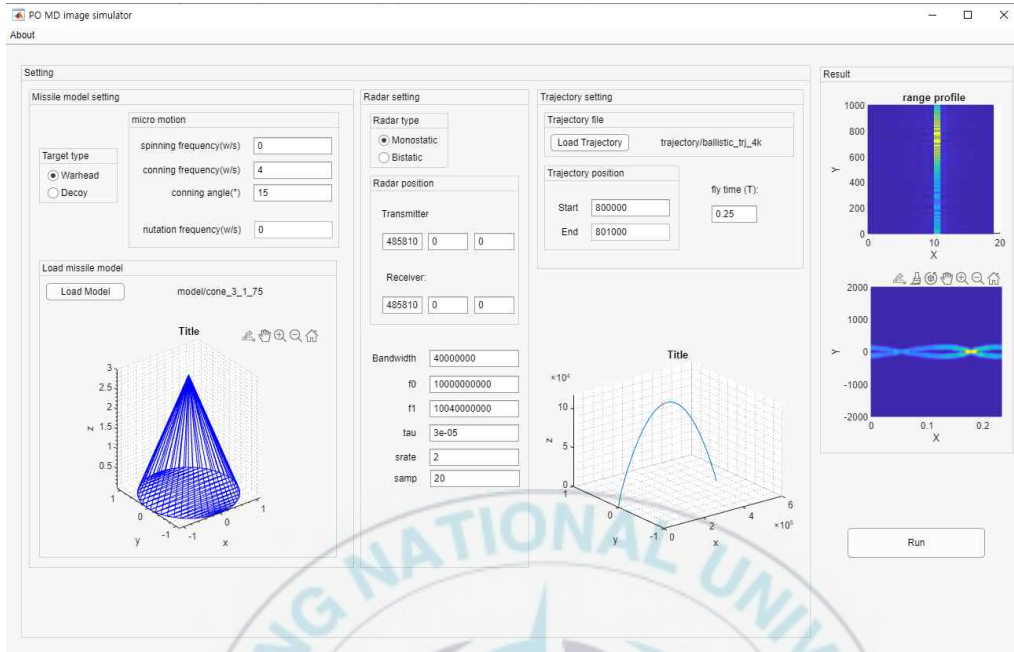
RP 사이의 위상오차를 보상한다(다음 절에서 이론 설명).

⑦ 위상보상 후 표적이 위치한 range bin을 찾고, range bin에 포함된 신호를 이용하여 STFT를 수행함으로써 MD 영상을 얻는다.



[그림 2-8] 전체 절차

위의 절차를 수행하기 위하여 각 성분을 MATLAB로 프로그램 하였으며, 이를 다음과 같이 소프트웨어 패키지로 구성하였다. 구성된 소프트웨어를 이용하여 각 기능을 독자적으로 수행할 수도 있다. 따라서 임의의 표적의 RCS 및 미세도플러 분석, 거리측면도 형성, 비행궤적형성 등이 가능하여 다양한 표적의 전자기적 성질을 분석하는데 사용할 수 있다.



[그림 2-9] 미세도플러 레이더 신호형성 소프트웨어

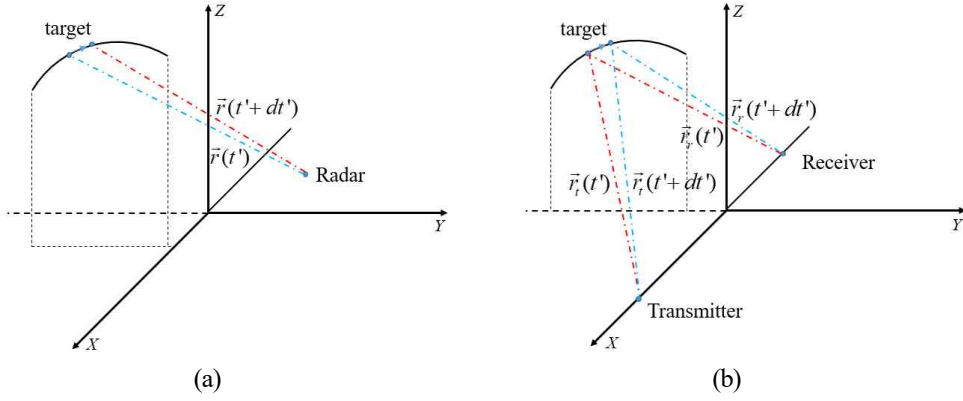
(2) 병진운동 보상

탄도와 기만체에 실제 비행 모습의 시뮬레이션은 성공했지만, RP에는 병진운동으로 인한 표적 위치의 변화가 포함되어 있어 MD 영상을 만들기 적합하지 않다. 따라서, 표적의 이동으로 인한 위상차이 보상이 필요하다. 느린 시간 t' 에서 주파수 f 에 대한 수신 신호는 $s_r(t', f)$ 로, 보상 후의 신호는 $s_r'(t', f)$ 로 정의한다[10].

$$s_r'(t', f) = s_r(t', f) \exp(j4\pi f dv(t')/c), \quad (19)$$

모노스태틱 시나리오 따라서 $dv(t')$ 는 다음과 같다.

$$dv(t') = \left| \frac{\vec{r}(t' + dt') - \vec{r}(t')}{dt'} \right|, \quad (20)$$



[그림 2-10] (a)모노스테틱 위상보상 시나리오, (b)바이스테틱 위상보상 시나리오

여기서 $\vec{r}(t')$ 는 시간 t' 에서 표적까지의 거리이고, dt' 는 펄스단위시간이다(그림 2-10(a)).

바이스테틱의 경우에는 발신 레이더로부터의 속도 차이가 $dv_t(t')$, 수신 레이더로부터의 속도 차이가 $dv_r(t')$ 를 다음과 같다.

$$dv_t(t') = \left| \frac{\vec{r}_t(t' + dt') - \vec{r}_t(t')}{dt'} \right|, \quad (21)$$

$$dv_r(t') = \left| \frac{\vec{r}_r(t' + dt') - \vec{r}_r(t')}{dt'} \right|, \quad (22)$$

$\vec{r}_t(t')$ 와 $\vec{r}_r(t')$ 는 t' 시간에 발신 레이더와 수신 레이더부터의 거리이다.(그림 2-10(b)).

(3) 모노스테틱/바이스테틱에 도플러 주파수 차이 분석

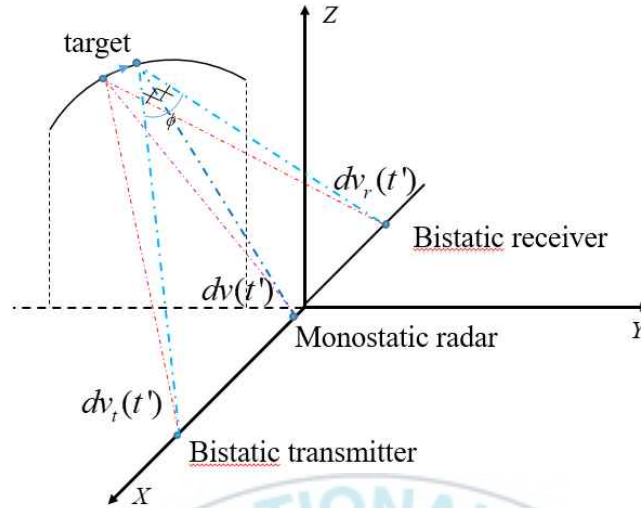
본 절에서는 모노스테틱과 바이스테틱의 도플러 주파수 차이를 분석한다.

식(21)-(22) 따라서 모노스테틱 도플러 주파수가 f_{Mono} 그리고 바이스테틱 도플러 주파수가 f_{Bi} 로 다음과 같이 정의한다[12].

$$f_{Mono} = \frac{1}{\lambda} dv(t'), \quad (23)$$

$$f_{Bi} = \frac{1}{\lambda} \frac{[dv_t(t') + dv_r(t')]}{2}, \quad (24)$$

여기서 λ 는 파장이다.



[그림 2-11] 모노스테틱과 바이스테틱의 도플러 주파수 차이

모노스테틱 레이더의 위치가 (그림 2-11)와 같이 바이스테틱 발신레이더와 수신레이더 위치의 중심에 있다고 가정하고 바이스테틱 각도는 ϕ 로 정의한다면 f_{Mono} 와 f_{Bi} 차이가 다음 식과 같다 [11].

$$f_{Bi} = \frac{1}{\lambda} \frac{[dv_t(t') + dv_r(t')]}{2} = \frac{1}{\lambda} dv(t') \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) = f_{Mono} \cos\left(\frac{\phi}{2}\right), \quad (25)$$

식(25) 따라서 f_{Mono} 와 f_{Bi} 의 차이가 바이스테틱 각도 ϕ 의 영향을 받는 것을 알 수 있다[12].

5. 미세도플러를 이용한 구분기법 연구

(1) CNN 구조 설명



[그림 2-12] CNN구조

탄도와 기만체를 효율적으로 식별하기 위해 시간-주파수 데이터를 이용한 신경망으로 식별한다. 이와 같은 데이터는 일반적인 이미지와 다르기

때문에 CNN 구조를 (그림 2-7)와 같이 디자인하였다.

Convolution 층은 총 4단계에서 수행되며 본 논문에서는 filter size를 3×3 , 필터 개수를 각각 4, 8, 16, 32로 설정하였다. 각 convolution 공정을 진행한 후에 빠르게 훈련하기 위하여 배치정규화 (batch normalization)를 이용하였고, 활성화 함수(activation function)은 relu를 이용하였다. 제3의 convolution층 과 제4의 convolution층의 경우, relu 뒤에 max pooling층을 추가하였다. 마지막으로 FC(fully connected)층을 이용해서 2가지 결과를 출력하였으며, softmax층을 통과하여 표적을 식별하였다.

(2) 시나리오에 기반한 학습데이터 구성기법

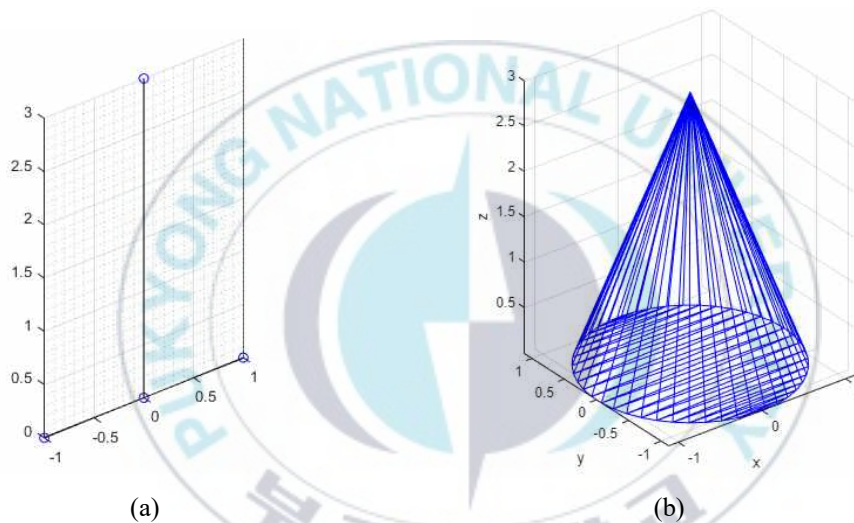
표적은 탄도와 기만체 두 가지 종류가 있고 수신 레이더에서 얻은 MD 영상을 입력데이터로 하였고, 모두 훈련용 데이터가 훈련 실행 전의 학습 (training)과 검증(validation) 두 종류의 데이터로 나뉜다. 본 연구에서는 학습과 검증의 비율을 8:2로 설정하였다.

훈련을 시행하는 옵션에서 사용할 솔버(solver)는 adam 최적화 함수를 사용하며 최대 epoch 횟수를 5로 설정하고, 각 epoch 전에 훈련 데이터를 종합한 후 훈련시켰다.

II. 실험 결과

1. 시뮬레이션의 조건

제안된 기법은 PS모델과 PO모델을 사용한다. 다음 그림과 같이 PS 모델은 4개의 분산된 산란점(scatter point)으로 구성하며(그림 3-1(a)) PO 모델은 CAD mesh 형태의 데이터로 설계된다(그림 3-1(b)).



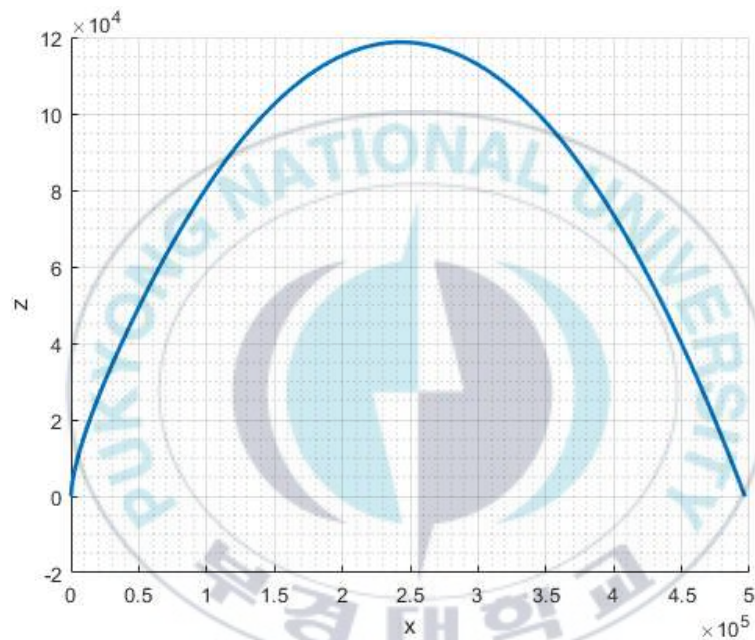
[그림 3-1] (a)PO모델, (b)PO 모델

두 모델 모두 높이 3m, 바닥 반경은 0.5m로 모델링 되었으며, 원추운동의 진폭은 15° 로, 각속도는 4Hz로 설정하였으며, 회전운동의 주기는 원추운동과 동일하다.

레이더는 중첩(aliasing)을 방지하기 위해 40MHz의 대역폭과 4000 Hz의 PRF로 설정하였으며, 주어진 대역폭에 해당하는 거리해상도(range resolution)는 3.75m이므로 미세운동하는 표적을 포함하기에 적절하다. 표적 관측 시간을 0.5초로 설정하였다(표 3-1 참조). 탄도미사일 비행 궤도의 경우, 그림 3.2과 같이 500km 범위의 SCUD-C 탄도미사일의 각종변수를 탄도방정식에 대입하여 계산된 궤적[13, 14]을 사용하였다.

[표 3-1] 시뮬레이션 조건 변수

시뮬레이션 변수	값	단위
대역폭(bandwidth)	40	MHz
중심 주파수	10	GHz
PRF	4000	Hz
회전 각속도	0	Hz
원주 각속도	4	Hz
원구 진폭	15°	
관측 시간	0.5	s

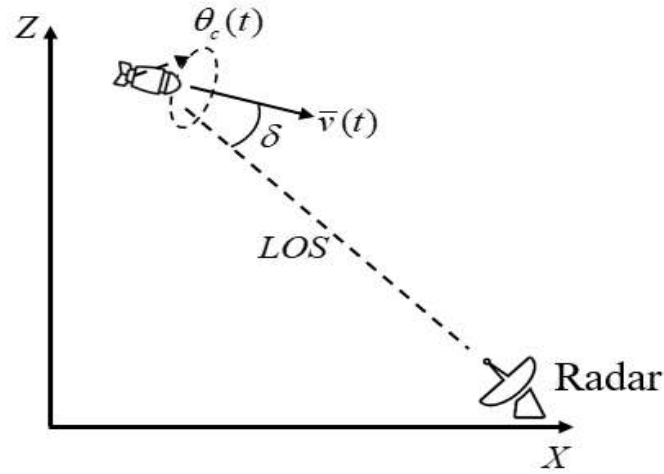


[그림 3-2] 탄도미사일 비행 궤도

2. PS모델과 PO모델의 MD영상을 비교

기존 PS 모델 산란점의 정확성을 비교하기 위해 모노스태틱 시나리오에서 먼저 시뮬레이션을 수행하였다.

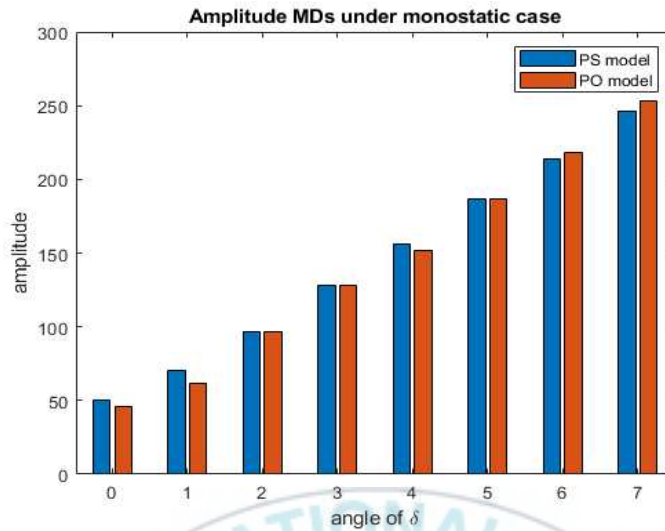
표적은 고도 10km 위치를 있고, PO와 PS의 MD영상 차이를 직관적으로 분석하기 위하여 레이더 위치는 궤도와 같은 평면의 x 축에서 LOS와 표적비행 속도벡터의 각도 $\delta m = 1^\circ \sim 7^\circ$ 에 위치를 설정하였다(그림 3-3).



[그림 3-3] 모노스테틱 시나리오

MD최대 amplitude에 대해 10%를 문턱값(threshold)으로 설정하여 노이즈를 제거였고 제일 큰 위치 $f_{\max}$ 와 제일 작은 위치 $f_{\min}$ 을 찾아 $\min(f_{\max}) - \max(f_{\min})$ 으로 최대 미세운동 주파수를 구하였다. 이를 관측 각도 δm 마다 비교 분석하였다.

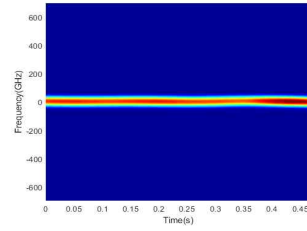
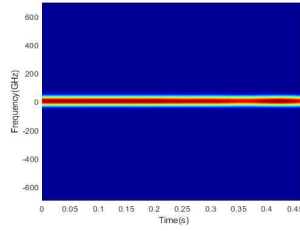
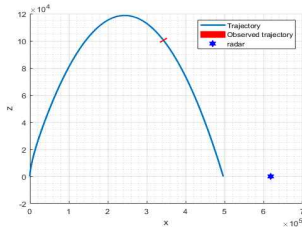
δm 이 커질수록 최대 미세운동 주파수의 너비는 증가하였다(그림 3-4). PS 모델의 최대 미세운동 주파수의 너비는 δm 에 따라 70Hz, 97Hz, 128Hz, 156Hz, 187Hz, 214Hz, 246Hz로 관측각도에 비례하여 증가하였다. PO 모델의 경우, 62 Hz, 97 Hz, 128 Hz, 152 Hz, 187 Hz, 218 Hz, 253 Hz로 상대적으로 크기가 약간 작게 나타났다(그림 3-4). 이는 진행방향에 대하여 관측각도가 커질수록 탄두의 회전평면과 관측각도가 이루는 각도가 커져 미세도플러가 더 크게 반영되기 때문이다.



[그림 3-4] δ_m 에 따른 MD 진폭 비교

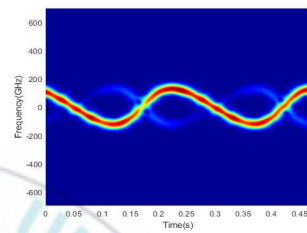
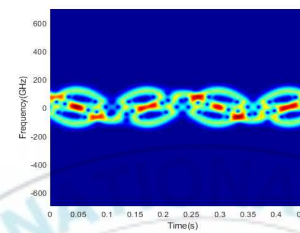
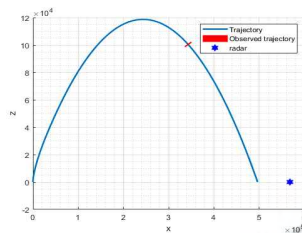
$\delta_m = 0^\circ$ 일 경우, LOS와 미세운동 평면이 수직이기 때문에 LOS에 투영된 미세운동 속도는 0Hz이므로 PS와 PO는 유사한 결과를 보이며(그림 3-5 (a)), 미세도플러 해상도 문제로 인하여 50Hz가 계산되었다.

반면 $\delta_m = 4^\circ$ 와 7° 일 경우 PO 모델은 산란원에 따라 다른 결과를 보인다(그림 3-5 (b), (c)). 아래쪽에 있는 2개의 산란원의 경우, PS 모델의 등방성 산란원과 유사한 위치에 존재하여 PS 모델과 유사한 미세도플러를 형성한다. 하지만 각도에 따른 산란원 크기의 변화로 인하여 PS 모델은 전체 시간에 대하여 크기가 일정한 반면, PO 모델의 경우 산란점 1개는 시간에 따라 크기변화가 매우 심하다. 또한 PS 모델의 nose tip에 위치한 산란원의 경우, PS 모델에서는 낮은 MD로 잘 관측이 됨을 확인할 수 있지만, PO 모델의 경우 관측되지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 PO가 실제 산란원의 주파수 및 주파수 의존성을 포함하므로 실제와 더 근접함을 확인할 수 있다.



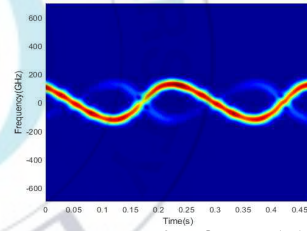
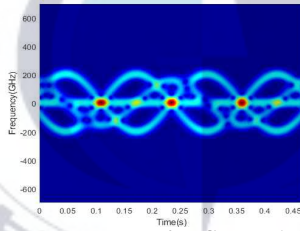
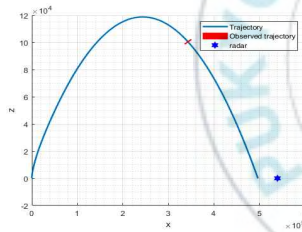
MD of PS model
(a) $\delta_m = 0^\circ$

MD of PO model



MD of PS model
(b) $\delta_m = 4^\circ$

MD of PO model



MD of PS model
(c) $\delta_m = 7^\circ$

MD of PO model

[그림 3-5] PS모델과 PO모델의 MD 비교

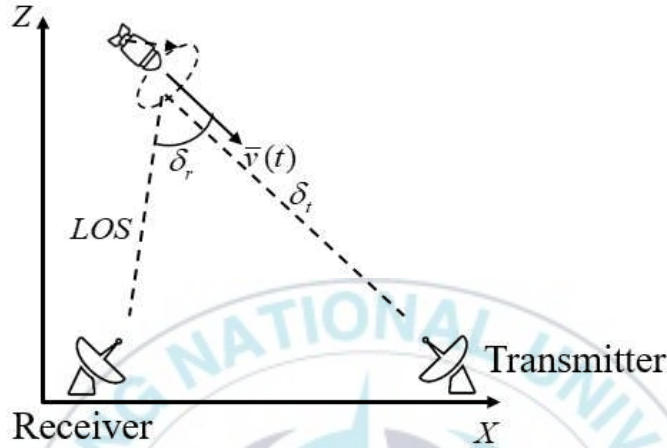
3. 모노스테틱/바이스테틱 MD 영상의 비교

이 절에서는 모노스테틱 와 바이스테틱의 미세운동 주파수의 차이를 분석한다.

표적에 대한 발신 레이더와 수신 레이더 사이의 각도는 MD의 주파수 진폭에 영향을 끼친다. 따라서 시나리오를 간략하기 위해 표적이 발신 레이더 방향으로 비행하는 위치에 있도록 레이더 위치를 설정하였다(그림 3-6).

발신 레이더 LOS 방향의 표적의 상대속도가 $-\bar{u}_v(t)$ 이므로, $\delta_t(t)$ 는

LOS와 표적의 비행 방향 벡터의 각도로 정의하며 발신 레이더를 $\delta_t(t) = 0^\circ$ 에있는 위치에 고정했다. 반면에 수신 레이더가 바이스태틱 각도 δ_r 은 1° 부터 7° 가 되도록 레이더의 위치를 설정하였다..



[그림 3-6] 바이스태틱 시나리오

미세운동은 표적의 비행 벡터와 수직이기 때문에, 모노스태틱의 미세운동 도플러 $f_{MD,m}$ 는 다음과 같다

$$f_{MD,m} = \frac{1}{\lambda} v_{MM}(t) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta_m\right), \quad (26)$$

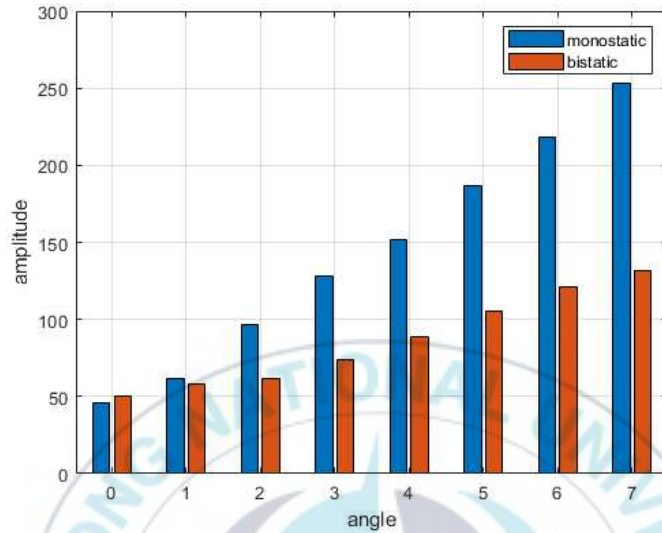
또한 바이스태틱의 미세운동 도플러 $f_{MD,bi}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_{MD,bi} &= \frac{1}{\lambda} \frac{[v_{MM}(t) \cos(\pi/2 + \delta_t) + v_{MM}(t) \cos(\pi/2 + \delta_r)]}{2}, \\ &\simeq \frac{1}{\lambda} d\theta(t) \frac{\cos(\pi/2 - \delta_r)}{2} \end{aligned} \quad (27)$$

여기서 $v_{MM}(t) = r\theta_c(t)$ 이며, r 은 미세운동 회전 반경, 그리고 $\theta_c(t)$ 는 원추운동의 각속도이며, $\cos(\frac{\pi}{2} - \delta_t)$ 에서 $\delta_t = 0^\circ$ 이기 때문에 무시할 수 있다. 또한 $\delta_m = \delta_r$ 이기 때문에 $f_{MD,bi}$ 와 $f_{MD,mono/2}$ 가 동일함을 알 수 있다.

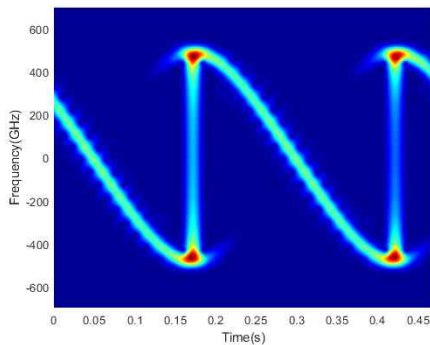
이러한 원리로 인하여 시뮬레이션 결과 그림 3.7과 같이 모노스태틱 레이더에서 얻은 MD 진폭은 δ_m 이 증가함에 따라 각각 46Hz, 62Hz, 97Hz, 128Hz, 152Hz, 187Hz, 218Hz, 253Hz로 나타났으며, 바이스태틱 레이더의 경우는 50Hz, 58Hz, 62Hz, 74Hz, 89Hz, 105Hz, 121Hz, 132Hz를 얻었다. 따

라서 수학적 원리 및 시뮬레이션 결과를 통하여 바이스태틱 레이더에서 얻은 진폭은 그림 3.4의 모노스태틱 레이더 결과의 절반임을 확인 할 수 있다.

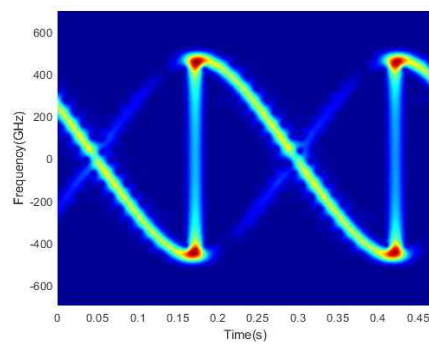


[그림 3-7] 모노스태틱과 바이스태틱 의 MD 진폭 비교

그림 3-7을 MD 영상에서 분석하기 위하여 $\delta_m=15^\circ$ 와 $\delta_r=30^\circ$ 에서 모노스태틱 레이더와 바이스태틱 레이더의 MD 영상을 비교하였다. 그림 3-8에서 보는 바와 같이 진폭이 유사함을 확인할 수 있다. 영상의 진폭은 유사하지만 산란원의 모노스태틱 및 바이스태틱 성질은 다르기 때문에 $t = 0 \sim 0.15$ 초 와 $0.2 \sim 0.4$ 초에서 모노스태틱의 경우 산란원 하나만 보이지만 바이스태틱은 모든 산란 원을 볼 수 있다.



(a) 모노스태틱($\delta_m = 15^\circ$)



(b) 바이스태틱 ($\delta_r = 30^\circ$)

[그림 3-8] 모노스태틱과 바이스태틱 의 MD 진폭 비교($\delta_m = 15^\circ$ 와 $\delta_r = 30^\circ$)

4. CNN를 이용한 탄두 구분

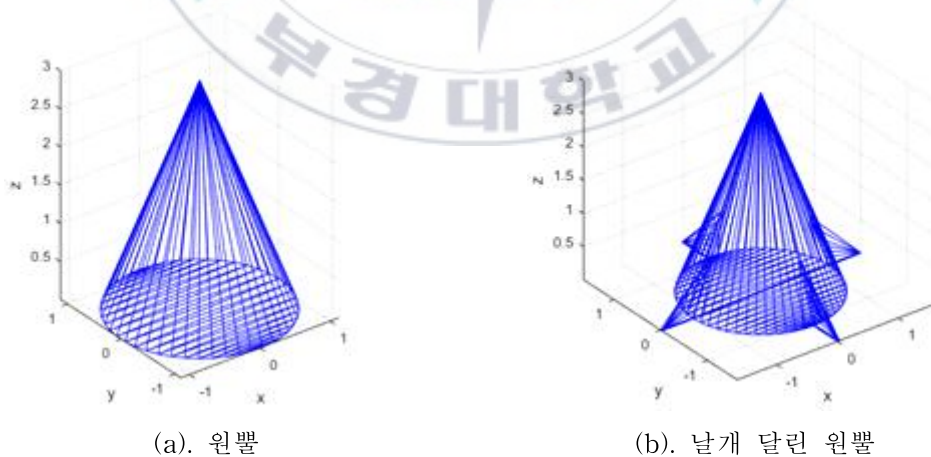
(1) 시뮬레이션 준비

본 절에는 모노스테틱, 바이스테틱, 멀티스테틱과 CNN 구분기를 이용하여 탄도 식별 시뮬레이션을 진행하였다. 앞서 제안된 CNN 구분기를 이용하여 각 시나리오 식별률을 구하였다. CNN 구분기를 이용하기 위한 훈련데이터를 수집해야 하므로 다음과 같은 시뮬레이션을 준비하였다.

1) 표적 모델링

모델은 원뿔 모델(그림 3-9(a))을 사용하고 원뿔 모델에 4개의 날개가 추가되는 모델(그림 3-9(b))을 추가적으로 사용하였다. 모두 CAD를 이용해 설계한 mesh type 모델이며 크기는 높이 3m 및 직경 1m이다.

훈련데이터의 미세운동 변수는 (표3-2)와 같이 균일하게 샘플링된 변수들로 설정되었다. 탄도의 경우 2Hz/s, 3Hz/s, 4Hz/s의 속도로 원추 운동하며 1°의 간격으로 3°-10°의 진폭범위를 가진다. 따라서 미세운동은 총 24가지의 종류로 구성되었다. 기만체의 경우 각속도가 2Hz/s, 3Hz/s, 4Hz/s의 떨림운동을 가지며 랜덤 방향의 회전운동을 수행한다. 8번의 반복 시뮬레이션을 하여 기만체 또한 총 24개의 미세운동을 가지도록 설정하였다.



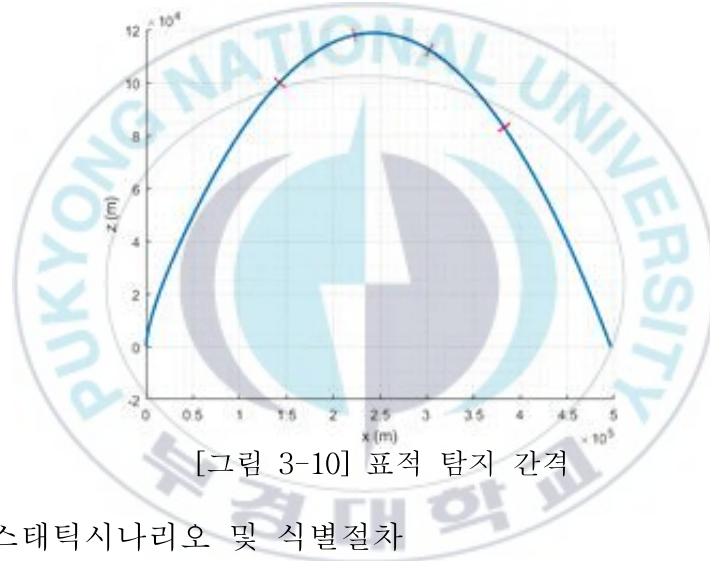
[그림 3-9] 탄두 모델 (a)원뿔 표적 (b)날개 달린 원뿔 표적

[표 3-2] 설정된 미세운동 변수

탄두		기만체	
회전 운동(Hz/s)	0	떨린 운동(Hz/s)	2 - 4
원주 운동(Hz/s)	2 - 8	랜덤 개수	8
진폭	3° - 10°		
총 데이타수	24	총 데이타수	24

2) 비행궤도상 관측된 지점

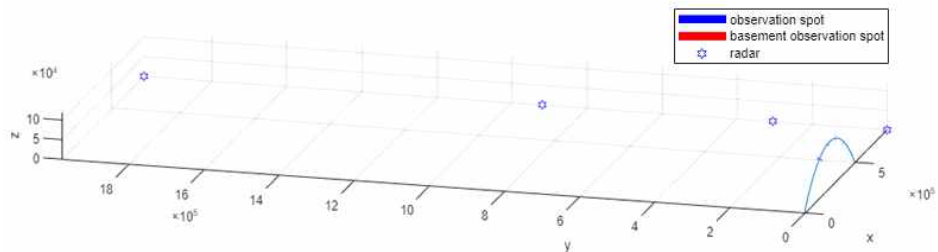
표적이 비행궤도를 따라 9만 미터 상공까지 상승할 때 레이더에 관측된다고 가정하고 50초마다 지속적으로 추적하는 것을 가정하였다. 따라서 총 궤도상에 그림 3-10과 같은 4개의 위치에서 표적을 관측하였다.



[그림 3-10] 표적 탐지 간격

3) 모노스테틱시나리오 및 식별절차

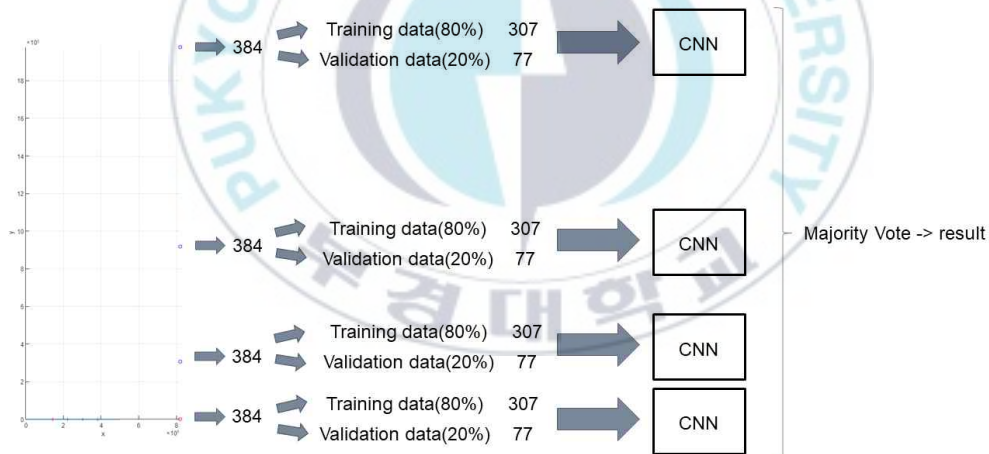
실제 탄도미사일의 공격 시나리오의 경우, 미사일이 관측지점을 향하여 오고 있기 때문에 비행 궤도 아래에 레이더를 설치하지 않았다. 따라서 위치 설치가 관측점 3번 점, 그림 3.11 궤도에 빨간 점의 위치를 기준으로 표적의 직진벡터의 연장선과 xy평면의 접점에서($\delta_m=0$) 1번 레이더를 설정하였다. 또한 Y축을 따라 $\delta_m=30, 60, 75^\circ$ 의 위치에 2, 3, 4번 레이더를 설정하였다.



[그림 3-11] 모노스테틱 관측 시나리오

모노스테틱 식별절차는 (그림 3-12)와 같다 각 레이더는 CNN 훈련을 거쳐 식별하였으며, 각 CNN 구분기의 결과를 다수결(majority vote)을 이용하여 최종 구분을 함으로써 성능을 개선하였다.

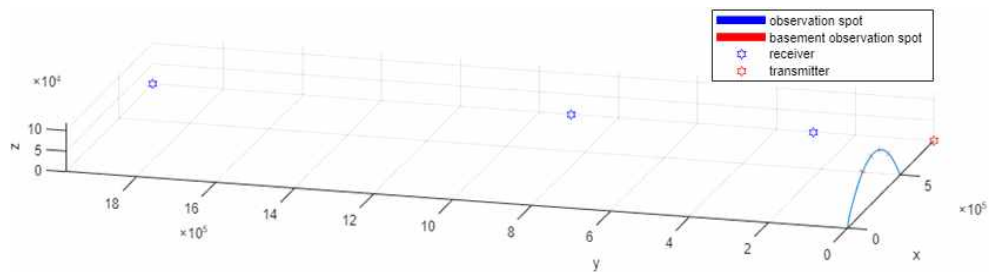
학습데이터 개수의 경우, 레이더별로 모델수 x 관측점 개수 x 미세운동 표적개수 = 384개를 수집하였으며, 학습 시에 학습데이터와 검증데이터를 8:2를 나뉘서 CNN 구분기에 입력하여 학습을 진행하였다(그림 3-12 참조).



[그림 3-12] 모노스테틱의 식별절차

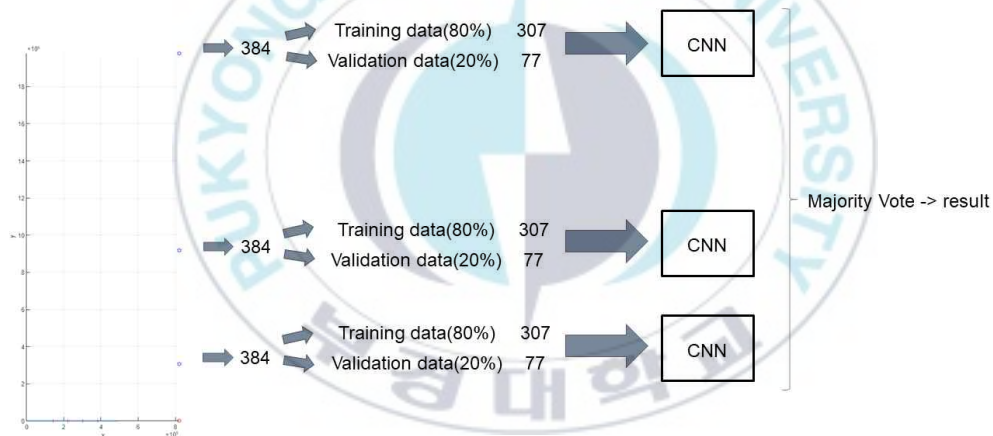
4) 바이스테틱 시나리오 및 식별절차

바이스테틱 시나리오의 경우, 송신레이더가 앞의 모노스테틱 1번 레이더 위치와 같은 위치(그림 3-13 붉은 오각별 표시)에 있도록 설정하였으며, 수신레이더는 모노스테틱 2, 3, 4번 레이더 위치와 같은 위치(그림 3-13 청색 오각별 표시)에 설정하였다.



[그림 3-13] 바이스테틱 시나리오

바이스테틱 식별절차는 (그림 3-14)과 같다. 모노스테틱에 비하여 수신 레이더가 1개 부족하기 때문에 데이터 전체 학습데이터 수는 1152개(= 384 개/레이더 x 3 바이스테틱 레이더)를 수집하였으며, 마찬가지로 학습데이터와 검증데이터는 8:2를 나눠서 CNN 구분기를 입력하여 훈련하였다(그림 3-14 참조).



[그림 3-14] 바이스테틱 식별절차

5) 멀티스테틱시나리오 및 식별절차

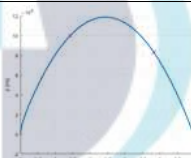
멀티스테틱 시나리오의 경우 바이스테틱 시나리오를 기반으로 4개의 레이더 위치에 모노스테틱 레이더 4개를 설치하였다. 수신레이더 총 7개 있고 각각 레이더의 CNN구분기를 통과 후에 마지막 다수결 기법으로 결과를 종합하였다.

6) 학습데이터 구성

학습데이터는 표 3-3과 같이 학습데이터 변수의 범위 내에서 랜덤하게 선택되어 구성되었다. 탄두의 경우, 원주회전운동 속도를 2 ~ 4Hz, 진폭이 3 ~ 10 범위에서 랜덤하게 설정하였으며, 기만체의 경우 떨림운동 각속도

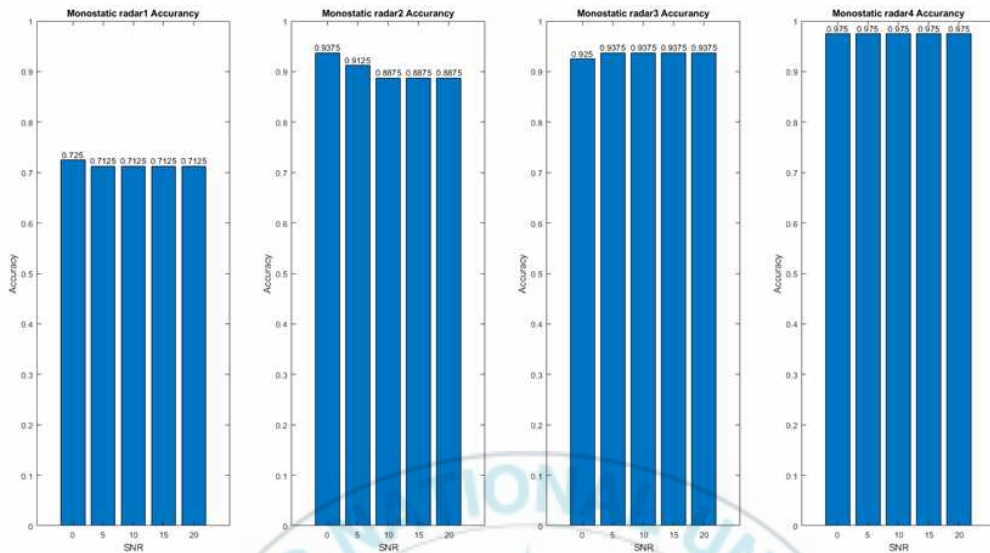
를 2 ~ 4 Hz 범위 및 랜덤한 회전방향으로 설정하였다. 궤도상 표적의 위치의 경우, 레이더에서 관측한 최초점부터 마지막점까지 범위 내에서 모든 위치를 랜덤하게 설정하였다. 레이더 시나리오의 경우, 모노스테틱 레이더는 수신레이더 4개 중에 1개로 랜덤하게 설정하였으며, 유사한 방법으로 바이스테틱레이더는 수신레이더 3개 중에 1개를 랜덤하게 설정하였다. 따라서 모노스테틱 및 바이스테틱 각각 경우는 각 200개 테스트 데이터를 수집하였다. 잡음의 영향을 모사하기 위하여 모든 테스트 데이터에 백색잡음(white Gaussian noise)을 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)에 따라 추가하였다. SNR의 경우 0 ~ 20dB로 5dB 간격으로 구성하였다.

[표 3-3] 테스트 데이터

테스트 데이터 변수				개수
미세운동	탄두	원주 운동	2 - 4 Hz/s	200
		진폭	3° - 10°	
	기만체	떨림운동	2 - 4 Hz/s	
		방향	랜덤	
궤도 관측 점				
관측 레이더			1-4번	

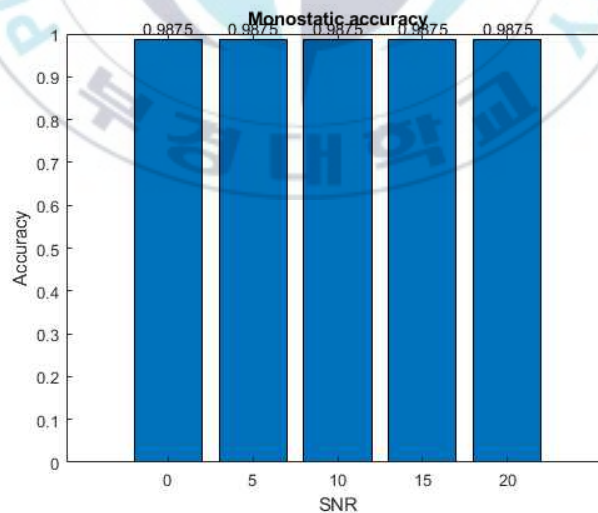
(2) 시뮬레이션 결과

모노스테틱 겨우에 각 레이더 식별결과는 그림 3-15와 같다. 1번 레이더의 식별 정확도는 최고 72%, 최소 71.25%, 평균 71.5%, 2번 레이더의 식별 정확도는 최고 93.75%, 최소 88.75%, 평균 90.25%, 3번 레이더의 식별 정확도는 최고 93.75%, 최소 92.5%, 평균 93.5%, 4번 레이더의 식별 정확도는 97.5% 정도로 관측 레이더별로 편차가 있음을 확인할 수 있다. 특히 1번 레이더의 경우, 표적과 시선의 각도 δ_m 이 거의 1°와 유사하여 미세운동 평면의 법선벡터 방향과 거의 일치한다. 따라서 MD 영상이 거의 0에 근접하여 1번 레이더에서 낮은 구분율이 달성됨을 확인할 수 있었으며, 미세운동 평면의 법선벡터와 관측각도가 커질수록 구분율이 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 모노스테틱 레이더의 경우 표적의 진행방향에서 일정한 관측각도가 확보되어야 함을 확인할 수 있다.



[그림 3-15] 모노스테틱 각 레이더 식별정확도

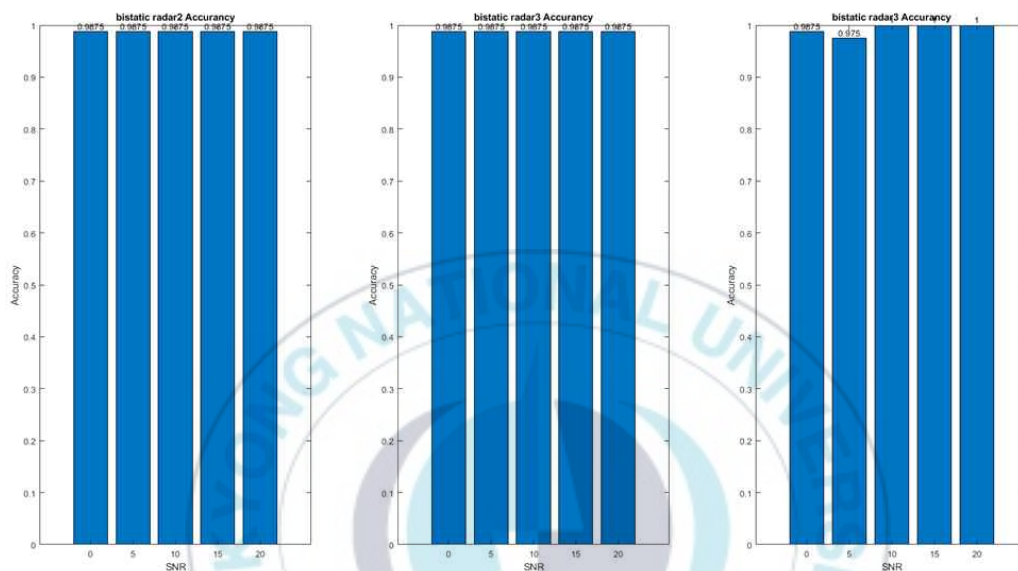
4개 레이더를 다수결의 원리를 이용하여 융합한 결과는 그림 3-16과 같다. 1번 레이더의 수신성능이 매우 낮음에도 불구하고 2 ~ 4번 레이더의 구분성능이 높아 전체적으로 정확도가 98.75%에 도달하였음을 확인할 수 있다.



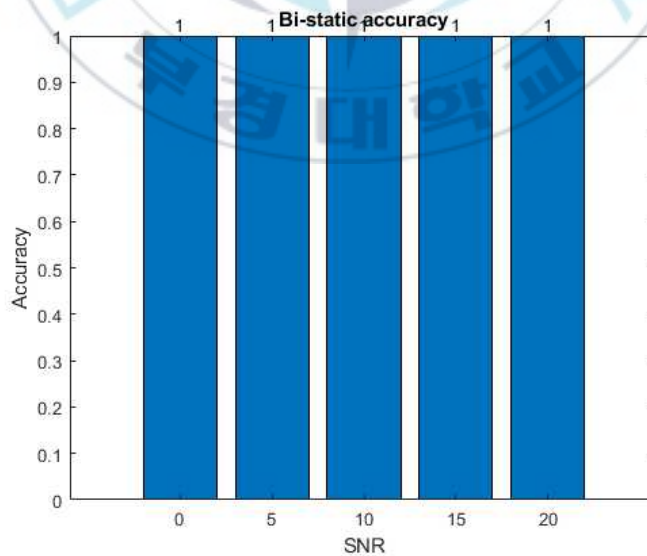
[그림 3-16] 모노스테틱 식별 정확도(다수결)

바이스테틱 경우 각 레이더에 의한 탄두 식별 정확도가 그림 3-17과 같다. 바이스테틱 시나리오의 경우, 앞의 모노스테틱 레이더 1번과 같이 진행 방향 $\approx$ 관측방향인 경우가 없으므로 미세도플러는 시간-주파수 영역에서

고르게 퍼진다. 따라서 표적 고유의 성질이 표현되므로 2번 레이더와 3번 레이더의 식별 정확도가 모두 98.75%에 근접하였으며, 3번 레이더의 식별 정확도는 최고 100%, 최소 97.5%, 평균 99.25%를 나타내었다. 따라서 다수결에 의한 구분을 한 후 100%를 도달하였음을 확인할 수 있다(그림 3-17).



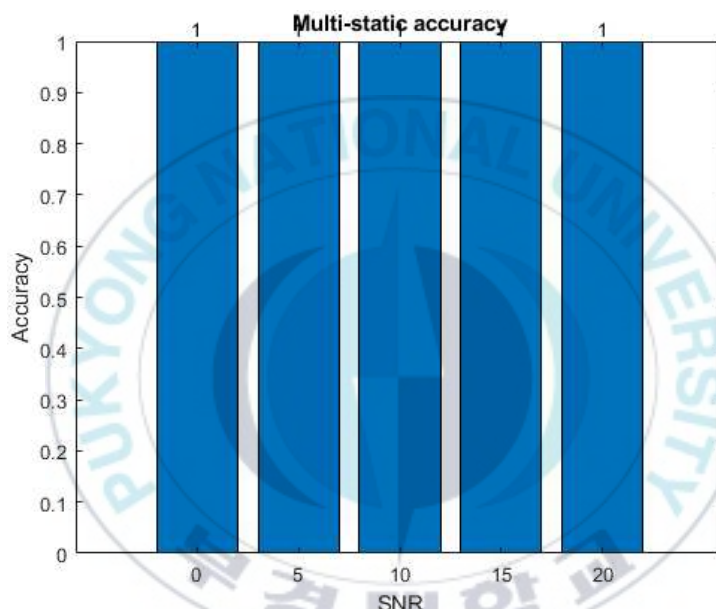
[그림 3-17] 바이스태틱 각 레이더 식별정확도



[그림 3-18] 바이스태틱 식별 정확도(다수결)

최종적으로, 멀티스테틱의 경우 각 레이더의 구분결과를 앞에서 사용되

있던 모노스테틱 및 바이스테틱 레이더의 결과와 동일하다. 7가지 레이더를 모두 다수결의 원리로 융합할 경우, 두 경우에 비하여 7개의 다수결 샘플이 확보되기 때문에 모든 SNR에서 100%를 나타냄을 확인할 수 있다(그림 3-19). 이러한 시험결과를 바탕으로, 모노스테틱 및 바이스테틱으로 구성된 멀티스테틱 데이터를 확보하여 구분을 수행할 경우, 구분성능이 증대될 수 있음을 확인할 수 있다. 다만 이 실험의 경우 바이스테틱의 성능이 매우 높아 멀티스테틱과 동일한 결과를 얻었으므로, 이에 대한 추가적인 시뮬레이션이 필요하다.



[그림 3-19] 멀티스테틱 식별 정확도

III. 결론

본 연구에서는 효율적인 탄두 및 기만체 구분을 위하여 탄두와 기만체의 미세운동을 모델링 하였다. 이를 위하여 고정된 지역좌표계에서 로드리게스 회전행렬 방정식을 바탕으로 탄두와 기만체의 미세운동을 모델링 하였으며, 지역좌표의 회전축과 실시간 탄두의 운동방향 사이의 변환행렬을 사용하여 실제 비행궤적에서 비행하는 미세운동 자세를 모델링 하였다. 이러한 미세운동을 모델링한 후, 최종적으로 모노스테틱, 바이스테틱 및 멀티스테틱 관측 시나리오에 적합하도록 레이더를 배치한 후, PO 기법을 이용하여 반사신호를 계산하였으며, 이를 바탕으로 다양한 실험을 수행하였다.

기존에 적용하는 PS 모델의 등방성 산란점 특성의 한계점을 분석하기 위하여 모노스테틱 시나리오에서 PS모델과 PO모델을 비교하였다. PS 모델을 통하여 얻은 MD 영상의 경우, 전체 시간에서 큰 변화없이 산란점이 형성된데 반하여 PO 모델에서 얻은 MD 영상의 경우, 각 산란점의 각도에 따른 의존성을 잘 표현하여 실제 표적의 MD를 더 효과적으로 표현할 수 있음을 확인하였다.

모노스테틱 및 바이스테틱 시나리오에 의한 MD 영상 특성을 비교하기 위하여 제안된 모델링 기법을 활용하였다. 수학적 원리를 통하여 모노스테틱 MD 영상이 바이스테틱 MD영상에 비하여 진폭이 더 크게 나타남을 증명하였으며, 회전평면이 레이더 시선 방향과 일치할 경우 MD의 주파수 진폭이 0에 가까움을 실험을 통하여 검증하였으며, 또한 모노스테틱과 바이스테틱 관측각도에서 산란점의 변화를 PO 모델링을 통하여 확인하였다.

마지막으로 모노스테틱, 바이스테틱 및 멀티스테틱 관측 시나리오에 대하여 CNN 구분기를 활용하여 탄두의 식별 정확도를 분석하였다. 각 기법 별로 궤적상 총 4가지 샘플링 지점에서 탄두 및 기만체의 미세운동을 샘플링하여 학습데이터로 활용하였으며, 학습데이터 범위 내의 위치 및 변수를 랜덤하게 샘플링하여 시험데이터로 실험을 수행하였다. 구분실험 결과, 모노스테틱 구분기의 경우 레이더 시선 및 회전축이 유사할 경우 모노스테틱 기법의 성능저하가 심하게 발생하였으며, 시선과 회전축의 각도가 클수록 높은 구분성능을 확인할 수 있었다. 또한 낮은 구분성능을 다른 곳에 위치한 모노스테틱 레이더와의 다수결 구분을 통하여 극복할 수 있었다. 바이스테틱의 경우, 모노스테틱에 비하여 레이더의 숫자는 1개가 적었지만

회전평면과 바이스태틱 시선이 일치하지 않아 100%에 가까운 구분결과를 확인할 수 있었으며, 다수결에서 100% 구분결과를 달성하였다. 모노스태틱과 바이스태틱 데이터를 모두 활용하는 멀티스태틱의 경우 100%의 구분결과를 확인할 수 있었다. 따라서 실제 시나리오에서 레이더 자원이 충분하고 데이터링크 등의 문제가 해결된다면 멀티스태틱 레이더를 활용하여 구분성능을 크게 높일 수 있을 것으로 판단된다.



IV. 참고문헌

- [1]. K. R. Fowler, "Instrumentation for ballistic missile defense: lessons learned from the LEAP experiment," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 5, pp. 1092-1095, Oct. 1998.
- [2]. B. Atrouz, H. Aait Ouazzou and H. Kimouche, "Features influence on targets classification performance using the high range resolution profiles (HRR profiles)," *2007 IET International Conference on Radar Systems*, pp. 1-4, 2007.
- [3]. J. M. Munoz-Ferreras and F. Perez-Martinez, "On the Doppler Spreading Effect for the Range-Instantaneous-Doppler Technique in Inverse Synthetic Aperture Radar Imagery," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 7, no. 1, pp. 180-184, Jan. 2010.
- [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] Chatzigeorgiadis, F. and D.Jenn, "A MATLAB Physical-Optics RCS Prediction Code," *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, vol. 46, no.4, pp. 137-139, Aug. 2004.
- [6] I. -O. Choi, S. -H. Park, K. -B. Kang, K. -T. Kim, "Modeling Method of Receiving Radar Signals from Warhead and Decoy with Micro-Motion" *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 3, pp., 243-251, 2019.
- [7] X. -H. Zou, X. -F. Ai, Y. -Z. Li, F. Zhao, and S. -P. Xiao, "Bistatic Micro-Doppler Feature of the Precessing Cone-shaped Warhead," *Journal of Electronics and Information Technology*, vol. 34 no. 3, pp. 609-615, 2012.
- [8] X. -H. Zou, X. -F. Ai, Y. -Z. Li, F. Zhao, S. -P. Xiao. "Bistatic Micro-Doppler of the Spinning Warhead with Fins". *Journal of Electronics and Information Technology*, vol. 34 no. 9, pp. 2122-2127, 2012.
- [9] E. -M. Johan, "Derivation of the Euler-Rodrigues formula for three-dimensional rotations from the general formula for four-dimensional rotations", *arXiv General Mathematics*, 2007.
- [10] S. -B. Cha, S. -W. Yon, S. -H. Hwang, M. Kim, J. -H. Jung, J. -H. Lim, S. -H. Park. "Radar Target Recognition Using a Fusion of Monostatic/Bistatic ISAR Image". *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 16, 12, pp. 93-100, 2018.
- [11] K. A. Othman, P. Fatin Syafiqah Ahmad Kamal, N. E. Abd Rashid and R. Syamsul Azmir Raja Abdullah, "Study of Micro-Doppler Effect on Target Spinning and Precession for Bistatic Radar," *2018 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, pp. 1-4, 2018.
- [12] V. C. Chen, *The Micro-Doppler Effect in Radar*, Artech House, 2001
- [13]. I. -O. Choi, S. -H. Kim, J. -H. Jung, K. -T. Kim, S. -H. Park. "Efficient Recognition Method for Ballistic Warheads by the Fusion of Feature Vectors Based on Flight Phase", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, 6, pp. 487-497, 2019.

- [14] H. -S. Kim, K. -T. Kim, G. -W. Jeon. "A Requirement Assessment Algorithm for Anti-Ballistic Missile Considering Ballistic Missile's Flight Characteristics", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 14, 6, pp. 1009-1017, 2011.

