

위상배열 레이더를 위한 가변 표본화 빈도 추적 필터의 설계*

洪 淳 穆*

Design of a Variable Sampling Rate Tracking Filter for a Phased Array Radar

Sun Mog Hong

요 약

위상배열 안테나 레이더에서는 기계적 관성에 관계없이 레이더 빔의 신속한 조향이 가능하기 때문에 측정을 원하는 목표와 그 목표에 대한 측정시간, 측정표본속도를 선택적으로 취할 수 있게 된다. 이 논문에서는 주어진 측정 파라미터에 대해 이러한 위상배열 레이더 시스템을 위한 3차원 가변 표본화 빈도 추적 필터를 설계했다. 이 추적 필터는 추적목표의 탐지확률을 적정한 값 이상으로 유지하기 위해서 목표의 각도 예측오차를 안테나 빔 폭의 일정한 비율이내로 줄일 수 있어야 한다. 여기서 설계한 추적 필터는 이러한 요구를 만족하는 범위에서 표본화 빈도를 낮출 수 있도록 목표까지의 거리와 기동에 따라 표본화 빈도를 선택하게 된다. 이 추적 필터 설계의 타당성은 여러가지 기동목표에 대한 수치실험을 통해 확인했다.

Abstract

The phased array antenna has the ability to perform adaptive sampling by directing the radar beam without inertia in any direction. The adaptive sampling capability of the phased array antenna allows each sampling time interval to be varied for each target, depending on the acceleration of each target at any time. In this paper we design a three-dimensional adaptive tracking algorithm for the phased array radar system with a given set of measurement parameters. The tracking algorithm avoids taking unnecessarily frequent samples, while keeping the angular prediction error within a fraction of antenna beamwidth so that the probability of detection will not be degraded during a track update illuminations. In our algorithm, the target model and the sampling rate are selected depending on the target range and the target maneuver status which is determined by a maneuver detector. A detailed simulation is conducted to test the validity of our tracking algorithm for encounter geometries under various conditions of maneuver.

I. 서 론

위상배열 안테나 레이더에서는 기계적 관성에 관계없이 레이더 빔의 신속한 조향이 가능하기 때문에 측정을 원하는 목표나 그 목표에 대한 측정시간, 측정표본 속도를 상황에 대응해서 선택할 수 있게 된다.

이러한 능동적 추적이 가능한 레이더 체계의 효과적 이용을 위해서는 기계적 조사 안테나의 추적 및 탐색 체계 설계의 경우와는 다른 복잡한 새로운 문제들에 대한 검토가 필요하게 된다. 검토가 요구되는 대표적인 문제로 3차원 목표추적기술, 추적목표에 대한 표본화 빈도의 선택, 데이터 연계 기술, 추적과 탐색에 대한 레이더 체계능력의 균형적 배분, 탐지능력향상에 관한 기술 등이 있다. 여기서는 목표의 기동과 목표 거리에 따라 표본화 빈도를 가변할 수 있도록 한 추적 알고리즘을 설계하고 수치실험을 통해 그 설계의 타당성을 확인했다.

* 正會員 : 慶北大學校 電子工學科
(Dept. of Electronics, Kyungpook Nat'l Univ.)
<접수일자 : 1992년 7월 21일>

※ 이 연구는 1991년도 국방과학연구소 장기기초연구비 지원에 의해 수행되었음.

먼저 위상배열 안테나 레이더에서 목표의 추적을 위해서는 추적목표의 위치를 예측해서 그 위치에 빔을 조향할 수 있어야 한다. 동시에 다목표 추적을 가능하도록 해야 하기 때문에 이러한 위치 예측 알고리즘은 추적오차를 크지 않게 유지하면서 계산이 간략하도록 해야 한다. 여기서는 추적 좌표축으로 극 좌표계를 선택했다. 극 좌표계에서는 운동모델의 근사화를 통해 각 추적 좌표축에 대해 분리된 필터를 구성할 수 있게 된다. 이 추적 필터는 거리, 방위각과 고각에 대해서 각각 분리된 Kalman 필터로 구성이 이루어진다. 극좌표의 각 좌표축에 대한 목표 가속도의 모델은 Singer 모델을 이용했다. 이렇게 구성된 추적 필터의 예측성능은 레이더에 근접 비행하도록 한 목표운동에 대해서 수치실험을 통해 얻었다. 궁극적으로 추적목표 표본화 빈도 선택에 이용하게 될 이 데이터는 서로 다른 표본화 빈도와 운동잡음 모델의 크기에 대해서 얻은 예측오차가 된다.

위에서 설명한 바와 같이 구성된 추적 알고리즘에 대해서 목표에 대한 예측오차를 일정한 범위 안으로 유지할 수 있도록 목표의 기동과 거리에 따라 표본화 빈도를 가변할 수 있도록 설계하고 수치실험을 통해 그 설계의 타당성을 보였다. 표본화 빈도는 대체로 목표까지의 거리가 가까와질수록 그리고 기동가속이 커질수록 증가시켜 주게 된다. 즉, 거리와 기동에 관계없이 각도 예측오차를 대략 일정하게 유지할 수 있도록 표본화 간격을 정해주게 된다. 이러한 표본화 속도의 가변은 다목표 추적문제에서 안테나 능력의 각 목표에 대한 균형적 배분을 가능하게 한다.

이 논문은 구성은 II절과 III절에서 각각 극좌표 운동모델과 추적 알고리즘에 관해서 정리하고 IV절에서 추적 알고리즘의 설계와 수치실험 결과를 설명한다. 이 추적 알고리즘의 표본화 빈도를 목표운동에 따라 가변시킬 수 있도록 한 추적필터의 설계와 시험성능은 V, VI에서 각각 설명한다. 끝으로 VII절에서는 결론을 맺는다.

II. 3차원 극 좌표계 운동모델

우선 추적 좌표계로 극 좌표계를 사용하면 추적 좌표계와 레이더의 측정 좌표계가 동일하기 때문에 레이더 측정 데이터의 처리를 간단하게 할 수 있다. 뿐만 아니라 운동모델 방정식을 거리와 각도에 대해

분리된 형태의 근사식으로 얻을 수 있기 때문에 이 좌표계를 이용했다. 이 극 좌표계에서의 필터의 구성은 거리 필터와 방위각과 고각을 예측하기 위한 2개의 각도 필터로 이루어진다. 그림 1은 이 극 좌표계에서 사용하게 될 기호들을 표시한다. 즉, 목표까지의 거리는 R , 방위각은 η , 고각은 ϵ 으로 표시하고 목표의 시선벡터 방향을 R 방향, R 방향에 수직하고 수평면에 놓인 벡터 방향을 H 방향, R 방향과 H 방향에 수직하는 벡터의 방향을 V 방향으로 표시한다.

극 좌표계에서 거리 필터의 구성은 비교적 단순하지만 각도 필터의 구성은 주의를 필요로 한다. 극 좌표계에서는 등속 목표 운동에 대해서도 비선형적인 각속도와 각가속도가 발생하게 된다. 이러한 비선형적 운동울 모델하기 위해서는 높은 차수의 각도미분을 모델의 상태변수로 포함시켜야 한다. 따라서 각도, 각속도 그리고 각가속도만을 상태변수로 한 모델의 경우는 위에서 언급한 운동의 비선형을 모델링하기가 어렵고 이 모델을 이용한 필터는 예측의 정확도가 크게 떨어지게 된다. 여기서는 이러한 문제에 효과적으로 대응할 수 있도록 다음과 같이 [2, 3]에서 제시된 거리, 각도에 대한 운동모델을 이용해서 추적 알고리즘을 구성한다. 여기서 거리방향의 속도측정은 얻어지지 않는 것으로 가정한다.

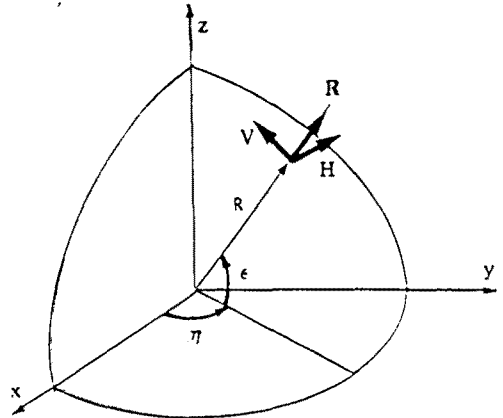


그림 1. 극 좌표계
Fig. 1. Polar coordinate system.

먼저, 거리 필터의 상태 변수는 거리, 거리방향의 속도, 거리방향의 가속도로 하고, 거리방향 가속모델은 시간에 대해서 지수적 상관관계를 갖는 Singer 모델^[1]로 선택한다. 이 운동모델의 이산치 시간에서의 근사적 모델은 다음과 같이 얻어지게 된다. 여기서

이산치 시간 t_k 에서 거리, 거리방향속도, 거리방향가속도는 각각 $R(k)$, $v_R(k)$, $a_R(k)$ 로 표시한다.^[2]

$$x_R(k+1) = \Phi_R(k)x_R(k) + v_R(k) \quad (1)$$

여기서 상태벡터 $x_R(k)$ 와 천이행렬 $\Phi_R(k)$ 는

$$x_R(k) = \begin{pmatrix} R(k) \\ v_R(k) \\ a_R(k) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\Phi_R(k) = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\omega_p^2 T^2}{2} & T & \frac{T^2}{2} \\ \omega_p & 1 + \frac{\omega_p T^2}{2} & T[1 - \frac{\beta_R T}{2}] \\ 0 & 0 & \rho_{aR} \end{pmatrix} \quad (3)$$

이고 $\rho_{aR} = e^{-\beta_R T}$ 그리고 β_R 는 Singer 모델 기동 시정수의 역이다. ω_p^2 는 목표에 대한 시선 벡터의 각속도의 제곱으로 다음에 설명하는 각도필터로부터 얻어지게 된다. T 는 표본간격으로 $t_{k+1} - t_k$ 를 표시한다. 운동과정 잡음 $v_R(k)$ 는 평균이 0이고 공분산 행렬이 다음과 같이 주어지는 확률과정으로 가정한다.

$$Q_R(k) = 2\beta_R \sigma_{mR}^2 \begin{pmatrix} \frac{T^5}{20} & \frac{T^4}{8} & \frac{T^3}{6} \\ \frac{T^4}{8} & \frac{T^3}{3} & \frac{T^2}{2} \\ \frac{T^3}{6} & \frac{T^2}{2} & T \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서 σ_{mR}^2 는 목표의 가속 분산을 표시한다.

다음으로 그림 1에서 보여지는 방위각 η 와 고각 ϵ 를 상태변수로 하는 각도 필터를 구성하기 위한 운동모델에 대해서 설명한다. 방위각 운동모델의 두번째 상태변수로 시선 벡터에 직교하고 수평면에 평행인 H 방향 속도성분 v_H 를, 그리고 고각 운동모델의 두번째 변수로 시선벡터에 직교하는 수직 방향인 V 방향 속도성분 v_V 를 이용한다. 세번째 상태 변수들은 시선 벡터에 직교하고 각각 수평면위의 H 방향 가속성분과 수직방향의 V 방향 가속성분으로 a_H , a_V 를 사용한다. 위와 같이 상태변수를 선택하고 목표가속운동 성분 a_H , a_V 를 각각 Singer 모델로 하면 각도에 대한 운동방정식은 다음과 같이 근사적으로 얻을 수 있다.^[2]

$$x_H(k+1) = \Phi_H(k)x_H(k) + v_H(k) \quad (5)$$

$$x_V(k+1) = \Phi_V(k)x_V(k) + v_V(k) \quad (6)$$

여기서 상태벡터 $x_H(k+1)$, $x_V(k+1)$ 와 천이행렬 $\Phi_H(k)$, $\Phi_V(k)$ 는 각각 다음과 같다.

$$x_H(k) = \begin{pmatrix} \eta(k) \\ v_H(k) \\ a_H(k) \end{pmatrix}, \quad x_V(k) = \begin{pmatrix} \epsilon(k) \\ v_V(k) \\ a_V(k) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\Phi_H(k) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{T}{R_H} C_R & \frac{T^2}{2R_H} \\ 0 & \rho_R & T(C_R - \frac{T}{2}\beta_H) \\ 0 & 0 & \rho_H \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\Phi_V(k) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{T}{R} C_R & \frac{T^2}{2R} \\ 0 & \rho_R & T(C_R - \frac{T}{2}\beta_V) \\ 0 & 0 & \rho_V \end{pmatrix} \quad (9)$$

여기서 $C_R = 1 - v_R T / 2R$, $R_H = R \cos \epsilon$, $\rho_R = \exp(-v_R T / R)$, $\rho_H = \exp(-\beta_H T)$, $\rho_V = \exp(-\beta_V T)$ 이다. 그리고 $v_H(k)$, $v_V(k)$ 는 서로 상관없이 없고 각각 평균이 0이고 공분산 행렬이 다음과 같이 주어지는 확률과정으로 가정한다.

$$Q_H(k) = 2\beta_H \sigma_{mH}^2 \begin{pmatrix} \frac{q_{11}}{R_H^2} & \frac{q_{12}}{R_H} & \frac{q_{13}}{R_H} \\ \frac{q_{21}}{R_H} & q_{22} & q_{23} \\ \frac{q_{31}}{R_H} & q_{32} & q_{33} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$Q_V(k) = 2\beta_V \sigma_{mV}^2 \begin{pmatrix} \frac{q_{11}}{R_H^2} & \frac{q_{12}}{R} & \frac{q_{13}}{R} \\ \frac{q_{21}}{R} & q_{22} & q_{23} \\ \frac{q_{31}}{R} & q_{32} & q_{33} \end{pmatrix} \quad (11)$$

여기서 $q_{ij}, 1 \leq i, j \leq 3$, 는 (4)의 행렬의 성분과 같다.

III. 추적 필터

극 좌표계에서는 각도운동모델 상태천이행렬의 성분이 목표거리와 거리방향속도의 함수가 되기 때문에, 거리필터로부터 얻어진 이 추정값을 이용해서 상태천이행렬을 계산한다. 마찬가지로 거리방향운동모델의 상태천이행렬을 계산하기 위해 필요한 시각 방향선의 각속도는 각도필터의 추정값으로부터 얻게 된다.^[2] 이 구성은 그림 2와 같이 된다.

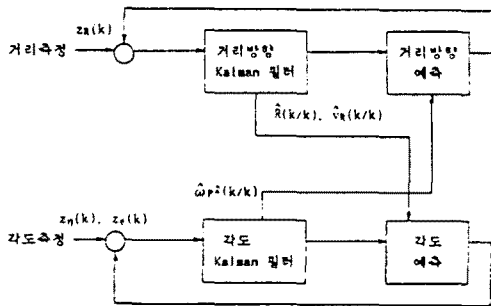


그림 2. 극 좌표계 추적 알고리즘의 구성
Fig. 2. Block diagram of coupled range and angle filters.

IV. 추적 알고리즘의 예측 성능

여기서는 III절에서 설명한 3차원 추적 필터를 주어진 레이더 측정 파라미터와 설계 조건에 대해서 구현했다. 이 추적 필터의 예측 정확도를 확인하기 위해서, 레이더에 근접한 점을 통과하도록 한 등속 비행 목표운동에 대해서 200회의 Monte Carlo 수치 실험을 통해서 예측오차의 표본평균, 표본표준편차, 제곱평균의 제곱근 (root mean square)을 구했다. 다음 절에서 추적목표 표본화 빈도의 설정에 이용하게 될 이 실험 데이터는 서로 다른 표본화 빈도와 운동잡음 모델의 크기에 대해 얻었다.

우선 거리, 방위각, 고각의 레이더 측정 오차는 정규분포를 갖는 확률변수로 표 1에서 보여주는 것과 같은 표준편차를 갖는 것으로 가정한다. 빔 폭 B는 방위각과 고각에 대해 동일한 값으로 주어진다 가정한다.

Van Keuk^[5,6]은 실험적으로 정상상태의 예측오차와 표본화 간격 사이의 관계를 얻었다. 이 관계식은 측

정잡음의 분산 σ^2 , 운동과정 잡음의 분산 σ_m^2 , 목표의 기동시정수 τ_m (II절의 $1/\beta$ 와 동일함), 그리고 요구되는 예측의 정확도 v_0 에 대해서 다음과 같이 표현된다.

표 1. 레이더 측정 잡음의 표준 편차와 빔 폭
Table 1. Radar measurement parameters

거리 측정 오차 표준 편차	σ_R	100 m
방위각 측정 오차 표준 편차	σ_n	2 mrad
고각 측정 오차 표준 편차	σ_e	2 mrad
레이더 빔 폭	B	20 mrad

$$T \approx 0.4 \left\{ \frac{\sigma \sqrt{\tau_m}}{\sigma_m} \right\}^{0.4} \frac{v_0^{2.4}}{1 + 0.5v_0^2} \quad (12)$$

여기서 v_0^2 는 Kalman 필터의 예측오차의 분산 σ_p^2 와 측정잡음 분산 σ^2 에 대해서

$$v_0^2 = \sigma_p^2 / \sigma^2 \quad (13)$$

로 표현되는 값이다.

설계 목표를 예측오차의 3-sigma가 B/2보다 작은 범위에 있도록 하는 것으로 하면 $v_0=1.5$ 정도가 되고 이 때의 표본화 간격은 표 2와 같이 얻어진다. 표 2의 표본화 간격은 Fitzgerald^[7]의 정상상태 위치 예측오차 그래프에서 $T^2 \sigma_{mn} / (R_H \sigma_n) \approx 0.8$ 에 대해 계산한 것과 거의 일치하게 된다.

표 1의 파라미터 값에 대해서는 방위각 필터의 표본화 속도가 거리와 고각 필터의 표본화 속도보다 빠르기 때문에 전체 추적 필터의 표본화 속도는 방위각 필터의 표본화 속도에 의해 결정되게 된다. 따라서 거리와 고각 필터의 표본화 속도의 결정은 여기서 생략한다.

우선 III절의 추적 필터의 예측 성능을 얻기 위해서 표 2의 목표 기동과 표본화 간격에 대해서 수치실험을 했다. 이 필터의 입력은 다음과 같은 레이더에 근접한 점을 통과하는 등속 비행 목표운동의 비행궤적이다.

표 2. 표 1의 레이더 측정 파라미터에 대해서 $v_0 = 1.5$ 로 했을 때 표본화 간격

Table 2. Sampling rates for $v_0=1.5$ and the radar measurement parameters in Table 1

		표본화 간격 T (sec)				
수평면	목표기동 σ_{mn}	σ_{mn}	σ_{mn}	σ_{mn}	σ_{mn}	
목표거리 (m/sec ²)	=160	=75	=30	=10	=5	
$R_H=2.5\text{km}$	0.20	0.27	0.39	0.59	0.78	
$R_H=5\text{km}$	0.26	0.35	0.51	0.78	1.8	
$R_H=10\text{km}$	0.34	0.46	0.67	1.0	1.4	
$R_H=20\text{km}$	0.45	0.61	0.89	1.4	1.8	
$R_H=40\text{km}$	0.60	0.81	1.18	1.8	2.4	

계적 1: 고도 4 km를 일정하게 유지하면서 x-y 평면에서 초기위치(2.5 km, 80 km), 초기속도 (0, -400 m/sec)로 구간 [0, 250 sec]에서 등속운동.

표 2에 따라 등속운동 계적 1에 대해서 극 좌표계의 R 방향, H 방향, V 방향의 기하학적 가속도를 고려하여 표본화 간격과 필터 파라미터의 선택을 표 3과 같이 취했다. 이 때 예측의 정확도는 200번의 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해서 다음과 같은 오차에 대해 확인하게 된다.

예측오차의 제곱평균의 제곱근(rms):

$$(E[\hat{x}(k)^2])^{1/2} \approx \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_i(k)^2 \right\}^{1/2} \quad (14)$$

여기서 $\hat{x}(k) = \hat{x}(k/k-1) - x(k)$ 로 예측값과 실제 목표 위치의 차이를 표시하고 $x(k)$ 는 $R(k)$, $\eta(k)$ 또는 $\epsilon(k)$ 가 된다. 그리고 N은 200이 된다.

표 3의 결과는 설계목적을 만족하는 것으로 rms 예측 오차의 3-sigma 값이 B/2의 범위 안에서 발생하고 있다. 거리 방향의 예측오차값도 100m 이내 유지됨을 알 수 있다. 따라서 기동상태에 따라 표 4와 같이 필터 파라미터를 표본화 속도와 함께 선택함으로써 설계 기준을 만족하는 예측 정확도를 얻을 수 있게 된다. 이렇게 표본화 빈도를 가변할 수 있는 추적 필터의 구성은 다음 절에서 설명하게 된다.

표 3. 비행계적 1의 운동에 대해 거리에 따라 정합된 필터 파라미터와 그 필터의 rms 예측오차

Table 3. Matched filter parameters for target trajectory 1 and rms prediction errors of the matched filters

수평면 거리 R_H	필터 파라미터 T (sec)	rms 예측오차					
		σ_{mR} (m/sec ²)	$\sigma_{m\eta}$ (m/sec ²)	$\sigma_{m\epsilon}$ (m/sec ²)	거리방위각 (m)	고각 (mrad)	각 (mrad)
2.5km	0.125	120	160	160	54	2.1	1.8
5km	0.7	10	10	10	73	3.0	2.6
10km	1.0	5	5	5	70	2.2	2.1
20km	1.5	5	5	5	81	2.2	2.3
40km	2.0	5	5	5	97	2.3	2.1

V. 가변 표본화 빈도 추적 알고리즘

가속이 없는 먼 거리의 목표추적에서는 표본화 간격이 작지 않아도 일정한 예측오차를 유지할 수 있다. 이렇게 목표의 거리와 기동에 따라서 일정한 예측오차의 범위안에서 가능한 긴 표본화 간격을 선택한다면 그만큼 각 목표에 대한 레이더 자원의 균형적 배분이 이루어질 수 있게 된다. 위상배열 레이더의 다목표 추적에서는 이렇게 레이더의 능력을 각 목표에 대해 균형적으로 배분하고 절약함으로써, 새로운 목표의 보다 신속한 탐지와 보다 많은 목표에 대한 더 정확한 추적도 가능하게 할 수 있게 된다. 여기서는 앞에서 구성한 3차원 추적 필터의 표본화 빈도를 목표의 기동과 거리에 따라 가변할 수 있도록 설계하고 여러가지 목표 비행계적에 대하여 그 필터의 성능을 수치실험으로 확인한다.

우선 표본화 빈도는 앞의 IV절에서 이미 설명한 바와 같이 식 (12)를 이용해서 결정할 수 있다. 설계목적에 따라 표 2와 같이 목표거리와 목표기동에 따라 표본화 빈도를 계산해 낼 수 있다. 그러나 비행목표 가속의 크기와 지속시간에 따라 결정되는 σ_m 과 τ_m 은 추적상태에서 쉽게 계산하기 어려운 값이다. 따라서 식 (12)는 가정된 τ_m 과 σ_m 에 대해서 표본화 간격 T를 결정하는 기준으로 사용하게 된다. 여기서는 기동정도를 "High", "Medium", 그리고 "Low"로 나누어 τ_m 과 σ_m 을 그 기동의 대표적인 값으로 해서 T를 결정한다. 뒤에 나오는 표 4는 이러한 예가 된다. 여기서 문제는

기동정도 사이에서 목표운동의 천이가 발생했을 때 이에 대응해서 τ_m , σ_m 과 T 를 적절히 선택할 수 있도록 어떻게 기동정도 사이의 천이를 민감하게 검출하느냐 하는 것이다. 이러한 기동과 비기동의 검출방법을 다음에서 제시한다. 여기서는 속도 측정없이 각도와 거리에 대한 측정 예측오차를 이용한 기동검출 방법을 구성한다.

기동검출의 입력은 한 표본 간격 전의 기동상태 $M(k-1)$, 측정 예측오차 $\xi(k)$ 와 분산 $S(k)$ 로 출력은 현재의 기동상태 $M(k)$ 가 된다. 비기동검출의 입력은 $M(k-1)$ 과 가속 추정값 $\hat{a}(k/k)$, ..., $\hat{a}(k-m/k-m)$ 과 분산 $P_{33}(k)$, ..., $P_{33}(k-m/k-m)$ 로 출력은 현재의 기동상태 $M(k)$ 가 된다. 즉 기동과 비기동 검출 필터의 입출력을 표시해 보면 그림 3과 같다.

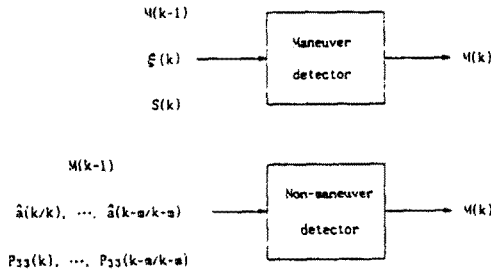


그림 3. 기동 및 비기동 검출

Fig. 3. Maneuver and Non-maneuver detector.

기동검출 필터의 구성을 정리해 보면 다음과 같다.

1) $\lambda_{HV}(k)$ 와 $\lambda_R(k)$ 계산.

여기서

$$\lambda_{HV}(k) = \frac{\xi_n(k)^2}{S_n(k)} + \frac{\xi_c(k)^2}{S_c(k)} \quad (15)$$

$$\lambda_R(k) = \frac{\xi_R(k)^2}{S_R(k)} \quad (16)$$

이고 $\lambda_{HV}(k)$ 는 자유도 2의 chi-square 확률변수, $\lambda_R(k)$ 는 자유도 1의 chi-square 확률변수이다.

2) 기동상태의 검출 :

1) $M(k-1) = \text{"Low"}$ 일 때,

$$\lambda_{HV}(k) \geq \lambda_1 \text{ 또는 } \lambda_R(k) \geq \lambda_2 \text{이면,}$$

$$M(k) = \text{"High"}.$$

(17)

2) $M(k-1) = \text{"Low"}$ 일 때,

$$\lambda_{HV}(k) \geq \lambda_3 \text{ 또는 } \lambda_R(k) \geq \lambda_4 \text{이면,}$$

$$M(k) = \text{"Medium"}. \quad (18)$$

3) $M(k-1) = \text{"Medium"}$ 일 때,

$$\lambda_{HV}(k) \geq \lambda_5 \text{ 또는 } \lambda_R(k) \geq \lambda_6 \text{이면,}$$

$$M(k) = \text{"High"}. \quad (19)$$

4) 식 (17)~식 (19)를 만족하지 않으면 $M(k) = M(k-1)$.

비기동 검출 필터는 다음과 같다.

1) $\Delta_R(k)$, $\Delta_H(k)$, $\Delta_V(k)$,

$$\sum_{i=k-m}^k \Delta_R(i), \sum_{i=k-m}^k \Delta_H(i), \sum_{i=k-m}^k \Delta_V(i) \text{ 계산.}$$

$$\text{여기서 } \Delta_R(k) = \frac{\hat{a}_R^2(k/k)}{P_{R33}(k/k)} \quad (20)$$

$$\Delta_H(k) = \frac{\hat{a}_H^2(k/k)}{P_{H33}(k/k)} \quad (21)$$

$$\Delta_V(k) = \frac{\hat{a}_V^2(k/k)}{P_{V33}(k/k)} \quad (22)$$

2) 비기동상태의 검출 :

1) $M(k-1) = \text{"Medium"}$ 일 때,

$$\Delta_R(k) \leq \Delta_1, \Delta_H(k) \leq \Delta_2, \Delta_V(k) \leq \Delta_3,$$

$$\sum_{i=k-m}^k \Delta_R(i) \leq \Delta_4, \sum_{i=k-m}^k \Delta_H(i) \leq \Delta_5, \sum_{i=k-m}^k \Delta_V(i) \leq \Delta_6$$

$$\text{이면, } M(k) = \text{"Low"}. \quad (23)$$

2) $M(k-1) = \text{"High"}$ 일 때,

$$\Delta_R(k) \leq \Delta_7, \Delta_H(k) \leq \Delta_8, \Delta_V(k) \leq \Delta_9,$$

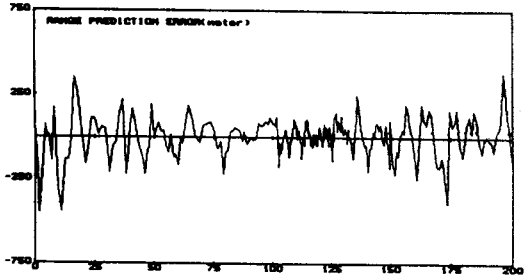
$$\sum_{i=k-m}^k \Delta_R(i) \leq \Delta_{10}, \sum_{i=k-m}^k \Delta_H(i) \leq \Delta_{11}, \sum_{i=k-m}^k \Delta_V(i) \leq \Delta_{12}$$

$$\text{이면, } M(k) = \text{"Medium"}. \quad (24)$$

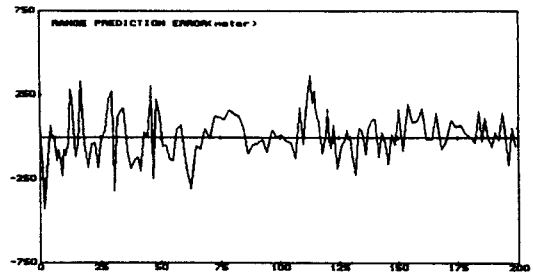
3) 식 (23), 식 (24)를 만족하지 않으면

$$M(k) = M(k-1).$$

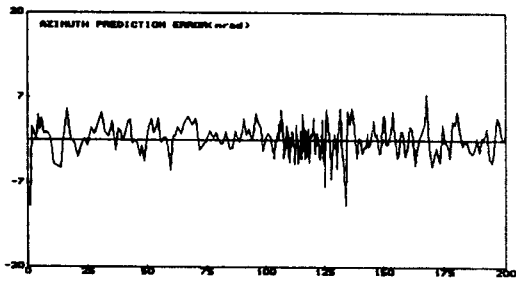
식 (17)~식 (24)의 임계값 λ_i , $1 \leq i \leq 6$, Δ_i , $1 \leq i \leq 12$ 는 chi-square 분포의 신뢰구간으로부터 결정된다. 이렇게 해서 얻은 기동상태 $M(k)$ 에 따라 σ_m , τ_m 그리고 표본화 간격 T 의 선택이 이루어지게 된다.



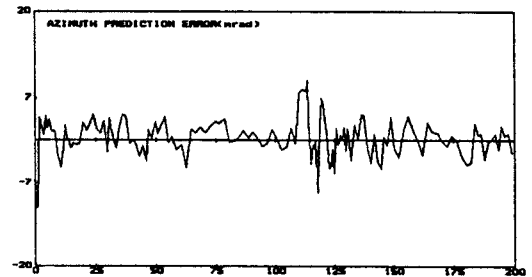
(a)



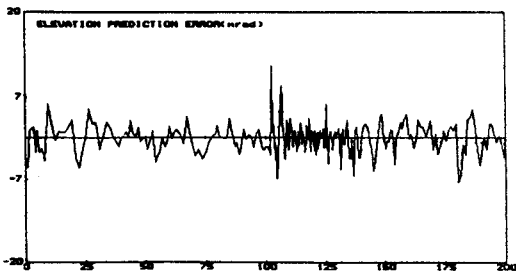
(a)



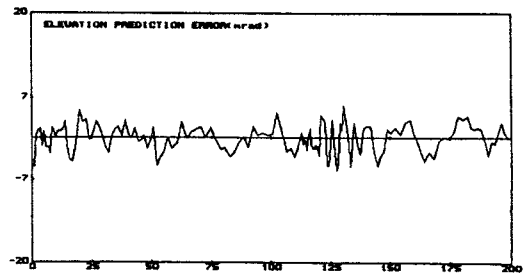
(b)



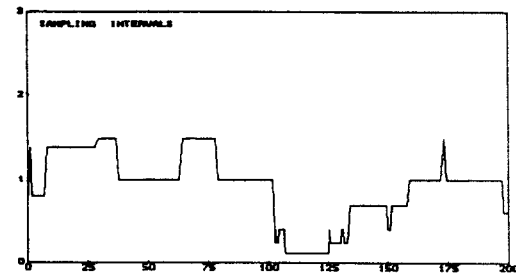
(b)



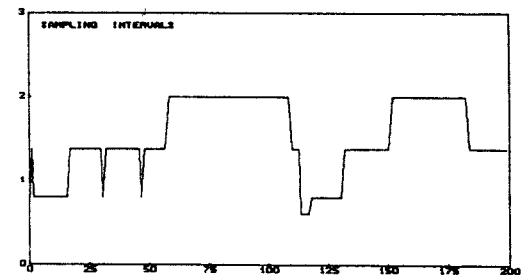
(c)



(c)



(d)



(d)

그림 4. (a) 운동궤적 2A에 대한 거리 예측오차
(b) 운동궤적 2A에 대한 방위각 예측오차
(c) 운동궤적 2A에 대한 고각 예측오차
(d) 운동궤적 2A에 대한 표준화 구간값의 변화.

그림 5. (a) 운동궤적 2B에 대한 거리 예측오차
(b) 운동궤적 2B에 대한 방위각 예측오차
(c) 운동궤적 2B에 대한 고각 예측오차
(d) 운동궤적 2B에 대한 표준화 구간값의 변화.

Fig. 4. (a) Range prediction error for target trajectory 2A. (b) Azimuth prediction error for target trajectory 2A. (c) Elevation prediction error for target trajectory 2A. (d) Sampling intervals for target trajectory 2A.

Fig. 5. (a) Range prediction error for target trajectory 2B. (b) Azimuth prediction error for target trajectory 2B. (c) Elevation prediction error for target trajectory 2B. (d) Sampling intervals for target trajectory 2B.

VI. 가변 표본화 빈도 추적 필터 설계 예

여기서는 추적 필터 설계 예로서 표 1과 같이 측정 파라미터 값이 주어졌다고 할 때 예측 오차의 3-sigma가 B/2이내 있도록 하는 가변 표본화 빈도 추적 필터를 설계하고 수치실험을 통해 그 성능을 확인한다. 목표의 수평면 거리 R_H 는 2.5 km~80 km 범위에 있고 최대 목표 속도는 400 m/sec로 가정한다. 기동 정도 $M(k)$ 와 $R_H(k)$ ($R_H(k) \leq R(k)$)에 따라 $\sigma_m(k)$, $T(k) = t_{k+1} - t_k$ 를 표 4와 같이 결정하도록 한다. 기동 탐지를 위한 식 (17)~식 (24)의 임계값으로 식 (17)에서는 99%, 식 (18)에서는 95%, 식 (19)에서는 97.5% 신뢰구간에 대해 결정한다.

표 4. 기동상태와 거리에 따른 표본화 간격과 필터의 운동 잡음 모델 표준편차
Table 4. Sampling rates and process noise model parameters scheduled on maneuver status and range

기동 상태 거리	High	Medium	Low
25-50km	$T=0.125$ $\sigma_{mR}=120$ $\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=160$		
5-10km	$T=0.25$	$T=0.4$	$T=0.7$
	$\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=75$ $\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=30$ $\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=10$		
10-20km	$T=0.4$	$T=0.7$	$T=1.0$
	$\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=75$ $\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=30$ $\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=5$		
20-40km	$T=0.6$	$T=1.0$	$T=1.5$
	$\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=75$ $\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=30$ $\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=5$		
40-80km	$T=0.8$	$T=1.4$	$T=2.0$
	$\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=75$ $\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=30$ $\sigma_{mR}=\sigma_{m1}=\sigma_{m2}=5$		

비기동 탐지를 위해서 식 (23)에서는 13~14%, 식 (24)에서는 20~25% 신뢰구간에서 임계값을 결정했다. 그리고 식 (23), 식 (24)에서 m은 2로 한다. 이 가변 표본화 빈도 필터의 표본화 간격의 변화와 예측 성능은 다음에서 수치실험을 통해 보인다. 여러 비행케트에 대해서 설계목표를 만족하는 결과를 얻었지만 여기서는 각 케트의 최근 접점이 5 km 또는 40 km이고 비행속도가 5g인 경우에 대해서만 소개한다.

케적 2A 고도 4 km를 일정하게 유지하면서 x-y평면에서 초기위치 (0, 50 km), 초기속도 (0, -400 m/sec)로 구간 [0, 105 sec]에서 등속 운동, 구간 [105 sec, 117 sec]에서 가속 50 m/sec²로 우회전, 구간 [117 sec, 200 sec]에서 다시 등속운동. 레이다로부터 최근 접하는 시간과 수평면 거리를 t=111 sec에서 5 km.

케적 2B 초기위치 (-24.75 km, 74.75 km)로 나머지는 케적 2A와 동일. 레이다로부터 최근접하는 시간과 수평면 거리는 t=111 sec에서 40 km.

여러 경우의 시험케트에 대해서와 마찬가지로 그림 4와 5에서도 거리 예측 오차는 300 m 이내로 나타나고 있고 각도 예측 오차도 B/2 (10 mrad) 정도 이내로 유지되어 대체로 설계 조건을 만족하는 예측 성능을 보였다.

VII. 결 론

이 논문에서는 위상배열 안테나 레이다에서의 목표추적을 위한 추적 필터를 구성했다. 이 추적 필터는 계산을 간략화하기 위해서 거리와 방위각, 고각 방향에 대해서 분리된 구성을 갖는다. 필터의 파라미터는 기동검출에 따라 결정된 기동상태와 목표거리에 의해 선택되어진다. 이렇게 구성된 추적 필터가 설계목적에 만족하는 것을 수치실험을 통해 확인했다.

참 고 문 헌

[1] R.J. Fitzgerald, "Development of practical PDA logic for multitarget tracking by microprocessor," *Proc. American Control Conference*, Seattle, WA, June 1986.
[2] S.S. Blackman, *Multiple Target Tracking with Radar Applications*, Artech House, Dedham, MA, 1986.
[3] J.B. Pearson and E.B. Stear, "Kalman filter application in airborne radar tracking," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-10, pp.319-329, 1972.

- [4] R. A. Singer, "Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-6, pp. 473-483, July 1970.
- [5] G. Van Keuk, "Adaptive computer controlled target tracking with a phased array radar," *IEEE 1975 Interantional Conference*, Washington, D. C.
- [6] G. Van Keuk, "Software structure and sampling strategy for automatic target tracking with a phased array radar," *AGARD Conference Proceedings* no. 252, Monterey, CA, Oct. 1978.
- [7] R. J. Fitzgerald, "Simple tracking filters : filtering and smoothing performance," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-16, pp. 860-864, November 1980.

— 著 者 紹 介 —



洪 淳 穆

1957年 7月 1日生. 1978년 2월 한국항공대학 전자공학과 공학사학위 취득. 1980년 2월 한국과학기술원 산업전자공학과 공학석사학위 취득. 1989년 8월

The Univ. of Michigan 항공공학과 공학박사학위 취득. 1980년~현재 경북대학교 조

교수. 주관심 분야는 추적 및 데이터연계, 로봇트 운동계획, 제어이론 등임.