

시선속도 변환과 불확도 전파에 관한 연구

A Study on Radial Velocity Transformation and Uncertainty Propagation

류 충 호* 황 규 환* 장 용 식* 김 문 기* 최 익 환*

Chung-Ho Ryu Gyu-Hwan Hwang Yong-Sik Jang Moon-Ki Kim Ik-Hwan Choi

ABSTRACT

In general, radial velocity of a target can be obtained by acquiring doppler frequency shift in case of a doppler radar, or can be obtained by acquiring range rate in case of a pulse radar. Then radial velocity can be converted to tangential velocity using aspect angle or position variation per unit time. These two ways have the same meaning in physically, but result in different uncertainty finally. In this paper, it is described not only the two transformation procedures to calculate tangential velocity from radar measurement data, but also the result of combined uncertainty comparison between these two procedures.

Keywords : Radial Velocity(시선속도), Tangential Velocity(접선속도), Uncertainty(불확도)

1. 서론

무기체계 성능평가 시험에서 비행 궤적(flight trajectory)과 운동 방향의 속도는 가장 기본적이면서 중요한 계측 항목이다.

무기체계의 비행 궤적은 펄스(pulse) 방식의 빔폭 (beamwidth)이 좁은 정밀 계측 레이더(instrumentation radar)가 추적한 측정 자료로부터 변환되며, 표적의 진행 방향 속도는 CW(Continuous Wave) 방식의 도플러 레이더가 측정된 시선속도를 이용하여 계산한다.

국내 무기체계 시험장에서는 정밀 계측 레이더인 RIR(Range Instrumentation Radar)-778X, 980X로부터 비행 궤적을 획득하며, 표적 추적(target tracking) 기능을

가지고 있는 MSL60040i, MFTR-2100 도플러 레이더를 이용하여 속도를 계측한다.

MSL60040i와 MFTR-2100 도플러 레이더는 비행 표적의 추적이 가능하므로, 추적 가능한 전 구간에서 계측이 가능하다.

기본적으로 CW 도플러 레이더는 레이더의 시선방향에서 움직이는 표적으로부터 발생하는 도플러 주파수 편이를 이용하여 시선속도(radial velocity)를 측정한다. 펄스 레이더는 시선거리 변화를 계산하여 시선속도를 알 수 있다.

본 논문에서는 시선속도를 구하는 계산식을 살펴본 후, 이를 표적 운동 방향 접선속도로 변환하는 수식을 유도하였다. 그리고 시선속도를 구하는 두 가지 방법, 즉 도플러 레이더에서 도플러 주파수 편이를 이용하는 방법과 펄스 레이더가 측정된 거리 변화율을 이용하는 방법의 합성 불확도에 대해 비교 논의하였다. 접선속도를 구하는 두 가지 방법, 즉 시선속도와 종축각

† 2012년 12월 17일 접수~2013년 2월 22일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 류충호(chryu74@add.re.kr)

을 이용한 방법과 위치변화를 이용한 방법의 합성 불확도에 대해서도 비교 논의하였다. 시선속도 및 접선속도의 합성 불확도를 계산하기 위해 MFTR-2100 도플러 레이더와 RIR-980X 펄스 레이더의 사양을 적용하였다. 또한 각각의 불확도 성분이 어떻게 전과되는지 제시하고 그 결과를 비교하였다.

2. 본론

가. 속도

물체의 속도(velocity)란 단위시간 동안 이동한 위치 벡터(position vector)의 변위로 빠르기를 이동한 방향과 함께 나타내며, 그 크기는 속력으로 정의한다^[1]. Fig. 1에서 물체가 Δt 시간 동안 P_1 에서 P_2 로 이동할 경우, 평균 속도는 식 (1)이 된다.

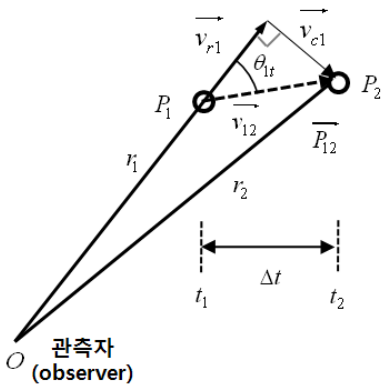


Fig. 1. 평균속도

$$\vec{v}_{12} = \frac{\vec{OP}_2 - \vec{OP}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\vec{P}_{12}}{\Delta t} \quad (1)$$

순간속도(instantaneous velocity)는 식 (1)에서 단위 시간 Δt 가 0에 근접할 때의 매우 짧은 시간에 대해 물체가 이동한 직선거리에 대한 변위이며 식 (2)가 된다.

운동경로가 곡선일 경우, 그 지점에서의 접선방향 순간속도를 접선속도(tangential velocity)라 한다.

$$\vec{v}_{t1} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{P}_{12}}{\Delta t} = \frac{d\vec{P}_{12}}{dt} \approx \vec{v}_{12} \quad (2)$$

접선속도는 짧은 시간동안의 평균속도 변화로 근사(approximation)할 수 있다.

시선속도란 Fig. 1에서 관측자(observer)가 운동하는 물체를 바라보는 방향에 대한 속도이다. 즉 관측자와 물체 사이의 시선방향 거리의 변화율(range rate)이다. Fig. 1에서 물체의 속도 벡터와 관측자가 물체를 바라보는 방향벡터가 이루는 각은 θ_{1t} 이므로 시선속도는 식 (3)이 된다^[2]. 이하 벡터 표시(\rightarrow)는 생략한다.

$$v_{r1} = v_{12} \cos(\theta_{1t}) \quad (3)$$

횡거리 속도(cross range velocity)는 Fig. 1에서 관측자의 시선방향에 직교하는 방향으로의 거리 변화율이며 식 (4)의 관계를 가진다^[2].

$$v_{c1} = v_{12} \sin(\theta_{1t}) \quad (4)$$

나. 시선속도

1) 도플러 주파수 편이를 이용한 계산

도플러 레이더가 바라본 표적 방향의 시선속도는 도플러 주파수 편이를 측정하여 알 수 있다.

CW 도플러 레이더는 송/수신파의 주파수 차이로부터 도플러 주파수 편이, f_d 를 측정하며, 시선속도는 식 (5)가 된다^[2].

$$v_{r_d} = \left(\frac{\lambda}{2}\right) f_d \quad (5)$$

식 (5)에서 λ 는 송신파의 파장(wavelength)이다.

2) 거리 변화율을 이용한 계산

펄스(pulse) 레이더는 반사 신호가 도달하는데 걸리는 시간지연(time delay)을 계산하여 표적까지의 상대적인 거리를 알 수 있다. 따라서 시선속도는 시간에 따른 거리 변화율이므로 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$v_{r_r} = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{r_2 - r_1}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

식 (6)에서 r_1 과 r_2 는 시간 t_1 과 t_2 에서의 표적까지의 거리이다.

다. 접선속도

표적의 전 비행구간에 대한 속도 변화를 측정하기 위해서는 표적을 추적할 수 있는 기능이 필요하다.

추적 기능을 가진 도플러 레이더는 발사지점 부근으로 이동이 가능하지만, 대부분의 경우에 있어서 추적소에 고정 설치되어 표적을 추적한다. 이때 발사지점, 도플러 레이더 그리고 표적의 비행궤적에 대한 기하학적인 관계는 Fig. 2와 같다.

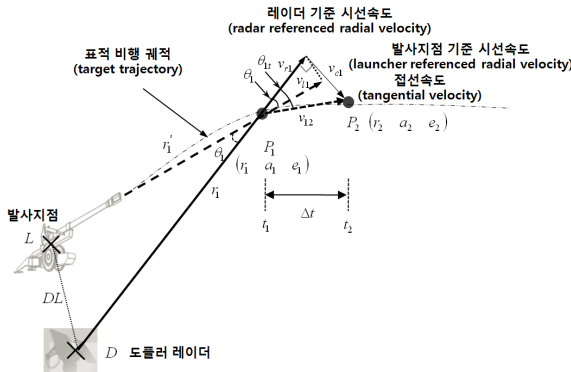


Fig. 2. 도플러 레이더, 발사지점, 표적의 기하

Fig. 2에서 θ_1 은 발사지점 기준 시선속도 벡터와 도플러 레이더 기준 시선속도 벡터 사이의 각도, r_1 은 도플러 레이더와 표적사이의 상대적인 거리, r'_1 은 발사지점 L로부터 P_1 까지의 거리 그리고 DL은 도플러 레이더와 발사지점 사이의 거리이다. 추적기능을 가진 도플러 레이더는 표적까지의 상대적인 거리 r_1 을 MFCW(Multi Frequency Continuous Wave) 방식을 이용하여 측정한다^[3].

1) 시선속도와 종축각을 이용한 계산

표적의 운동 방향에 대한 접선속도는 시선속도와 종축각(aspect angle)을 이용하여 계산한다.

종축각은 레이더의 시선방향(line of sight) 벡터와 표적의 속도 벡터가 이루는 각으로 정의하며 Fig. 2에서 θ_{1t} 가 된다.

시선속도의 크기와 방향을 알고 있으므로 종축각을 이용하여 접선속도를 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$v_{12a} = \frac{v_{r1}}{\cos(\theta_{1t})} \tag{7}$$

식 (7)에서 $\cos(\theta_{1t})$ 는 시선속도 벡터와 위치 벡터 사이의 내적(inner product)을 이용하여 계산하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \cos(\theta_{1t}) &= \frac{DP_1 \cdot P_{12}}{|DP_1| |P_{12}|} \tag{8} \\ &= \frac{x_1(x_2 - x_1) + y_1(y_2 - y_1) + z_1(z_2 - z_1)}{r_1 \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \end{aligned}$$

2) 위치 변화를 이용한 계산

두 지점 사이의 위치 변화를 이용한 방법은 정밀 계측 레이더에 적용가능하다. 레이더와 표적 사이의 상대적인 위치를 이용할 경우 접선속도는 식 (9)가 된다.

$$v_{12p} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}{\Delta t} \tag{9}$$

라. 합성 불확도

모델식 y에 대한 합성 불확도 $U_c(y)$ 는 식 (10)으로 주어진다^[4].

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i u(x_i))^2} \tag{10}$$

식 (10)에서 c_i 는 개별 불확도 요인에 대한 감도 계수이며, y를 c_i 로 편미분한 값이다. $u(x_i)$ 는 개별 불확도 요인에 대한 표준 불확도이다.

마. 시선속도의 합성 불확도

1) 도플러 주파수 편이를 이용한 계산

도플러 레이더는 도플러 주파수 편이로부터 시선속도를 측정하므로 감도계수는 Table 1과 같다.

도플러 레이더 시선속도에 대한 합성 불확도를 식 (5), Table 1, 식 (10)을 이용하여 계산하면 식 (11)이 된다.

$$U_c(v_{r_d}) = \left(\frac{\lambda}{2} \right) \sigma_{f_d} \tag{11}$$

Table 1. 도플러 레이더 시선속도 감도계수

불확도 요인	표준 불확도 $u(x_i)$	감도계수 c_i
f_d	σ_{f_d}	$\lambda/2$

식 (11)에서 σ_{f_d} 는 CW 도플러 레이더의 도플러 주파수 편이에 대한 rms(root mean square) 오차이며 식 (12)와 같다^[5].

$$\sigma_{f_d} = \frac{0.389}{\Delta t \sqrt{SNR}} \quad (12)$$

식 (12)를 식 (11)에 대입하면 식 (13)이 된다.

$$U_c(v_{r_d}) = \left(\frac{\lambda}{2\Delta t} \right) \frac{0.389}{\sqrt{SNR}} \quad (13)$$

2) 거리 변화를 이용한 계산

펄스 레이더의 경우 시간에 대한 표적까지의 상대적인 거리 변화로부터 시선속도를 계산할 수 있다. 이때 시간 변화량 Δt 에 대한 불확도 요인은 없는 것으로 가정하면 감도계수는 Table 2와 같다.

Table 2. 펄스 레이더 시선속도 감도계수

불확도 요인	표준 불확도 $u(x_i)$	감도계수 c_i
r_1	σ_r	$\frac{1}{\Delta t}(-1)$
r_2	σ_r	$\frac{1}{\Delta t}(1)$

합성 불확도는 Table 2와 식 (10)으로부터 식 (14)가 된다.

$$U_c(v_{r_r}) = \left(\frac{\sqrt{2}}{\Delta t} \right) \sigma_r \quad (14)$$

거리 r 의 표준 불확도는 MF(Multi Frequency)방식을

적용한 CW 도플러 레이더와 시간지연(time delay)으로부터 거리를 측정하는 펄스 레이더가 서로 다르다.

MF 방식의 CW 도플러 레이더의 경우, $\sigma_{r,MF}$ 는 식 (15)와 같다^[6].

$$\sigma_{r,MF} = 0.079 \frac{c}{\Delta f \sqrt{SNR}} \quad (15)$$

식 (15)에서 $c = 3 \times 10^8$ m/s이며, Δf 는 고정 주파수 f_{cw} 와 거리 정보를 얻기 위한 가변 주파수 f_{mf} 사이의 차이이다.

사각파와 유사한(quasi-rectangular) 송신 펄스를 가지는 펄스 레이더의 경우, $\sigma_{r,pulse}$ 는 식 (16)과 같다^[2].

$$\sigma_{r,pulse} = \frac{c}{2} \frac{\tau_r}{2.1 \sqrt{2} \sqrt{SNR}} \quad (16)$$

식 (16)에서 τ_r 는 펄스폭(pulse width)이다.

3) 시선속도의 합성 불확도 비교

각각의 방식에 대해 시선속도의 합성 불확도를 계산하면 Table 3과 같다.

Table 3. 시선속도의 합성 불확도 비교

SNR = 30dB $\Delta t = 1$ 초	도플러 레이더 $\Delta f = 0.5$ MHz	펄스 레이더 $\tau_r = 0.5$ μ s
σ_{f_d}	0.012Hz	-
$\sigma_{r,MF}$	1.49m	-
$\sigma_{r,pulse}$	-	0.79m
$U_c(v_{r_d})$	0.0001m/s	-
$U_c(v_{r_r})$	-	1.12m/s

Table 3은 도플러 레이더와 펄스 레이더가 1,000m/s의 시선속도를 가진 표적을 신호대잡음비 30dB로 추적했을 때의 시선속도의 합성 불확도를 제시한 것으로서, 도플러 주파수 편이로부터 시선속도를 계측할 경우, 펄스 레이더의 거리 변화를 이용한 경우에 비해 정확한 결과를 구할 수 있음을 알 수 있다.

바. 접선속도의 합성 불확도

1) 시선속도와 종축각을 이용한 계산

시선속도와 종축각을 이용하여 접선속도를 계산한 방법의 합성 불확도 $U_c(v_{12a})$ 를 계산하기 위해서는 불확도 요인 v_{r1} , θ_{1t} 의 감도계수를 알아야 한다.

θ_{1t} 에 대한 불확도는 계산상의 편의를 고려하여 θ_{1t} 대신 $\cos(\theta_{1t})$ 전체를 하나의 변수로 설정한 후, 감도계수를 계산하면 Table 4와 같다.

Table 4. 종축각을 이용한 접선속도의 감도계수

불확도 요인	표준 불확도 $u(x_i)$	감도계수 c_i
v_{r1}	$\sigma_{v_{r1}}$	$\frac{1}{\cos(\theta_{1t})}$
$\cos(\theta_{1t})$	$\sigma_{\cos(\theta_{1t})}$	$-\frac{v_{r1}}{\cos^2(\theta_{1t})}$

Table 4와 식 (10)을 이용하여 $U_c(v_{12a})$ 를 구하면 식 (17)이 된다.

$$U_c(v_{12a}) = \frac{1}{\cos(\theta_{1t})} \sqrt{\sigma_{v_{r1}}^2 + \left(\frac{v_{r1}}{\cos(\theta_{1t})}\right)^2 \sigma_{\cos(\theta_{1t})}^2} \quad (17)$$

식 (17)에서 $\sigma_{\cos(\theta_{1t})}$ 를 계산하기 위해서는 식 (8)을 $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ 에 대해 편미분하여 감도계수를 구해야 한다. x_1 에 대한 감도계수는 식 (18)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \cos(\theta_{1t}) = \frac{D_{x_1} - 2x_1}{\sqrt{x_1^2(B_{x_1} + C_{x_1}) + B_{x_1}C_{x_1} - 2C_{x_1}D_{x_1}x_1 - 2D_{x_1}x_1^3 + x_1^4}} - \frac{(A_{x_1} + D_{x_1}x_1 - x_1^2)(2x_1(B_{x_1} + C_{x_1}) - 2C_{x_1}D_{x_1} - 6D_{x_1}x_1^2 + 4x_1^3)}{(x_1^2(B_{x_1} + C_{x_1}) + B_{x_1}C_{x_1} - 2C_{x_1}D_{x_1}x_1 - 2D_{x_1}x_1^3 + x_1^4)^{\frac{3}{2}}} \quad (18)$$

식 (18)에서 $A_{x_1}, B_{x_1}, C_{x_1}, D_{x_1}$ 은 식 (19)와 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} A_{x_1} &= y_1(y_2 - y_1) + z_1(z_2 - z_1) \\ B_{x_1} &= x_2^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \\ C_{x_1} &= y_1^2 + z_1^2 \\ D_{x_1} &= x_2 \end{aligned} \quad (19)$$

x_2 에 대해 감도계수는 식 (20)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_2} \cos(\theta_{1t}) = \frac{-(A_{x_2}^2 C_{x_2} + B_{x_2} C_{x_2})x_2 + A_{x_2} C_{x_2} (B_{x_2} + D_{x_2})}{(C_{x_2} x_2^2 - 2A_{x_2} C_{x_2} x_2 + C_{x_2} D_{x_2})^{\frac{3}{2}}} \quad (20)$$

식 (20)에서 $A_{x_2}, B_{x_2}, C_{x_2}, D_{x_2}$ 은 식 (21)과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} A_{x_2} &= x_1 \\ B_{x_2} &= -x_1^2 + y_1(y_2 - y_1) + z_1(z_2 - z_1) \\ C_{x_2} &= x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ D_{x_2} &= x_1^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \end{aligned} \quad (21)$$

y_1, y_2, z_1, z_2 에 대한 편미분 결과는 식 (18) 및 식 (20)의 형태와 유사하게 계산되므로 생략하기로 한다.

각각의 감도계수를 구한 후, 식 (10)을 적용하여 합성 불확도를 계산한다.

2) 위치변화를 이용한 계산

위치변화를 이용하여 접선속도를 계산한 방법의 합성 불확도 $U_c(v_{12p})$ 를 계산하기 위해서는 먼저 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 에 대한 표준 불확도를 알아야 한다. $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 를 계산하기 위해서는 레이더 기준 거리 r , 방위각 a , 고각 e 에 대한 $\sigma_r, \sigma_a, \sigma_e$ 를 구해야 한다.

σ_r 은 식 (15), 식 (16)으로부터 계산할 수 있다.

CW 도플러 레이더의 σ_a, σ_e 는 식 (22)와 같다.

$$\sigma_{a,e,CW} = 0.44 \frac{\theta_3}{\sqrt{SNR}} \quad (22)$$

식 (22)에서 θ_3 는 3dB 빔폭이다^[6].

모노펄스 추적방식을 가진 펄스 레이더의 σ_a, σ_e 는

식 (23)과 같다²⁾.

$$\sigma_{a,e,pulse} = \frac{\theta_3}{k_s \sqrt{SNR(f_r/\beta_n)}} \quad (23)$$

식 (23)에서 k_s 는 보어사이트에서 각도 오차 신호의 기울기, f_r 은 펄스 반복 주파수(PRF : Pulse Repetition Frequency), β_n 은 서보(servo) 대역폭(bandwidth)이다.

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 는 $\sigma_r, \sigma_a, \sigma_e$ 에 대해 불확도 전파법칙을 적용하여 계산한다. 먼저 레이더 기준 구면 좌표계에서 측정된 거리 r , 방위각 a 그리고 고각 e 는 식 (24)를 이용하여 레이더 기준 직교 좌표계로 변환된다.

$$x = r \cos(a) \cos(e) \quad (24)$$

$$y = r \sin(a) \cos(e)$$

$$z = r \sin(e)$$

식 (24)를 r, a, e 에 대해 편미분하여 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 를 구하면 식 (25)가 된다⁷⁾.

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_r^2 \cos^2(a) \cos^2(e) + \sigma_a^2 r^2 \sin^2(a) \cos^2(e) + \sigma_e^2 r^2 \cos^2(a) \sin^2(e)} \quad (25)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_r^2 \sin^2(a) \cos^2(e) + \sigma_a^2 r^2 \cos^2(a) \cos^2(e) + \sigma_e^2 r^2 \sin^2(a) \sin^2(e)}$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_r^2 \sin^2(e) + \sigma_e^2 r^2 \cos^2(e)}$$

표적의 위치변화를 이용하여 접선속도를 계산한 식 (9)에서 시간 변화량 Δt 에 대한 불확도 요인은 없는 것으로 가정한 후, 다른 인자에 대해 감도계수를 구하면 Table 5와 같다. Table 5에서 R 은 식 (26)과 같이 정의하였다.

$$R = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \quad (26)$$

Table 5와 식 (9)를 이용하여 합성 불확도를 구하면 식 (27)이 된다.

Table 5. 위치변화를 이용한 접선속도의 감도계수

불확도 요인	표준 불확도 $u(x_i)$	감도계수 c_i
x_1	σ_x	$\frac{1}{\Delta t \sqrt{R}}(x_1 - x_2)$
x_2	σ_x	$\frac{1}{\Delta t \sqrt{R}}(x_2 - x_1)$
y_1	σ_y	$\frac{1}{\Delta t \sqrt{R}}(y_1 - y_2)$
y_2	σ_y	$\frac{1}{\Delta t \sqrt{R}}(y_2 - y_1)$
z_1	σ_z	$\frac{1}{\Delta t \sqrt{R}}(z_1 - z_2)$
z_2	σ_z	$\frac{1}{\Delta t \sqrt{R}}(z_2 - z_1)$

$$U_c(v_{12_r}) \quad (27)$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\Delta t} \sqrt{\frac{\sigma_x^2(x_2 - x_1)^2 + \sigma_y^2(y_2 - y_1)^2 + \sigma_z^2(z_2 - z_1)^2}{R}}$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 의 최대값 σ_{xyz} 를 식 (27)에 대입하면 식 (28)이 된다.

$$U_c(v_{12_r}) = \sqrt{2} \left(\frac{\sigma_{xyz}}{\Delta t} \right) \quad (28)$$

3) 접선속도의 합성 불확도 비교

송신 주파수 10GHz에서 도플러 레이더와 정밀 계측 레이더가 속도 1,000m/s의 표적을 추적하였을 때, 시선속도와 종축각을 이용한 방법과 위치변화를 이용한 방법에 대해 접선속도의 합성 불확도를 계산하면 Table 6과 같다.

Table 6에서 $\sigma_{\cos(\theta_{1r})}$ 는 식 (13)을 $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ 에 대해 편미분한 후, 1,000m/s 속도에 해당하는 임의의 두 지점을 입력하여 계산하였다.

Table 6에서 펄스 방식의 정밀 계측 레이더는 도플러 주파수 편이를 측정하지 않으므로, 시선속도와 종축각에 의한 접선속도 계산식의 합성 불확도를 제시하지 않았다.

Table 6. 접선속도의 합성 불확도 비교

SNR = 30dB $\Delta t = 1$ 초	도플러 레이더 송신 빔폭 : 1° $\Delta f = 0.5$ MHz	펄스 레이더 송신 빔폭 : 1° $\tau_r = 0.5\mu s$ $k_s = 1.6$ $f_r = 320$ Hz $\beta_n = 1.5$ Hz
σ_{f_d}	0.012Hz	-
$U_c(v_{r_d})$	0.0001m/s	-
$U_c(v_{r_r})$	-	1.12m/s
σ_r	1.5m	0.56m
σ_a	0.014°	0.0014°
σ_e	0.014°	0.0014°
$\max(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$	2.5m	0.56m
θ_{1t}	11°	-
$\sigma_{\cos(\theta_{1t})}$	0.0022	-
$U_c(v_{12_a})$	2.23m/s	-
$U_c(v_{12_r})$	3.53m/s	0.79m/s

사. 시선속도에서 접선속도로의 불확도 전파 결과 레이더가 표적을 바라 본 방향에 대한 시선속도는 도플러 주파수 편이와 거리변화율로부터 각각 식 (5)와 식 (6)으로 계산가능하다. 식 (5)와 식 (6)에 대한 합성 불확도는 식 (13)과 식 (15) 및 식 (16)으로 유도되었다.

식 (13)에서 λ 가 0.03m, Δt 를 1로 두면, 합성 불확도는 식 (29)가 된다.

$$U_c(v_{r_d}) = \frac{0.005835}{\sqrt{SNR}} \quad (29)$$

식 (15)에서 Δf 가 0.5MHz일 경우와, 식 (16)에서 τ_r 을 $0.5\mu s$ 로 두고 식 (14)에 대입하면 합성 불확도는 식 (30), 식 (31)이 된다.

$$U_c(v_{r_r})_{\sigma_{r,MF}} = \frac{67.03}{\sqrt{SNR}} \quad (30)$$

$$U_c(r_r)_{\sigma_{r,pulse}} = \frac{35.71}{\sqrt{SNR}} \quad (31)$$

따라서 식 (29), 식 (30), 식 (31)은 식 (32)의 관계를 가진다.

$$U_c(v_{r_d}) < U_c(v_{r_r})_{\sigma_{r,pulse}} < U_c(v_{r_r})_{\sigma_{r,MF}} \quad (32)$$

식 (32)에서 보는 바와 같이 도플러 주파수 편이로부터 시선속도를 측정하는 것의 측정오차가 제일 작은 값을 가진다.

표적의 운동방향에 대한 접선속도는 시선속도와 종축각을 이용하여 계산하거나 단위시간당 위치변화를 이용하여 각각 식 (7)과 식 (9)로 계산가능하다. 식 (7)과 식 (9)에 대한 합성 불확도는 식 (17)과 식 (28)로 유도된다.

$U_c(v_{12_a})$ 는 식 (17)에서 보는 바와 같이 종축각이 0° 에 가까울수록 접선속도의 합성 불확도가 작아진다. 따라서 도플러 레이더를 발사지점 부근까지 이동해서 시선속도를 측정한 후, 접선속도를 계산하는 것이 유리하다.

또한 $U_c(v_{12_a})$ 는 시선속도의 표준 불확도 $\sigma_{v_{r_i}}$ 이외에 종축각의 코사인 성분에 의한 불확도 $\sigma_{\cos(\theta_{1t})}$ 가 더해졌음을 알 수 있다. Table 6에서 제시한 결과에 의하면, $\sigma_{\cos(\theta_{1t})}$ 는 0.0022로 계산된다.

$U_c(v_{12_r})$ 는 식 (28)에서 보는 바와 같이 위치자료의 불확도에만 영향을 받음을 알 수 있다. 위치자료가 정확할수록 접선속도의 합성 불확도는 작아진다.

Table 6에서 정밀 펄스 레이더의 경우, 신호대잡음비 3dB에서 $\max(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ 는 0.56m이다.

따라서 식 (17), 식 (28), Table 6으로부터 식 (33)의 관계를 가진다.

$$U_c(v_{12_r})_{\sigma_{xyz,pulse}} < U_c(v_{12_a}) < U_c(v_{12_r})_{\sigma_{xyz,MF}} \quad (33)$$

식 (33)으로부터 표적의 운동방향 접선속도의 합성 불확도는 표적의 위치를 정밀하게 측정하여 단위시간에 대한 위치 변화량을 이용하여 계산하는 것이 시선속도와 종축각을 이용하여 계산하는 것보다 작음을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 레이더 측정값으로부터 레이더 기준 시선속도와 표적의 운동방향 접선속도로 변환하는 관계식, 불확도 요인 그리고 합성 불확도를 제시하였다.

시선속도는 도플러 주파수 편이를 측정할 경우가 단위 시간에 대한 거리 변화로부터 계산한 값보다 작은 합성 불확도를 가짐을 알 수 있다.

접선속도는 정밀 계측 레이더를 이용하여 단위시간 당 표적의 위치 변화로부터 계산한 경우가 도플러 레이더의 시선속도와 종축각을 이용하였을 때에 비해 작은 합성 불확도를 가짐을 제시하였다.

그러므로 시선속도 및 접선속도를 구함에 있어 수학적인 계산의 결과는 물리적으로 동일한 의미를 가지지만, 계산에 의해 결정된 값의 합성 불확도는 계산 과정을 통해 최초 측정값에 대한 불확도 인자의 전파 및 다른 불확도 인자의 추가로 인해 커짐을 알 수 있다.

References

- [1] 두산백과, ‘속도’.
- [2] Merrill I. Skolnik, “Introduction to Radar Systems 3rd Edition”, McGraw-Hill, pp. 105~106, p. 315, p. 323, p. 233, p. 329, 2001.
- [3] Peder R. Pedersen, “Zero Doppler Tracking”, 제6회 시험평가심포지움, p. 420, 2009년.
- [4] Semyon G. Rabinovich, “Measurement Errors and Uncertainties”, AIP Press, pp. 175~179, 2000.
- [5] 류충호, 장용식, 최익환, “CW 도플러 레이더의 시각분해능과 시선속도 정확도의 관계”, 전자과학회지, 제23권 7호, p. 818, 2012년.
- [6] WEIBEL, “Doppler Radar Theory”, UG-3031, pp. 6~7, 2009.
- [7] 최익환, 장용식, “추적 모드에 따른 계측레이더 불확도 비교”, ADDR-414-121153, p. 23, 2012년.