

함정용 레이더의 표적 속도 보상 방법

A Method of Velocity Compensation of Target for the Naval Radar System

조 원 민*

Won-min Cho

Abstract

In the naval environment, a naval radar has many obstructions of velocity, such as rotation and velocity of ship. In the common situation, the rotations such as roll, pitch and yaw don't influence the velocity of the target. But because the naval radar is located on the top of the mast, there is some influence to the target velocity. When we trace the target, radar controller doesn't use hits whose doppler banks are zero. So, we must compensate the target velocity for the velocity error. This paper suggests a method of velocity compensation of target by the velocity vector and how to apply to the stack beam radar if we don't know the height of the target.

Keywords : Naval Radar(함정용 레이더), Velocity Compensation(속도 보상), Roll(롤), Pitch(피치), Target Velocity(표적 속도), Stack Beam Radar(스택빔 레이더)

1. 서론

일반적으로 3차원 레이더는 거리, 방위각, 고각 외에 속도라는 또 다른 정보를 얻는다. 이 중, 거리, 방위각, 고각은 표적의 위치 정보로서 함정의 절대 좌표와 측정된 표적의 절대 좌표를 통해서 좌표를 상대적으로 쉽게 계산할 수 있다. 하지만, 표적의 속도를 측정하는 경우는 이와는 다른 문제를 가진다. 레이더가 표적의 속도를 인식할 때, 표적과 레이더와의 접선 방향 속도는 측정이 불가하다. 우리가 레이더를 통해서 얻을 수 있는 정보는 수신된 표적 정보의 도플러 변화치를 통해서 얻어낸 접선 방향으로의 속도뿐이다.

이 때, 레이더로 수신되는 표적의 정보는 우리가 원하는 움직이는 표적의 정보만이 아닌 정지해있는 클러터와 같은 정보도 같이 수신되게 된다. 이 모든 정보를 처리하기 위해서는 엄청나게 많은 표적 정보를 분석해야 하기 때문에 일반적인 레이더는 신호처리 레벨에서 도플러 बैं크 0인 표적을 제거한 후 표적 분석을 실시하게 된다.

지상에 고정된 레이더는 도플러 बैं크 0인 표적이 고정되어있는 표적이라는 것을 쉽게 알 수 있다. 따라서 수신된 표적의 도플러 बैं크가 0인 경우를 제거하면 모든 문제가 해결된다. 문제는 레이더가 고정되어 있지 않고 움직이는 경우이다. 이때는 표적의 도플러 값에 레이더 자체의 이동 속도가 합쳐져 있기 때문에 레이더의 이동 속도를 제거해주는 과정이 필요하다.

Fig. 1과 같은 경우 레이더가 정지해 있기 때문에 같은 속도로 접근하는 모든 표적은 같은 도플러 값을

† 2009년 4월 13일 접수~2009년 6월 26일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 조원민(hobbit97@add.re.kr)

가지게 된다. 하지만, Fig. 2의 경우와 같이 레이더가 움직이는 경우 표적의 속도에는 레이더 자체의 속도가 더해지게 되고, 표적과 레이더가 이루는 방위에 따라서 레이더 자체의 속도는 변하게 된다. 따라서 도플러뱅크 0을 제거하는 경우는 이와 같은 자함 속도 보정을 해 주어야 클러터와 이동 표적을 정확하게 구분할 수 있다.

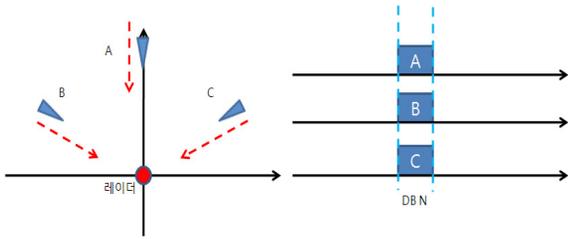


Fig. 1. 자함의 정지 경우

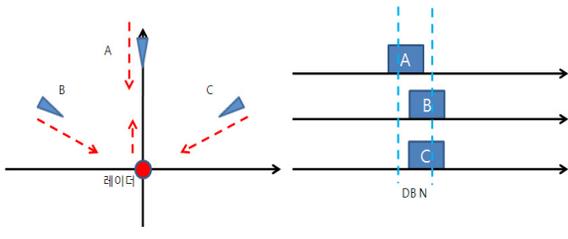


Fig. 2. 자함이 움직이는 경우

함정용 레이더는 이와 같은 수평 방향 속도 외에도 다양한 속도의 영향을 받게 된다. 물 위라는 환경으로 인한 함정의 롤, 피치, 요와 같은 움직임은 높은 마스트에 달린 함정용 레이더에 커다란 속도 변화를 주게 된다. 또한, 조류와 같은 영향으로 함정은 선수의 방향으로만 이동을 하지 않게 된다. 따라서 함정의 실제 이동 속도를 고려하여 속도 보정을 실시하여야 허위 표적의 발생을 막을 수 있다.

SIGNALL 사의 MW08 레이더에도 이러한 표적 속도 보정 식이 들어가 있다. 이 식은 다음과 같다^[1].

$$cVe = -(Ve + H \frac{dp}{dt}) \cos Br - H \frac{dr}{dt} \sin Br \quad (1)$$

- cVe : 보정된 표적의 속도
- Ve : 함정의 함수 방향 속도
- Br : 함수 기준 안테나의 보이사이트 방향
- H : 마스트의 높이

그러나 이 식에서 가정하고 있는 것은 함정의 이동 방향이 바로 함수의 방향과 일치한다는 것이다. 실제 함정의 경우는 조류 또는 물의 흐름에 의해서 배의 함수 방향과 상관없는 방향으로 배가 흘러가는 경우가 많이 있다. 우리나라 연근해에서의 최대 조류 세기는 9.5knot(4.75m/s)에 달할 정도로 세기 때문에^[2] 이와 같은 상황을 고려하여 야 한다. 또한 표적의 고도에 따라서 달라지는 표적의 속도가 고려되어있지 않다. 이런 경우는 원거리 표적에서는 크게 차이가 없지만 근거리의 고도가 높은 표적에 대해서는 큰 속도 오차를 가져올 수 있다. 따라서 새롭게 제시되는 식은 자함의 속도가 함수와 일치하지 않을 경우와 표적의 고도가 높을 경우를 반영한 식이 되어야 할 것이다. 또한 이 논문에서는 표적의 정확한 고도를 알지 못할 때의 표적의 속도를 보정하는 방법에 대해서 제안한다.

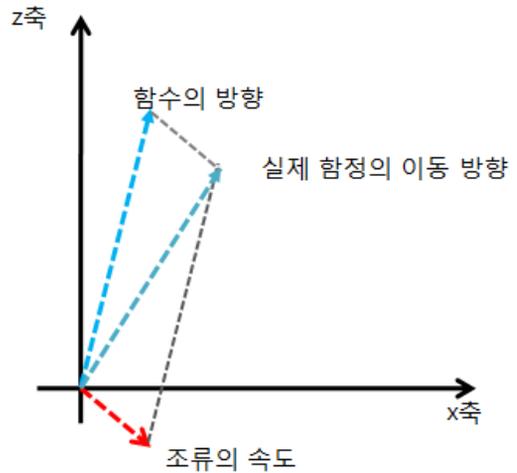


Fig. 3. 함수 방향과 실제 이동 방향

2. 함정의 자체 속도

조류나 기타의 이유로 함정이 함수와 이동하는 방향이 다른 경우 지상 좌표계를 기준으로 함정의 속도는 Fig. 3과 같이 구분되어진다.

- v_x : 지상좌표계의 x축 방향 속도
- v_y : 지상좌표계의 y축 방향 속도
- v_{xShip} : 함정의 우현 방향 속도
- v_{yShip} : 함정의 함수 방향 속도

v : 실제 함정의 속도
 θ_{diff} : 배의 함수 방향과 실제 함정의 속도 방향의 각 차이
 θ_{az} : 함수로부터 틀어진 안테나의 방향
 x_{LAND}, y_{LAND} : 지상 좌표계의 x, y축
 x_{SHIP}, y_{SHIP} : 함정 좌표계의 x, y축

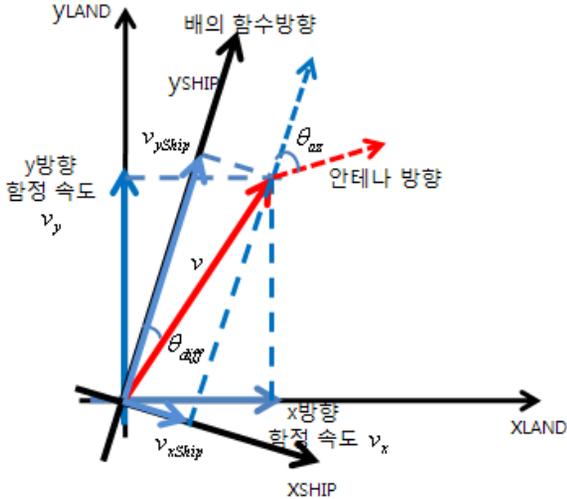


Fig. 4. 함정의 좌표계

우리가 표적을 인식한다는 것은 표적이 안테나 방향에 위치한 경우이므로 안테나에 표적이 탐지되었을 때 함정의 속도는 다음의 그림과 같이 간략화될 수 있다.

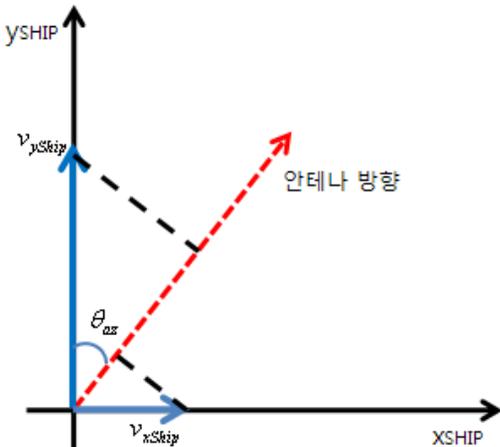


Fig. 5. 표적 방향 자함의 속도

따라서 안테나 방향의 자함의 속도는 다음과 같은 식으로 간략화될 수 있다.

$$v_{ant} = v_{yShip} \cos \theta_{az} + v_{xShip} \sin \theta_{az} \quad (2)$$

하지만 이 식에는 표적의 고각이나, 함정의 흔들림에 대한 요소는 고려되지 않았다.

3. 자함의 흔들림에 의한 속도

함정에서의 자함은 세 가지 방향으로의 흔들림을 겪게 된다. 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)가 그것인데, 이 세 가지 요소는 함정의 자함 위치에는 영향을 주지 않지만 마스트 위에 위치한 레이더의 특성상 표적의 radial 속도에는 영향을 주게 된다.

함정의 마스트가 배의 무게중심으로부터 수직으로 있다고 가정할 때, roll과 pitch로 인한 radial 속도는 다음과 같다.

$$v_{roll} = L \frac{dr(t)}{dt}, \quad v_{pitch} = L \frac{dp(t)}{dt} \quad (3)$$

L : 배의 무게중심으로부터 마스트의 높이

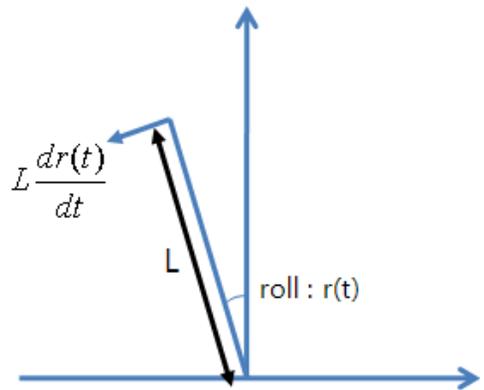


Fig. 6. roll에 의한 마스트 상부 속도

이 때, yaw에 의한 radial 속도는 존재하지 않는다. 또한, 위 식의 속도는 마스트와 접선 방향의 속도가 된다. 따라서 고각 ϕ 를 가지는 표적에 대한 마스트의 roll에 의한 움직임의 식은 속도 벡터와 표적의 방향 사이의 각에 의해서 보정되어야 한다.

다음 그림과 같은 경우를 생각하자.

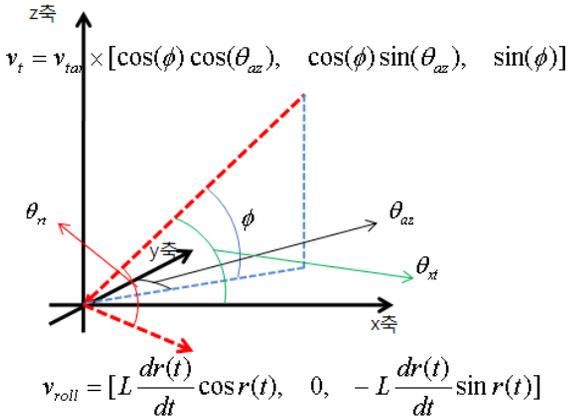


Fig. 7. 표적 방향 속도

표적이 함정의 선수로부터 각도 θ_{az} 만큼 떨어진 곳에서 고각 ϕ 로 접근하고 있다고 생각하자. 이 때, 마스트는 함정의 roll에 의한 속도 v_{roll} 의 영향을 받게 된다. 이 v_{roll} 은 다음과 같은 vector로 표기할 수 있다.

$$v_{roll} = \left[L \frac{dr(t)}{dt} \cos(r(t)), 0, -L \frac{dr(t)}{dt} \sin(r(t)) \right] \quad (4)$$

함정에서 측정된 표적의 속도 역시 다음과 같은 벡터로 표기될 수 있다.

$$v_t = v_{tar} [\cos(\phi)\cos(\theta_{az}), \cos(\phi)\sin(\theta_{az}), \sin(\phi)] \quad (5)$$

따라서 이 두 벡터 사이의 사이각 θ_{rt} 는 다음과 같이 표기될 수 있다.

$$\theta_{rt} = \cos^{-1}(\cos(r(t))\cos(\phi)\cos(\theta_{az}) - \sin(r(t))\sin(\phi)) \quad (6)$$

마찬가지로 x축과 표적간의 사이각 θ_{xt} 는 다음과 같이 표기된다.

$$\theta_{xt} = \cos^{-1}(\cos(\phi)\cos(\theta_{az})) \quad (7)$$

pitch에 의한 속도 v_{pitch} 를 vector로 표기하면 다음과 같다.

$$v_{pitch} = \left[0, L \frac{dp(t)}{dt} \cos(p(t)), -L \frac{dp(t)}{dt} \sin(p(t)) \right] \quad (8)$$

따라서 pitch 속도와 표적 속도 사이의 사이각 θ_{pt} 와 y축과 표적간의 사이각 θ_{yt} 는 다음과 같이 표기된다.

$$\theta_{pt} = \cos^{-1}(\cos(p(t))\cos(\phi)\sin(\theta_{az}) - \sin(p(t))\sin(\phi)) \quad (9)$$

$$\theta_{yt} = \cos^{-1}(\cos(\phi)\sin(\theta_{az})) \quad (10)$$

4. 표적의 속도 보정식

앞에서 언급한 것 과 같이 함정 자체적으로 발생하는 4가지의 속도는 다음과 같다.

- 함수방향 속도 v_{yShip}
- 우현방향 속도 v_{xShip}
- roll에 의한 속도 v_{roll}
- pitch에 의한 속도 v_{pitch}

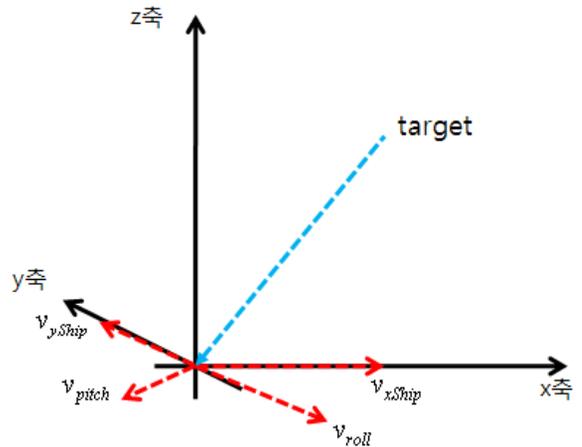


Fig. 8. 표적 속도에 영향을 주는 요소

식 (4)에서 (10)까지 계산한 결과를 바탕으로 표적의 속도를 계산할 수 있다.

$$v_{ant} = -(v_{xShip}\cos(\theta_{xt}) + v_{roll}\cos(\theta_{rt}) + v_{yShip}\cos(\theta_{yt}) + v_{pitch}\cos(\theta_{pt})) \quad (11)$$

하지만 한 가지 문제는 우리는 표적의 고도를 알 수 없다는 것이다. hit가 검출되는 것은 표적의 고도를 계산하기 위해 모노펄스를 측정하기 이전의 과정이기 때문에 이미 버려진 hit는 속도보정을 통해서 도플러 0이 아닌 것으로 판별되는 경우에도 복구할 수 없다. 따라서 이 논문에서는 그러한 경우에 적용할 수 있도록 고도방향 빔에 대해서 빔 중앙을 그 hit의 고도로 적용하고 그것을 표적 고도의 대푯값이라고 부를 것이다.

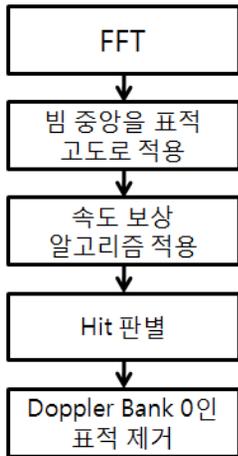


Fig. 9. 표적 고도 대푯값 적용 알고리즘

와 θ_{yt} 가 각각 $(90-\theta_{az})$, θ_{az} 와 같다. 따라서 위의 식에서 연속적으로 변하는 θ_{xt} 와 θ_{yt} 값을 고정된 값으로 생각하고 식을 적용해도 크게 문제가 되지 않는다. 즉, 상대적으로 오차가 작게 나올 수 있다. 대함표적에 대한 시나리오는 다음과 같다.

- 표적의 시작 위치 : (10000, 5000, 0)(m)
- 표적의 속도 : 20m/s로 접근
- 자함의 속도 : (3, 15, 0)(m/s)

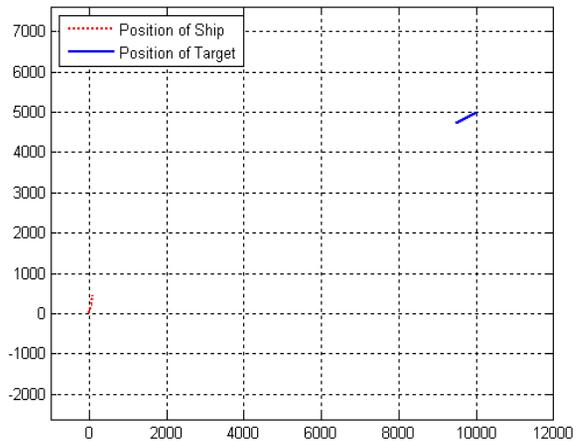


Fig. 10. 표적과 자함의 위치

5. 시뮬레이션 결과

표적과의 속도차를 정확히 모사하기 위해서 실제 함정 위치와 표적의 이동을 통하여 거리 차이를 시간으로 샘플링한 속도를 계산했다. 대함 표적, 대공 표적으로 시나리오를 나눠서 앞에서 계산된 실제 속도와 식에 의해서 보정된 속도를 비교하였다. 함정은 마스트의 위치가 배의 무게중심으로부터 (0, 3, 20)m 떨어진 곳에 위치하며 roll과 pitch의 최대 값은 5°, 각각 4초와 5초의 주기를 가지며 sin 곡선을 그리며 움직이는 것으로 가정하였다. 접근하는 표적의 속도는 -, 멀어지는 표적의 속도는 +로 표기되며, 자함의 속도는 Fig. 7과 같이 xyz 좌표계로 표기되었다.

가. 대함표적 시나리오

대함표적의 경우는 고각이 0에 가깝기 때문에 θ_{xt}

이 때 함정에서 측정된 표적의 속도 데이터는 다음과 같다.

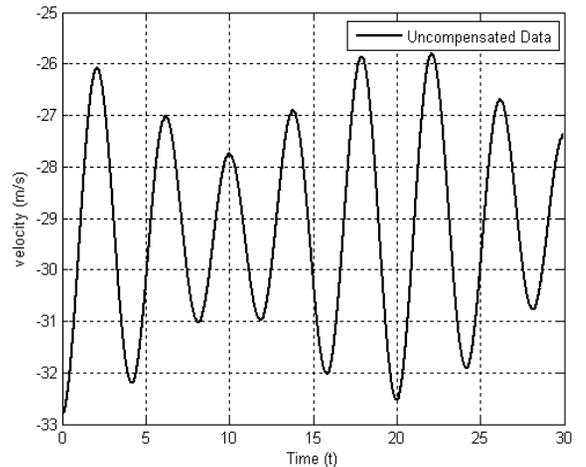


Fig. 11. 보상전 자함에서 측정된 표적 속도

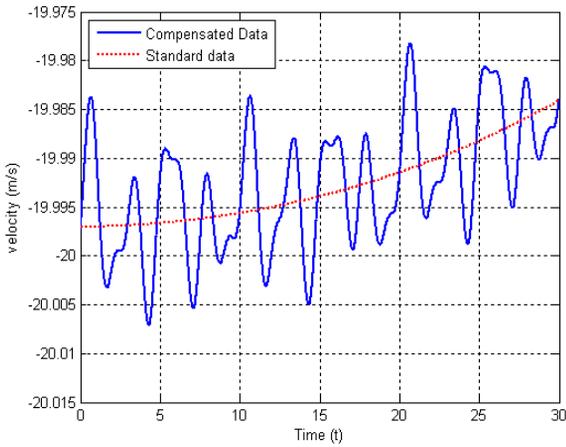


Fig. 12. 보상된 속도와 이론상 데이터

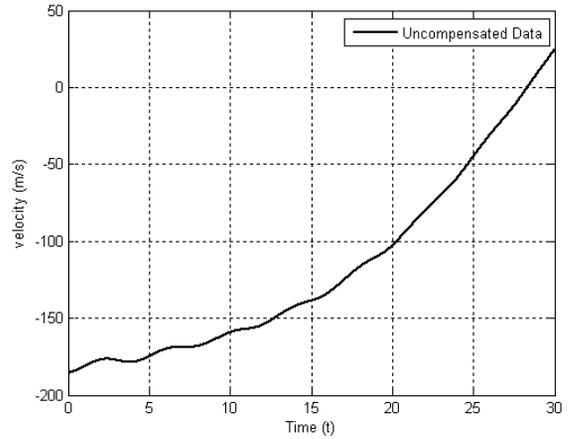


Fig. 14. 보상전 자함에서 측정된 표적 속도

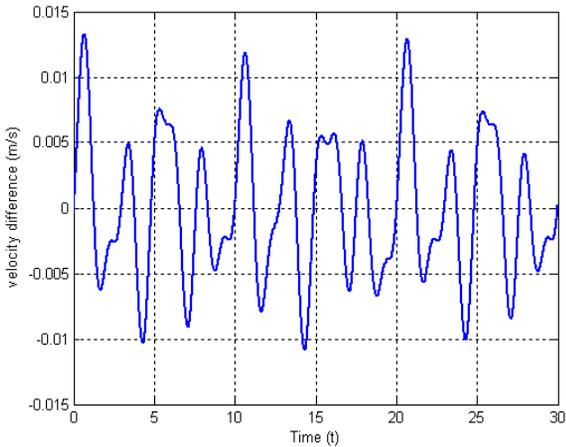


Fig. 13. 보상 후 속도 오차

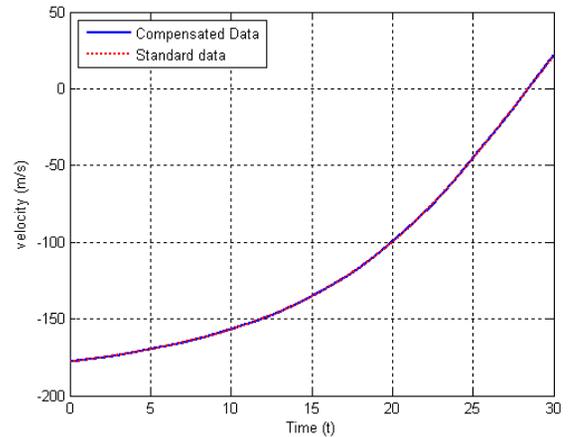


Fig. 15. 보상된 속도와 이론상 데이터

나. 대공표적 시나리오

대공표적은 고도의 영향을 많이 받으며 특히 함정에 근접할수록 고각의 변화가 심해진다. 이에 따라 보정식의 정확히 적용하는 것이 속도의 오차를 줄일 수 있다. 대공표적에 대한 시나리오는 다음과 같다.

- 표적의 시작 위치 : (5000, 3000, 3000)(m)
- 표적의 속도 : 200m/s로 접근
- 자함의 속도 : (-3, 15, 0)(m/s)

Fig. 14는 보정 없이 함정에서 인식되는 표적의 속도를 말한다. 접근하는 표적의 속도는 -로, 멀어지는 표적의 속도는 +로 표기되었다.

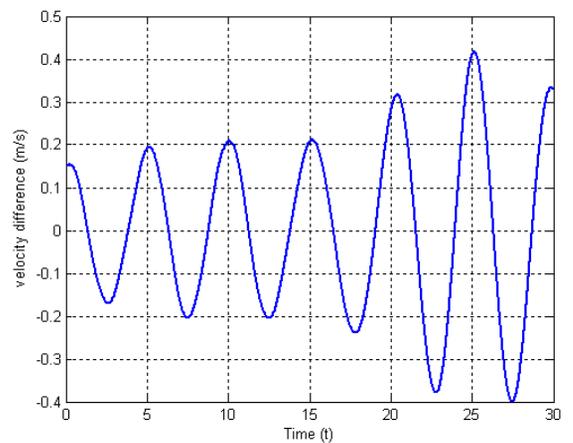


Fig. 16. 보상 후 속도 오차

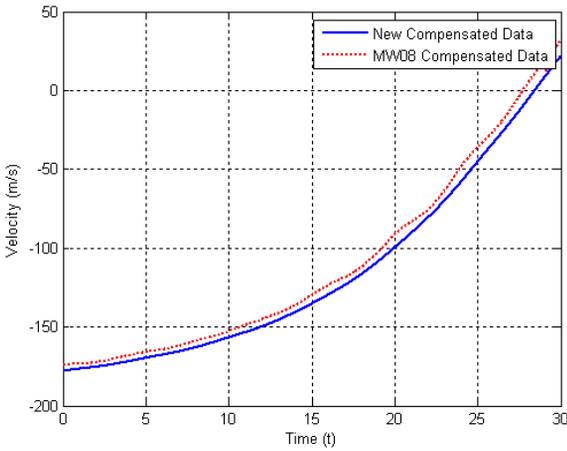


Fig. 17. MW08 보정식과의 차이

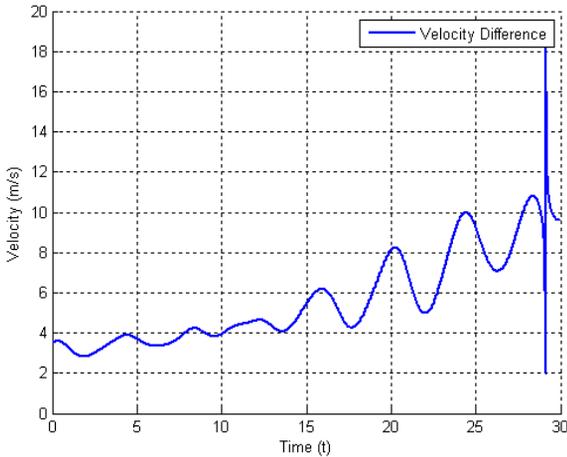


Fig. 18. Fig. 17에 의한 속도 차이

Fig. 17과 Fig. 18에서 볼 수 있듯이 MW08과는 보정된 표적 속도의 차이를 확인할 수 있다. 예상했듯이 시간이 지나며 표적의 고도가 높아지는 경우 속도의 오차가 증가하게 된다. Fig. 16에서 보는 것과 같이 보정된 데이터와 이론상의 데이터는 큰 차이가 보이지 않아 Fig. 15와 같이 겹쳐보이게 된다.

다. 고도 대푯값 사용 시나리오

표적의 고도를 알지 못하는 경우 빔의 중앙값을 대푯값으로 사용하여 고도를 대신한다. 이 때의 시나리오는 고도 방향으로 5도마다 빔이 있는 경우(스택빔)로 생각하였다. 따라서 빔 중앙은 2.5°, 7.5°, 12.5°의 순서로 고도 방향 87.5°까지 있는 것으로 가정하였고,

각각의 빔 중앙으로부터 $\pm 2.5^\circ$ 의 위치에 표적이 있을 때 그 빔 중앙 고도를 표적의 고도로 가정하였다. 이외의 시뮬레이션을 위한 설정값은 5.1의 경우와 같다.

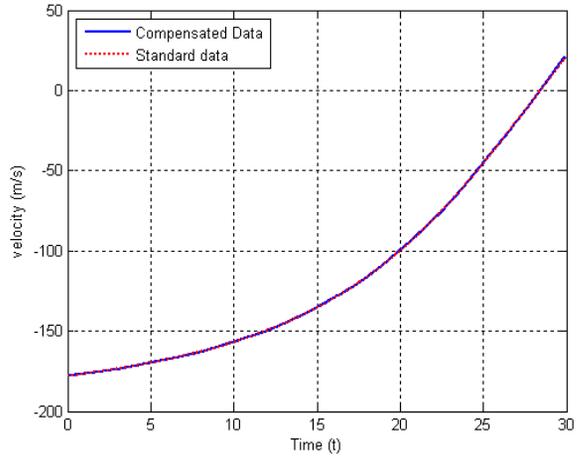


Fig. 19. 보상된 속도와 이론상 데이터

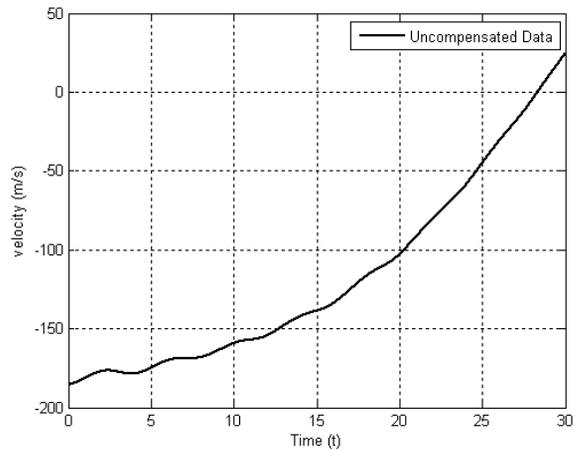


Fig. 20. 보상전 자함에서 측정된 표적 속도

Fig. 20은 보정 없이 함정에서 인식되는 표적의 속도를 말한다. 접근하는 표적의 속도는 -로, 멀어지는 표적의 속도는 +로 표기되었다. Fig. 21의 실선은 표적이 접근함에 따라서 변하게 되는 실제 표적의 고도를 말하며 점선은 해당 고도에 대해서 빔의 중앙으로 인식된 표적의 고도를 표기하였다.

Fig. 22에서 보듯이 보정 전후의 속도 차이는 최대의 오차 경우에도 1m/s 정도의 오차를 보이는 것을

알 수 있었고, 보상하지 않았을 경우와 비교해서 10% 정도로 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 고도를 정확히 아는 경우보다는 못하지만 고도를 알지 못할 때 빔의 중심을 이용하여 표적 고도 대푯값을 이용하는 것이 가능함을 알 수 있었다.

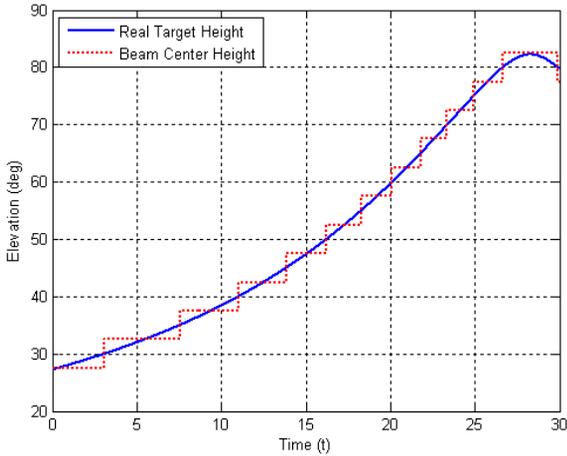


Fig. 21. 실제 표적 고도와 대표 고도

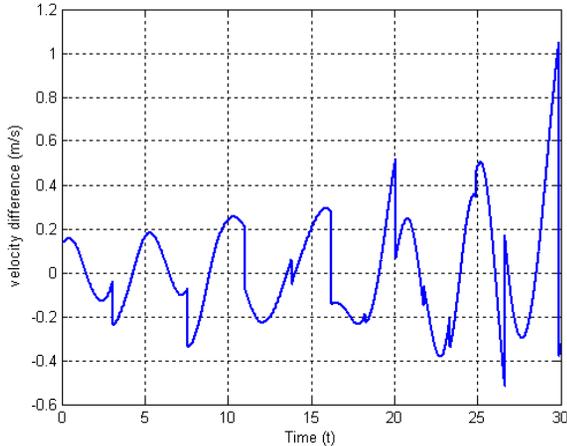


Fig. 22. 보상 후 속도 오차

6. 결론

함정용 레이더에서 표적의 속도 정보 정확도는 매우 중요한 문제이다. 이를 통해서 표적의 추적을 실시할 때 정확한 추적을 보장할 수 있으며, 특히 도플러 बैं크 0을 제거하는 경우에는 클러터와 표적의 구분 기준을 정확하게 하는 방법이 된다. 따라서 이 논문에서는 함의 자세에 따른 표적의 속도 오차를 계산하는 공식을 제시하였고, 표적의 고도를 정확히 모르는 상황에서 고도의 대푯값을 이용함으로써 속도 정확도를 보정 전보다 높일 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 제시된 알고리즘이 정확하였고, 대푯값을 이용하는 경우에도 충분한 정도로 정확도를 높일 수 있음을 확인하였다.

Reference

- [1] HANDBOOK FOR THE MW08 RADAR SYSTEM : Technical Manual Volume 1 CAT.3A, 3B 8504 903 019XX.
- [2] 강석구, 염기대, 이상룡, 소재귀, 울돌목 ADCP 조류관측 특성, 2002년 한국해양학회 추계학술대회 초록(서울 11월), p. 25, 2002.