고반복 펄스열을 사용하는 탐색기에서의 표적거리 측정

Range Measurement in High PRF Seeker

홍 동 희* 박 성 철** 양 태 석* 윤 태 환*
Hong, Dong-Hee Park, Sung-Chul Yang, Tae-Seok Yoon, Tae-Hwan

ABSTRACT

중거리 유도무기 체계가 탄도탄과 같이 기동이 심한 표적과 교전할 때에는 지상 레이더는 표적 및 유도탄 위치 정보를 보다 빈번하게 전송하여야 하지만, 자신의 임무를 수행해야 하므로 유도탄 및 교전 표적에 대한 정보를 필요 이상으로 자주 전송할 수 없다. 이러한 상황에서 탐색기가 자체적으로 표적의 거리, 속도, 방향을 측정함으로서 지상 레이더에 추가 부담을 지우지 않고 우수한 추적 정밀도로 교전성능을 향상할 시킬 수 있는 고반복 펄스열을 사용하는 PRF 변조방식을 제안한다.

주요기술용어 : Seeker(탐색기), Multi-function Radar(MFR, 다기능 레이더), Velocity Ambiguity(속도 불명확성), Ambiguous Range(불명확 거리), Unambiguous Range(명확한 거리), Unambiguous Velocity(명확한 속도), Pulse Repetition Frequency(PRF), Instrument Range(계측거리), Saw-tooth Wave(톱날파), Deceptive Jammer(기만형 재머)

1. 서 론

지상 레이더와 탐색기의 협동은 현대의 중거리 지대공유도 무기체계가 채택하는 중요한 운용개념이다. 즉, 두 센서의 사용 주파수 차이를 크게 하여 동시에 재밍을 당하는 확률을 줄이고, 각자 고유한 특성을 상호 보완하는 것이다.

이런 목적으로 사용되는 지상 레이더로 표적에 대한 탐지/추적, 자체 유도탄에 대한 포착/추적/교신 등의 다양한 임무가 단일 체계로 통합되는 다기능 레이더(Multi-function Radar)를 채택하는 것이 세계적인 추세이다[1].

일반적으로 지상 레이더는 탐색기에 비해 환경 및 전자전의 영향에 둔감하도록 설계되어, 추적 중인 표적과 유도탄을 실종할 확률이 낮은 반면, 표적과 유도탄에 대한 원거리 측정으로 추적 정밀도가 떨어지는 특성을 갖는다. 반면, 유도탄에 탑재된 탐색기는 표적에 가까이 접근하기 때문에 높은 정밀도의 표적 재원을 얻는 반면, 전자전에 상대적으로 취약하게 된다.

지상 레이더로부터 주기적으로 수신되어 추적 관리되는 표적의 위치 정보는 전자전에 의해 탐색기의 기

* 국방과학연구소 책임연구원
** 국방과학연구소 선임연구원

능이 저하되거나 정지될 때 표적을 재차 포착/추적하는데 소요되는 시간을 단축하게 한다.

탄도탄과 같이 기동이 심한 표적과 교전할 때에는 지상 레이더는 표적 및 유도탄 위치 정보를 보다 빈번하게 전송하여야 한다. 특히, 유도탄에 탑재된 탐색기가 속도 및 방향만을 추적하는 경우에는 더욱 그러하다.

지상 레이더는 자신의 임무를 수행해야 하므로 유도탄 및 교전 표적에 대한 정보를 필요 이상으로 자주 전송(up-link)할 수 없다. 특히, 레이더 송신기로 정보를 up-link할 경우에는 duty factor가 큰 파형이 사용되므로 필요 이상으로 up-link를 자주 실행할 경우에는 지상 레이더의 성능에 큰 제한이 가해지게 된다.

대부분의 탐색기는 속도 불명확성[2]이 나타나지 않게 높은 PRF를 사용하여 클러터를 제거하고 표적의 속도를 정밀하게 추적한다.

높은 PRF를 사용하되 표적 거리 측정이 가능한 방식으로 중거리 유도무기 체계의 교전성능을 증대시키는 방안을 고찰해보기로 한다.

탐색기는 지상 레이더로부터 전달되는 표적자료를 초기 치로 자체 측정한 표적속도를 적분하여 표적의 거리를 구할 수 있다. 그러나 이 경우, 표적속도 만을 측정하여 처리하는 탐색기로는 원거리 측정으로 인한 지상 레이더의 측정오차를 줄일 수 없다.

높은 PRF 사용하는 탐색기는 표적에 대한 불명확 거리[2]만을 측정할 수 있다. 그러나 적절한 수단을 통하여 ambiguity number를 알 수 있다면 표적의 명확한 거리를 측정할 수 있다. 이렇게 하기 위해서는 우선 추적이 이루어지는 동안 표적 신호가 송신펄스에 의해 차폐되지 않아야 한다.

적절한 PRF를 사용하면 송신펄스에 의한 표적신호의 차폐를 방지할 수 있으며, 측정된 불명확 거리를 이용할 경우 ambiguity number도 구할 수 있다. 이렇게 PRF를 변경하여 운용하는 것을 PRF 변조라 한다.

다음절에서는 PRF 변조와 ambiguity number를 계산하는 방법을 살펴보기로 한다.

2. PRF 변조

탐색기는 지상 레이더가 전송한 표적 정보에 의해 표적의 속도 및 방향에 추적 게이트를 형성한 후 표적을 포착(lock-on)하고 추적(track)한다. 또한, 탐색기는 표적의 속도를 정확하게 측정하기 위하여 high PRF를 사용하게 되며, 이 경우에 측정된 표적 거리는 불명확한(ambiguous) 값을 갖게 된다.

만약 탐색기가 고정된 PRF를 사용하게 된다면, 표적까지의 거리가 줄어듦에 따라 표적신호가 탐색기의 송신펄스에 가려지는 상황이 발생하여 표적을 실종할 확률이 높아지게 된다. 이를 방지하기 위하여 표적 거리에 따른 PRF 변경이 요구되는데, 이 것을 PRF 변조라 한다.

임의 순간의 PRI를 T라 하면 계측거리 Δ는 $\frac{cT}{2}$가 된다. 따라서 표적까지의 실제 거리를 R은 다음과 같이 표현될 수 있다[3]. 즉,

$$R = n\Delta = n\frac{cT}{2} \tag{1}$$

여기서, 실수 n을 ambiguity number라 하고, n 값의 소수부분을 visibility factor ρ라 한다.

ρ값은 표적신호가 나타나는 위치를 지시한다. 예를 들어 이 값이 0.5가 되면 표적신호는 탐색기의 송신

펄스와 펄스의 중앙에 나타나게 된다.

표적의 실제 속도를 V라 할 때 다음과 같은 상수 ζ를 정의할 수 있다.

$$V = \zeta V_b \tag{2}$$

여기서, V_b는 blind velocity이며 $\frac{\lambda}{2T}$가 된다. 표적이 접근하는 속도가 V_b가 되면 클러터로 분류되어 탐색기로부터 제거된다.

식(1)과 (2)로부터 다음의 관계식을 도출할 수 있다.

$$\zeta n = \frac{4}{c^2} f R V \tag{3}$$

여기서, f는 송신 주파수이다.

앞에서 기술한바와 같이 visibility factor ρ는 표적신호가 나타나는 위치를 지정한다.

$$\rho \equiv \frac{r}{\Delta} \tag{4}$$

여기서 Δ는 PRI에 의해 정해지는 계측거리이고, r은 표적의 불명확 거리이다.

ρ가 0 또는 1이 될 경우 표적신호는 송신펄스에 의해 완전히 차폐되고, ρ가 0.5인 경우에는 표적신호는 송신펄스와 펄스 중간에 나타나게 된다.

Visibility factor ρ를 얻을 수 있는 ambiguity number는 식(1)로부터 다음과 같이 된다. 즉,

$$n = Int\left(\frac{2R}{cT} + 0.5\right) + \rho \tag{5}$$

여기서, $Int(\cdot)$는 인수를 정수로 만드는 연산자를 나타낸다. 통상 ρ를 0.5로 한다.

이 때 요구되는 PRF F_n는 식(1)로부터 다음과 같다.

$$F_n = \frac{1}{T} = \frac{cn}{2R} \tag{6}$$

또한 이 때 나타나는 velocity constant는 다음과 같다.

$$\zeta_n = \frac{4fRV}{c^2 n} \tag{7}$$

위에서 계산한 F_n는 visibility factor $\rho(0.5)$를 만족하는 PRF가 된다.

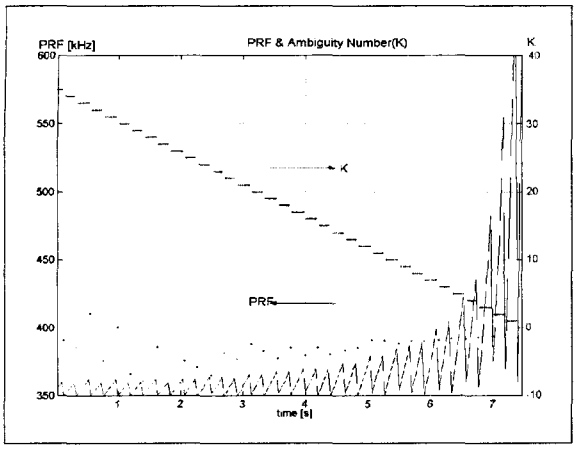
그러나 만약 이 F_n이 허용된 PRF 구간 ($F_{\min} \sim F_{\max}$) 밖의 값을 갖게 되면, 좋은 visibility를 보장받지 못하게 된다. 탐색기가 표적에 근접하게 되면 F_n은 $F_{\max}$ 보다 큰 값을 요구하게 되므로 $F_n = F_{\max}$로 제한해야 한다. 즉,

$$F_n = \begin{cases} F_{\min} & , F_n < F_{\min} \\ F_n & , F_{\min} \le F_n \le F_{\max} \\ F_{\max} & , F_n > F_{\max} \end{cases} \tag{8}$$

PRF F_n이 선정되면 ambiguity number와 velocity constant는 다음의 값으로 결정된다.

$$\begin{aligned} n &= \frac{2R}{c} F_n \\ \zeta_n &= \frac{4fRV}{c^2 n} \end{aligned} \tag{9}$$

그림 1은 15km 떨어진 표적을 초속 2000m로 접근할 경우 위의 PRF 변조 기법에 따른 PRF를 계산한 것이다. PRF는 $350 \sim 600\,kHz$ 범위에서 $1.25\,kHz$ 단위로 선택할 수 있고 측정은 초당 30회로 반복된다고 가정하였다.



[그림 1] 등가속도 표적추적 위한 PRF 및 K

그림 1로부터 PRF는 visibility factor를 보장하기 위해서 톱날파 형태의 변화를 하되, 표적이 가까워질수록 PRF의 범위가 넓어짐을 알 수 있다.

3. Ambiguity number 계산

PRF가 높을 경우 ambiguity number n의 정수부분은 통상 1보다 크다. 이 정수부분을 구하기 위해서는 각기 다른 PRF를 사용하여 2회의 불명확 거리를 연속 측정하여야 한다.

임의의 시간(t_1, t_2)을 두고 표적까지의 거리에 대해 2회의 측정을 하면 다음과 같은 결과를 얻게 된다.

$$\begin{aligned} D_1 &= (K_1 + \rho_1)\Delta_1 \\ D_2 &= (K_2 + \rho_2)\Delta_2 \\ \Delta_1 &= \frac{c}{2F_1} \\ \Delta_2 &= \frac{c}{2F_2} \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 D_1, D_2는 각각 t_1, t_2에서의 실제거리이고, Δ_1, Δ_2는 각각 PRF F_1, F_2를 사용할 때의 계측거리이다. K_1, K_2는 정수로 주어지는 ambiguity number이며, ρ_1, ρ_2는 불명확 거리를 나타내며 1보다 작은 소수부분이다.

여기서 Δ_1, Δ_2, ρ_1, ρ_2는 측정 가능하며, K_1, K_2는 측정 불가능하다. 따라서 D_1, D_2는 직접 측정이 불가능하다.

2회의 측정이 이루어지는 동안 표적이 움직인 거리 ($D_2 - D_1$)를 계산하면 다음과 같은 결과를 얻게 된다. 즉,

$$\begin{aligned} & D_2 - D_1 \\ &= (K_2 + \rho_2)\Delta_2 - (K_1 + \rho_1)\Delta_1 \\ &= \left(\frac{K_2\Delta_2 - K_1\Delta_1}{\Delta_2 - \Delta_1} + \frac{\rho_2\Delta_2 - \rho_1\Delta_1}{\Delta_2 - \Delta_1} \right) \\ &\quad \cdot (\Delta_2 - \Delta_1) \\ &\equiv (K + \rho) \cdot (\Delta_2 - \Delta_1) \end{aligned} \tag{11}$$

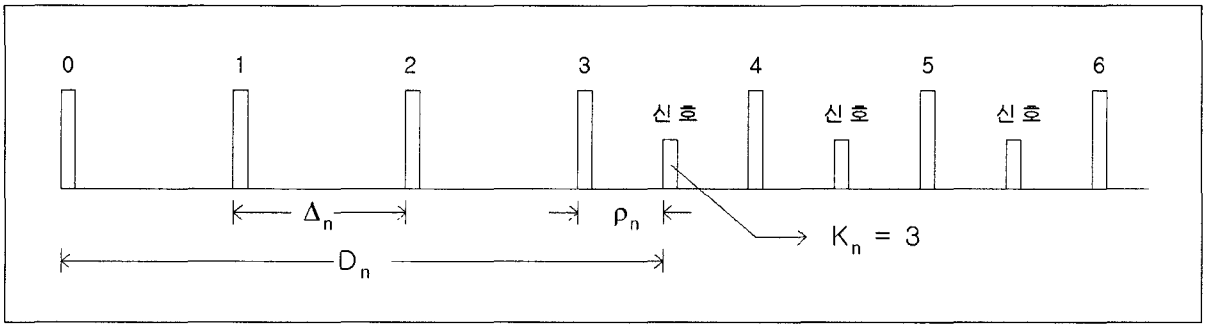
여기서,

$$K \equiv \frac{K_2\Delta_2 - K_1\Delta_1}{\Delta_2 - \Delta_1} \tag{12}$$

$$\rho \equiv \frac{\rho_2\Delta_2 - \rho_1\Delta_1}{\Delta_2 - \Delta_1} \tag{13}$$

여기서 새롭게 정의되는 ambiguity number K는 PRF 변경으로 인한 계측거리의 차($\Delta_2 - \Delta_1$)와 실제 표적이 움직인 거리($D_2 - D_1$)와의 비례상수를 나타낸다. 새롭게 정의되는 ρ는 측정값으로부터 계산 가능한 값이다.

만약 Δ_1과 Δ_2의 차이가 작아지면 $K_2 = K_1$이 되므로 K는 정수가 된다. 그러나 Δ_1과 Δ_2의 차가



[그림 2] Ambiguity number가 3인 표적신호의 출현 위치

커지면 K_1과 K_2는 서로 다르게 되어 K는 정수가 아닌 실수가 된다.

만약 K가 정수이고 그 값이 오랫동안 변하지 않는다면, 거리-속도의 관계로부터 K 값을 구할 수 있고, 이로부터 표적의 거리를 측정할 수 있게 된다.

측정간격을 매우 짧게 하여 PRF 변조를 실행할 경우, Δ_1과 Δ_2의 차이를 작게 할 수 있어 K가 정수가 되는 빈도수가 실수가 되는 경우보다 훨씬 증가하게 되어, 표적의 거리를 구할 수 있게 된다.

그림 1의 K는 PRI의 변화를 작게 하여 PRF 변조를 실행할 경우의 ambiguity number를 계산한 것이다. 이 그림으로부터 PRF가 감소할 때 K 값은 정수로부터 실수로 바뀌게 되며, 그 값도 부정확해지는 것을 알 수 있다.

PRF가 감소되는 순간을 제외하면 시간에 따른 ambiguity number의 변화를 정확하게 구할 수 있으므로 표적 속도에 대한 측정값으로부터 실제의 ambiguity number K 값을 구할 수 있다. 즉, 탐색기에 탑재된 신호처리기는 명확한 속도 V_R을 측정하므로 식(10)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} D_2 - D_1 &= \int_{t_1}^{t_2} V_R \, dt \\ &= (K+\rho)\cdot(\Delta_2 - \Delta_1) \end{aligned} \tag{14}$$

K가 정수일 때 식(14)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = Int\left[\frac{2}{c}\left(\frac{F_2 \cdot F_1}{F_1 - F_2}\right)\int_{t_1}^{t_2} V_R dt - \rho\right] \tag{15}$$

PRF를 미세한 단위로 조절하면 할수록 PRF가 감소되는 순간은 전체의 측정시간과 비교할 때 극히 작은 부분을 차지하게 된다.

위와 같이 K 값을 구할 수 있으므로 측정을 시작할 때($t = t_1$)의 정확한 표적 거리를 구할 수 있게 된다. 즉,

$$D_1 = (K + \rho_1)\Delta_1 \tag{16}$$

따라서, 식(14)으로부터 $t > t_1$ 에서의 표적 거리는 다음과 같이 구해진다.

$$D(t) = D_1 + \int_{t_1}^{t} V_R(t) \, dt \tag{17}$$

원거리에 표적이 있는 경우 미약한 표적신호로 인해 $\rho_{1,2}$측정에는 오차가 수반되게 된다.

이들 오차는 ρ와 K 값을 부정확하게 하여 거리 측정에 오류를 발생한다. K 값에 나타나는 오차로 인한 표적의 거리오차는 계측거리의 배수가 되므로 쉽게 구별할 수 있다.

즉, 탐색기가 측정한 표적속도를 적분하여 구한 표적거리와 비교하여 그 차이가 계측거리보다 작으면 식(16)과 (17)의 알고리즘으로 구한 거리를 이용하고, 그렇지 않은 경우 표적속도로 구한 거리를 택해 표적거리를 구하도록 한다.

4. 거리측정 과정

표적은 탐색기 정면에서 일정한 가속도로 접근한다. 표적의 상태 벡터는 거리, 속도, 가속도로 정한다. 이 중 속도 및 가속도는 속도측정에 의한 $\alpha\beta$필터로 구현한다[4,5].

거리는 K, ρ를 측정하여 구하되 PRF가 감소할 때에는 추적필터의 속도성분으로 예측한다. 상세한 과정은 다음과 같다.

4.1 초기화 과정

(1) MFR로부터의 자료로부터 초기화를 위한 예측 상태 입력($\hat{D}_1$, $\hat{V}_1$, $\hat{A}_1$)

(2) $\hat{D}_1$에 적합한 PRF F_1 선정 및 계측거리 Δ_1 계산

(3) 신호처리기로부터 ρ_1, V_1 측정(거리에 따른 측정 잡음 첨가)

(4) 표적 거리 추정

$$\hat{D}_1 = \hat{D}_1 \tag{18}$$

(5) 표적 상태 추정

$$\begin{aligned} \hat{V}_1 &= \hat{V}_1 + \alpha(V_1 - \hat{V}_1) \\ \hat{A}_1 &= \hat{A}_1 + \frac{\beta}{T}(V_1 - \hat{V}_1) \end{aligned} \tag{19}$$

4.2 반복 과정

(1) 표적 속도 및 가속도 예측

$$\begin{aligned} \hat{D}_2 &= \hat{D}_1 + \hat{V}_1 T + 0.5\,\hat{A}_1 T^2 \\ \hat{V}_2 &= \hat{V}_1 + \hat{A}_1 T \\ \hat{A}_2 &= \hat{A}_1 \end{aligned} \tag{20}$$

(2) $\hat{D}_2$에 부합한 PRF F_2 및 계측거리 Δ_2계산

(3) 신호처리기로부터 ρ_2, V_2 측정(거리에 따른 측정 잡음 첨가)

(4) 표적 상태 추정

$$\begin{aligned} \hat{V}_2 &= \hat{V}_2 + \alpha(V_2 - \hat{V}_2) \\ \hat{A}_2 &= \hat{A}_2 + \frac{\beta}{T}(V_2 - \hat{V}_2) \end{aligned} \tag{21}$$

(5) Ambiguity number 계산

$$\rho = \frac{\rho_2 \Delta_2 - \rho_1 \Delta_1}{\Delta_2 - \Delta_1} \tag{22}$$

$$K = Int\left(\frac{2}{c}\frac{F_2 F_1}{F_1 - F_2}\hat{V}_1 T - \rho + 0.5\right) \tag{22}$$

(6) 표적거리 추정

$$\hat{D}_2 = \begin{cases} (K+\rho_2)\Delta_2 & , F_2 > F_1 \\ \hat{D}_2 & , F_2 < F_1 \end{cases} \tag{23}$$

(7) 최신화

$$
\begin{aligned}
&t = t + dT \\
&\hat{D}_1 = \hat{D}_2,\ \hat{V}_1 = \hat{V}_2,\ \hat{A}_1 = \hat{A}_2 \\
&\hat{V}_1 = \hat{V}_2,\ \hat{A}_1 = \hat{A}_2 \\
&F_1 = F_2, \Delta_1 = \Delta_2, \rho_1 = \rho_2
\end{aligned} \tag{24}
$$

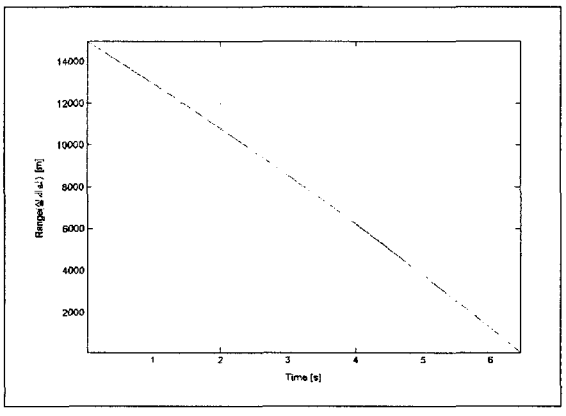
5. 시뮬레이션 결과

탐색기와 표적은 일직선상에서 운동하며, 등가속으로 표적을 향하여 접근한다고 가정한다. 이 때의 초기치를 다음과 같이 정한다. 즉, $R = 15km$, $V = -2000m/s$, $A = -10g$ 이다.

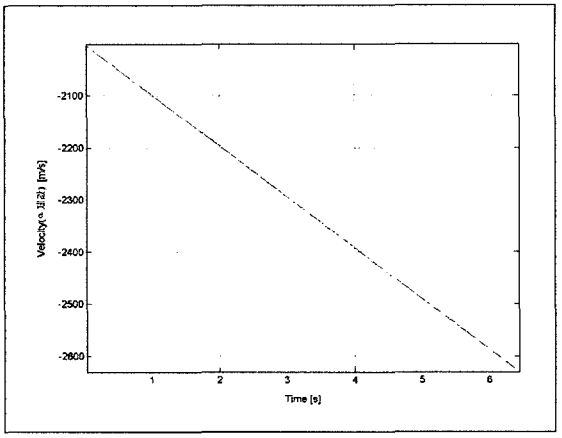
지상 레이더로부터 표적지정 오차는 다음과 같다고 가정한다. 즉, $\delta R = 0m$, $\delta V = 0m/s$, $\delta A = 0m/s^2$ 이다.

탐색기와 표적사이의 거리가 15km일 때 거리 및 속도에 대한 측정오차를 다음과 같이 가정한다. 즉, $\delta R_n = 3m$, $\delta V_n = 4.4m/s$ 이다. 이 오차는 거리의 제곱에 반비례하여 줄어든다.

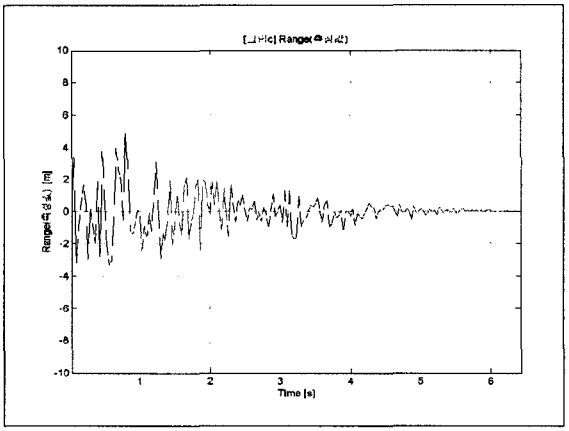
PRF는 128개로 분할된 $350kHz \sim 600kHz$ 범위 중에서 선정하는 것으로 하고, 추적필터 이득은 $\alpha = 0.8$, $\beta = 0.2$ 이며, $30Hz$로 추적을 실행한다.



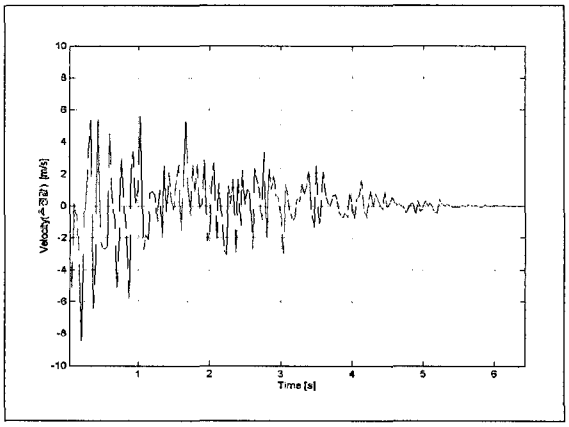
[그림 3] Range(실제값)



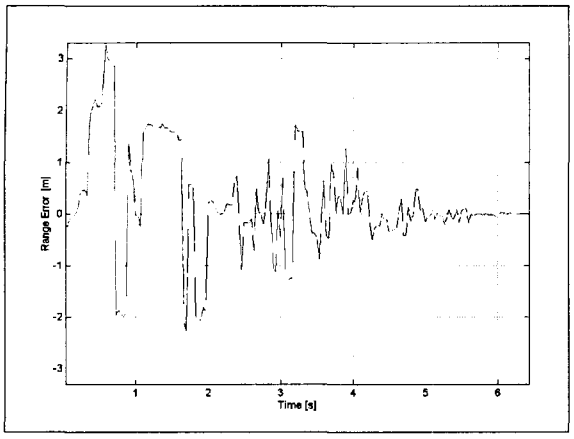
[그림 4] Velocity(실제값)



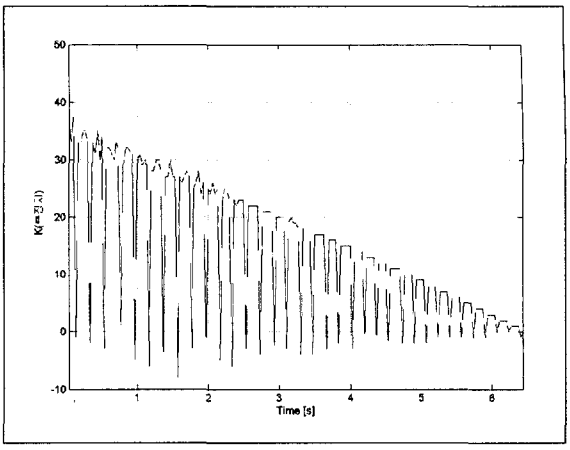
[그림 5] Range(측정값)



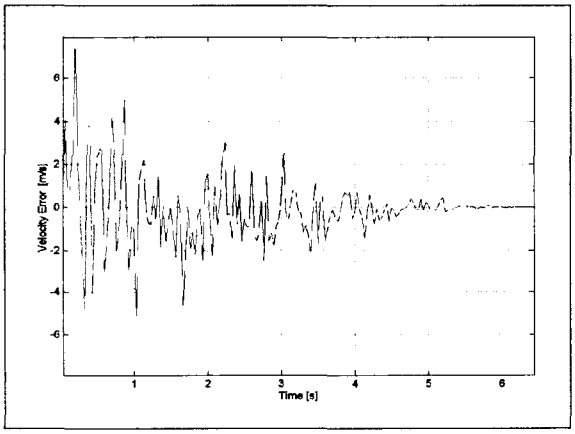
[그림 6] Velocity(측정값)



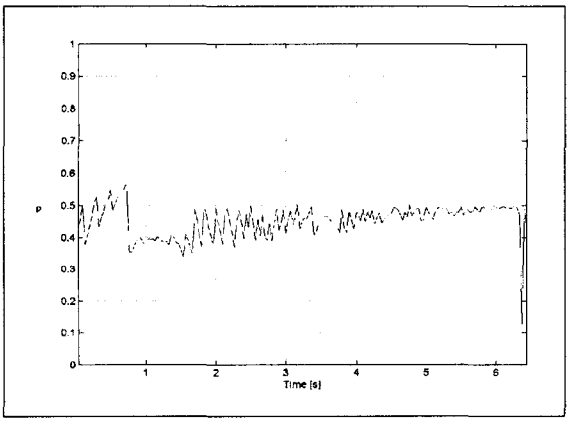
[그림 7] Range error



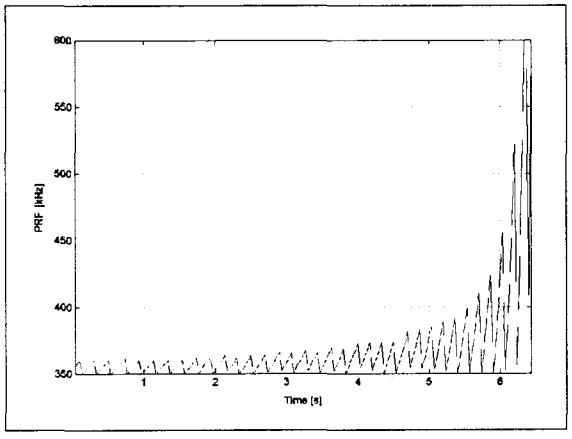
[그림 10] K(측정값)



[그림 8] Velocity error



[그림 11] Visibility factor ρ



[그림 9] PRF

그림 3 및 그림 4는 측정오차가 없을 때 각각 표적의 거리 및 속도(실제 값)를 그린 것이다.

그림 5 및 그림 6은 각각의 측정오차를 그린 것이다. 표적이 가까워짐에 따라 신호대 잡음비가 증가하여 측정오차가 작아지는 것을 볼 수가 있다.

그림 7은 최종적으로 구한 표적거리(D_2)이다. 속도로 계산된 예측거리($\hat{D}_2$)만으로는 지상 레이더에 의한 거리오차를 제거하지 못한다. 뿐만 아니라 속도 측정 오차는 그림 12에서 보는 바와 같이 거리오차를 유발한다.

또한, ambiguity number로 구한 거리($\hat{D}_2$)는 그림 13에서처럼 K에 나타나는 오차로 인해 계측거리(Δ_2)의 수배에 해당하는 거리오차를 갖게 된다. 그러나 $\hat{D}_2$에 나타나는 오차는 $\hat{D}_2$의 오차보다 훨씬 작으므로 다음과 같이 최종 표적거리(D_2)를 구할 수 있다. 즉,

$$D_2 = \begin{cases} \hat{D}_2 & , |\hat{D}_2 - \tilde{D}_2| > 200m \\ \tilde{D}_2 & , |\hat{D}_2 - \tilde{D}_2| < 200m \end{cases} \quad (25)$$

즉, 그림 7에서는 표적이 원거리에 있을 때에는 주로 속도에 의한 예측거리가, 표적이 가까이 있을 때에는 ambiguity number에 의한 거리 측정치가 선택되어 나타난다.

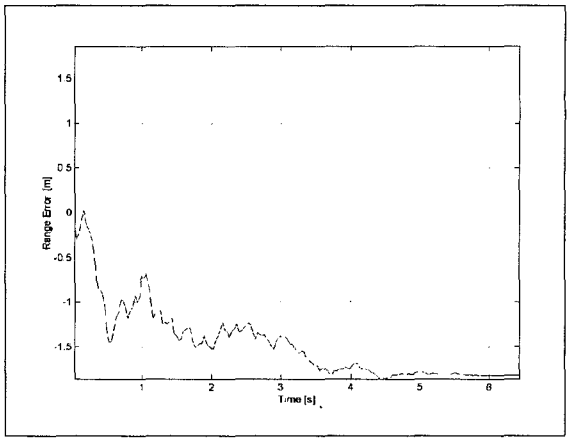
그림 8은 $\alpha\beta$ 추적 필터에 의한 속도오차를 그린 것이다. 그림 9는 표적이 접근해옴에 따라 표적신호가 잘 보이도록 PRF가 톱날파 형태로 증가되는 것을 보여준다.

그림 10은 측정된 K 값을 그린 것이다. 그림 1의 K값과 비교해보면 표적이 원거리에 있을 때 오차가 많이 발생함을 알 수 있다. 이는 측정오차에 기인하기 때문이다. 표적이 근거리에 있게 되면 높아진 신호대 잡음비로 인하여 K값에는 오차가 발생하지 않아 정밀 표적거리를 구할 수 있게 된다.

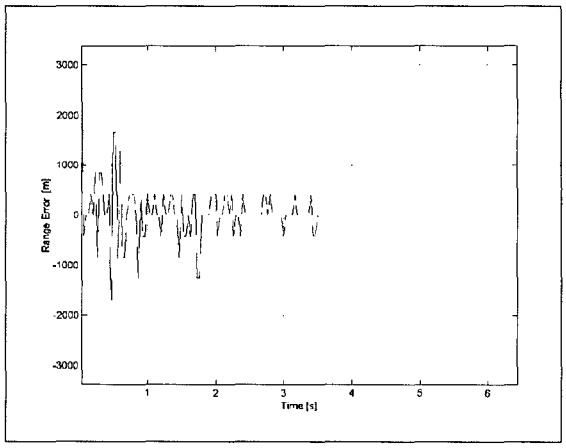
그림 11은 ρ_2를 계산한 것이다. 추적 중 대부분 0.4 ~ 0.5 범위의 값을 가져 표적신호가 대략 송신펄스 중간에 나타나는 것을 알 수 있다.

그러나 종말단계에서 표적이 극단적으로 접근할 경우 ρ_2는 0.1 근처의 값을 갖게 되어 펄스 송신 직후 표적신호가 나타남을 알 수 있다.

이 것은 최대 PRF가 제한되어서 나타나는 현상이다. 만약 표적신호가 송신펄스에 의해 차폐될 경우에는 PRF의 최대 값을 증가하거나, 탐색기의 송신 펄스 폭을 줄여야 한다.



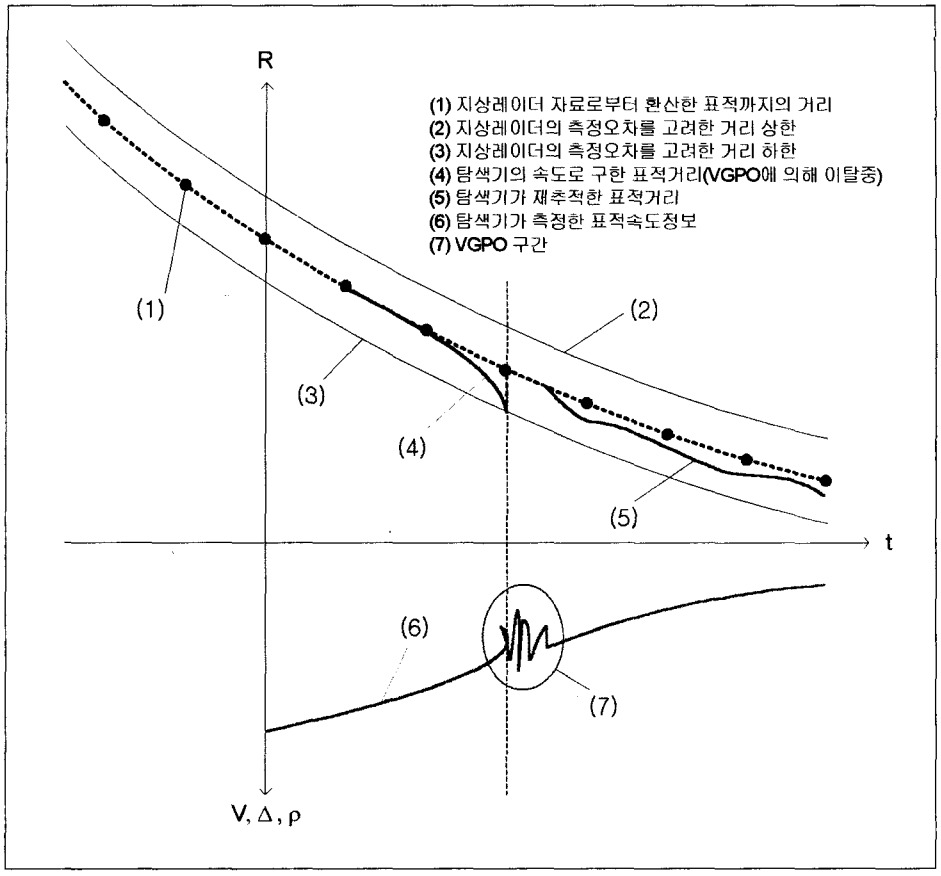
[그림 12] 속도만으로 구한 표적거리



[그림 13] K 만으로 구한 표적거리

6. 결 론

표적의 속도 및 방향을 추적하는 통상의 탐색기는 다양한 PRF를 사용할 필요가 없다. 그러나 PRF 변



[그림 14] 표적에 대한 거리-시간 다이어그램

조를 채택한 탐색기는 독자적으로 표적의 거리, 속도, 방향을 구할 수 있어 탄도탄과 같은 고속, 고기동 표적과 교전하는데 유리하다.

또한, 이러한 탐색기는 지상 레이더 보다 우수한 추적 정밀도를 갖게 되므로, 지상 레이더에 추가 부담을 지우지 않고 정밀요격이 가능한 방안이 된다.

그러나 탐색기 단독으로는 재밍에 대항하는 능력이 제한 받기 때문에 지상 레이더와 협력하여 전체 유도무기 체계의 성능을 증진시킬 필요가 있다. 즉, 지상 레이더가 추적하여 전송한 자료는 탐색기 자신의 동작을 스스로 감시하는데 활용될 수 있다.

예를 들어 그림 14와 같이 탐색기가 지상 레이더의 오차범위를 초과하여 표적을 추적할 경우, 기만형 재머(deceptive jammer)에 의한 유인으로 판단하여 표적에 대한 재추적을 시도할 수 있다. 이로 인하여 재머에 대한 교전성능이 향상된다.

참 고 문 헌

[1] Sergio Sabatini and Marco Tarantino, "Multifunction Array Radar(System Design

and Analysis)", Artech House, 1994.

[2] Eli Brookner, "Aspects of Modern Radar", Artech House, 1988, pp.497~498.

[3] D. Curtis Schleher, "MTI and Pulsed Doppler Radar", Artech House, 1991, pp.441~448.

[4] Yaakov Bar-Shalom and Thomas E. Fortmann, "Tracking and Data Association", Academic Press Inc., 1990, pp.89~98.2.

[5] Guy V. Morris, "Airborne Pulsed Doppler Radar", Artech House, 1988, pp.243~248.