

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.4.292>

공분산 및 신호관리를 이용한 RF탐색기 시선각 변화율 추정기법

문관영*, 전병을**

RF Seeker LOS Rate Estimation Method using
Covariance and Signal Management

Gwanyoung Moon* and Byungeul Jun**

ABSTRACT

The line-of-sight(LOS) rate is estimated using Kalman filter in Radio-Frequency(RF) seeker. For the two axis gimballed seeker, proper system modeling is considered and the basic filter structure is set up. The main issue for Kalman filter is choosing the proper process and measurement noise. For the measurement process, the signal to noise ratio(SNR) and other components are introduced. To cope with the eclipse problem or other abnormal seeker status, the pseudo input signal concept is proposed. By conditioning abnormal signals, the LOS rate estimation performance is increased. The process noise is also an important factor in the propagation phase. The analytical approach on a process noise component is performed and a reliable region for the filter is calculated based on the eigenvalue analysis. Some numerical simulations are performed to check the validity of suggested algorithm.

초 록

칼만 필터를 이용하여 RF 탐색기의 시선각 변화율 추정을 수행하였다. 김발형 탐색기의 모델링을 기반으로 칼만필터를 설계하였다. 필터 설계 시 주요한 인자인 공정 잡음 및 측정 잡음의 특성에 대해 살펴보았으며, RF 탐색기의 신호 특성에 맞는 측정 잡음치를 선정하여 필터링을 수행하였다. 측정 잡음관리를 위해 SNR 및 관련 신호를 이용하였으며, 공정 잡음에 따른 필터의 민감도 확인을 위해 대수적 방식을 사용하였다. 일식 등으로 탐색기 신호가 없는 경우 선형 해석을 통해 필터의 안정도를 분석하였다. 수치 시뮬레이션을 통해 제안된 시선각 변화율 추정기법의 타당성을 검토하였다.

Key Words : LOS Rate(시선각 변화율), Kalman Filter(칼만필터), Process Noise(공정잡음), Measurement noise(측정잡음), RF Seeker(RF 탐색기)

1. 서 론

RF (Radio Frequency) 도플러 탐색기는 표적에 특정 주파수를 송신하고, 이 신호의 반사파를

† 2011년 4월 28일 접수 ~ 2012년 2월 22일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 1-1

** 정회원, 국방과학연구소 1-1

교신저자, E-mail : rootlocy@daum.net

대전광역시 유성구 수남동 국방과학연구소

수신하여 두 신호간의 도플러차를 이용하기 때문에 상대 속도 정보는 비교적 신뢰할만하다. 따라서 비례항법유도의 성능을 결정하는 주요 인자는 시선각 변화율 추정치의 정확도이다. 시선각 변화율을 추정하기 위해 시선각 오차를 이용한다. 탐색기 추적루프의 특성상 시선각 오차는 시선각 변화율과 비례관계에 있으므로, 이를 이용하여 시선각 변화율을 추정할 수도 있지만, 이는 탐색기의 추적루프가 정상상태인 경우에만 성립하는

관계이다. 즉 표적이 기동하면 추적루프가 과도상태가 되며, 이 경우 시선각 오차와 시선각 변화율 사이의 비례관계는 성립되지 않는다.

이러한 점을 극복하기 위해 시선각 변화율을 추정하는 방법에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 참고문헌[1]에서는 EKF(Extended Kalman Filter)를 이용하여 김발형 영상 탐색기(Image sensor)의 모델링을 수행하고 시선각 변화율을 추정하였으며, 참고문헌[2]에서는 레이더 정보와 영상 탐색기를 이용한 시선각 변화율 추정기법이 제안되었다. 이 논문에서는 영상탐색기에 적용되는 측정(measurement) 및 전파(process) 잡음을 고려하였다. 위 두 논문은 칼만필터를 이용하여 시선각을 추정한다는 측면에서 본 논문과 유사하지만, 영상탐색기를 이용하여 시선각 변화율 추정하므로, RF탐색기를 이용하여 시선각 변화율 추정하기 위한 특성이 반영되어 있지 않았으며, 탐색기에 대한 공분산특성도 수치적 방법을 통해 분석하였다. 한편 동체 운동과 2축 김발형 탐색기의 상관관계를 보상하기 위한 연구[3]가 수행되었으며, 최근에는 동체부착형 탐색기(Strap-down seeker)를 이용한 시선각 변화율 추정기법에 대한 연구도 수행되었다[4].

RF 탐색기의 운동방정식 및 잡음특성을 모델링하고 이를 바탕으로 시선각 변화율을 추정한 연구도 수행되었다[5]. 이 논문에서는 RF 탐색기의 신호가 표적과 유도탄의 거리에 반비례한다는 가정하에 모델링을 수행하고 이에 따른 시선각 변화율을 추정하였다. 하지만, 실제 RF 탐색기의 수신 신호는 단순 거리만의 함수로 생각되기 어렵다.

RF 탐색기는 송, 수신 도플러를 이용하여 표적을 추적하기 때문에 차폐현상(Eclipse)이 발생한다. 이러한 차폐현상을 회피하는 알고리즘이 탐색기 자체에 적용된다 하더라도 HPRF(High Pulse Repetition Frequency)를 이용하는 경우 유도탄이 표적에 접근할수록 송신 신호 특성상 차폐현상을 완벽히 회피할 수는 없으며, 이 경우 RF 탐색기 신호의 질이 매우 저하되어 유도탄의 요격 성능은 현격히 떨어진다.

본 논문에서는 이러한 차폐현상이 발생하는 경우에도 시선각 변화율을 양호하게 추정하는 기법을 제안한다. 김발형 탐색기의 지배방정식을 설정하고, 칼만필터를 이용하여 시선각 변화율 추정필터를 설계하였다. 탐색기에 차폐현상이 발생하는 경우, 신호대 잡음비를 이용하여 칼만필터의 공분산을 관리한다. 또한 글린트 잡음 특성

및 탐색기의 기계적 특성에 따른 측정신호의 공분산을 관리하였다. 탐색기 신호가 없는 구간에서 필터의 안정성에 대해 선형 해석적 관점에서 살펴보았으며, 신호대 잡음비 이외에 필터의 성능에 영향을 미치는 항목에 대한 해석적 분석을 수행하였다. 제안된 필터 구조 및 공분산 관리 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 수치시뮬레이션을 수행하였다.

II. 시스템 모델링 및 필터구조

2.1 RF 탐색기 각도정의

일반적으로 김발형 탐색기는 유도탄 동체에 2축 김발로 구속되어 있는 형태를 갖게 된다. 이때, 기준좌표계에 대한 동체 좌표(Body frame)의 회전을 θ_t^B 로 나타낼 수 있으며 동체 좌표에 대한 탐색기 안테나의 지향각을 λ_B^A 로 표기하였다. 이 때 표적이나 동체의 기동에 의해 탐색기의 안테나각과 탐색기가 표적을 인지하는 위치사이의 불일치가 발생할 수 있는데, 이를 시선각 오차(ϵ_θ)로 정의한다. 한편 탐색기를 공력가열로부터 보호하기 위해 장착하는 레이돔(radome)의 경우 신호적 특성만 고려한다면 반구형(hemi-sphere)이 가장 우수하겠지만, 공력학적 특성을 위해 오자이브(Ogive) 형태를 갖는 것이 일반적이다. 이러한 형태의 레이돔을 장착함에 따라 탐색기 안테나 각에 따라 레이돔 오차가 수반되는 것으로 알려져 있다. 표적 및 유도탄 기동에 따라 발생한 시선각 오차를 줄이기 위해 탐색기 트랙루프가 설계되며, 이러한 트랙루프의 특성을 이용하여 시선각 변화율을 추정하는 방식도 알려져 있다. 하지만 이는 정상상태에서만 사용될 수 있는 시선각 변화율 추정방식이다.

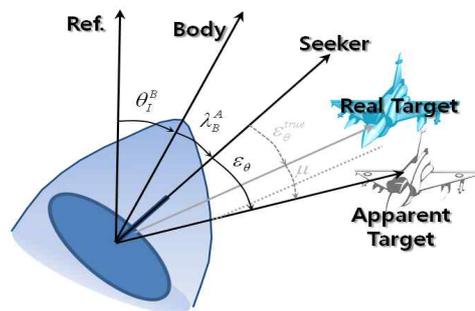


Fig. 1. Definition of seeker angle

2.2 호밍필터 구조

참고문헌[6, 7]에서는 2축 김발형 탐색기의 시스템 지배 방정식에 대해 정리하였다. 이를 토대로 시스템을 살펴보면, 상대거리 및 상대속도, 그리고 표적의 가속도로 표현되는 선형시스템임을 알 수 있다. 이를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_\theta \\ \dot{\lambda}_y^{LOS} \\ \dot{a}_z^{LOS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2\frac{\dot{R}}{R} - \frac{1}{R} \\ 0 & a_x^{LOS} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_\theta \\ \lambda_y^{LOS} \\ a_z^{LOS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -q^A \\ \frac{1}{R} a_z^{mLOS} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_{zI}^{LOS} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_\psi \\ \dot{\lambda}_z^{LOS} \\ \dot{a}_y^{LOS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2\frac{\dot{R}}{R} - \frac{1}{R} \\ 0 & -a_x^{LOS} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_\psi \\ \lambda_z^{LOS} \\ a_y^{LOS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r^A \\ -\frac{1}{R} a_y^{mLOS} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_{yI}^{LOS} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 R 은 유도탄과 표적의 상대거리, \dot{R} 은 유도탄과 표적의 상대속도를 의미한다. $\epsilon_\theta, \epsilon_\psi$ 는 시선각 오차, $\dot{\lambda}_y^{LOS}, \dot{\lambda}_z^{LOS}$ 는 시선각 변화율, \vec{a}^{LOS} 는 시선각축에서 표적의 가속도, q^A, r^A 는 탐색기 김발각 자이로 측정치, a_z^{mLOS}, a_y^{mLOS} 는 유도탄의 시선각 방향에서의 가속도를 의미한다. Fig. 2에 2축 김발시스템의 좌표계 및 변수들의 기하학적 관계를 도시하였다.

한편 식(1), (2)와 같이 2축 김발 탐색기의 시선각 변화율 운동방정식을 decoupling하기 위해서는 물 축 관련 가정들이 필요하며, 이에 대한 식은 참고문헌[6]에 상술되어 있다.

Figure 3에는 전체 시스템 블록선도를 도시하였다. 지상 레이더 정보를 이용하여 시선각 변화율을 추정할 수 있으며, 이를 이용하여 상대변수 초기화를 수행한다. 종방향과 횡방향은 대칭이므로 식(1)을 다음과 같이 정식화 하자.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw, \quad w \sim N(0, Q) \quad (3)$$

$$z = Hx + v, \quad v \sim N(0, R) \quad (4)$$

여기서 $x = [\epsilon_\theta, \dot{\lambda}_y^{LOS}, a_z^{LOS}]^T$, $u = [q^A, \frac{1}{R} a_z^{mLOS}]^T$, $H = [1, 0, 0]$ 이다.

공정 잡음(process noise) w 는 탐색기 김발 자이로의 잡음, 가속도 센서의 잡음을 상대거리로 나눈 값 및 표적 가속도의 미분항으로 구성되며, 각각의 분산은 정규분포를 따르는 것으로 가정한다. 측정치로는 탐색기의 시선각오차(BSE : Bore Sight Error)만을 고려하였다. 따라서 측정 잡음

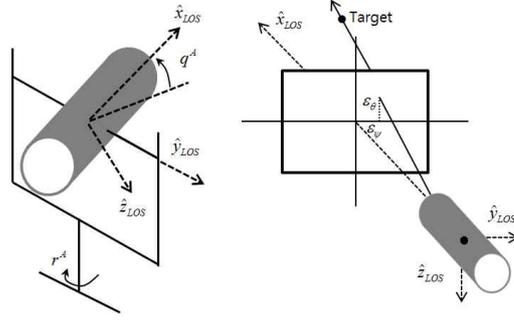


Fig. 2. Two axes gimbals, head and pointing^[6]

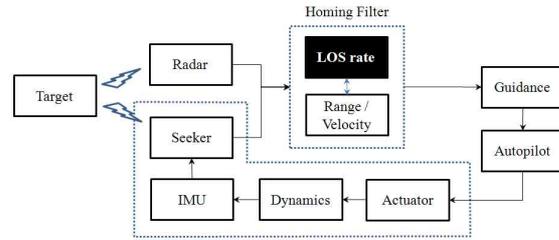


Fig. 3. System block diagram

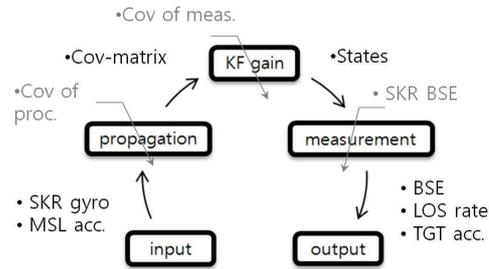


Fig. 4. LOS rate estimation filter structure

(measurement noise) v 는 탐색기 시선각오차의 분산값으로 결정된다.

Figure 4에는 시선각 변화율 추정필터의 구조를 도시하였다. 시선각 변화율을 추정하기 위해서는 상대거리, 속도 및 시선방향 표적가속도 정보를 갖고 있어야한다. 이 중 상대거리 및 속도는 추정하고자 하는 상태변수에 비해 느린 동특성을 갖고 있음을 유념하자[8-10].

III. 시선각 변화율 추정기법

3.1 측정잡음 공분산

칼만필터를 이용하여 상태변수 추정 시 고려

해야 하는 주요 인자 중 하나는 공분산관리이다. 본 논문에서의 칼만필터는 탐색기에서 측정되는 시선각 오차를 측정치로 사용하기 때문에 이와 관련된 공분산을 파악해야 한다. 일반적으로 RF 탐색기의 공분산은 탐색기의 열잡음과 글린트 특성에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다[11]. 열잡음은 표적과의 상대거리가 가까워질수록 거리에 반비례하여 신호특성이 좋아지지만, 일정 거리 이상 표적에 접근하면 글린트 특성에 의해 신호특성이 나빠진다. 하지만, 이는 탐색기 측정신호의 일반적인 특성일 뿐 실제 상황에서는 일식 및 탐색기의 기계적 특성 등으로 인해 이러한 거리 대 측정 신호의 특성이 성립되지 않는다.

시선각오차의 특성은 탐색기의 신호 대 잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio)에 의해 주요하게 결정되며 신호차폐현상에 의한 시선각오차의 측정잡음(fluctuation)도 SNR에 의해 큰 영향을 받는다. 일반적으로 시선각오차의 분산과 신호대 잡음비는 다음과 같은 관계식을 만족하는 것으로 알려져 있다.

$$\sigma_{SNR} = \frac{k_s}{\sqrt{2 \times SNR}} \quad (5)$$

여기서 k_s 는 탐색기 고유 상수이다. 이러한 관계는 아래 Fig. 5에서 보이는 것처럼 일식이 발생하는 경우에도 성립된다. 신호차폐에 의해 SNR이 감소되는 구간에서는 시선각오차값 및 탐색기 자이로 특성이 비정상적이며, SNR이 회복되는 경우 초기 과도구간을 제외하면 유의미한 값이 산출됨을 알 수 있다.

한편 글린트(Glint)에 의해 시선각오차는 영향을 받는다. 글린트는 Fig. 6에서 보이는 것과 같이 표적과 유도탄의 조우기하에 의해 크게 좌우되므로, 글린트에 의한 시선각오차의 분산을 다음과 같이 모델링 하였다.

$$\sigma_{GLT} = K \cdot \frac{A \sin \mu}{R} \quad (6)$$

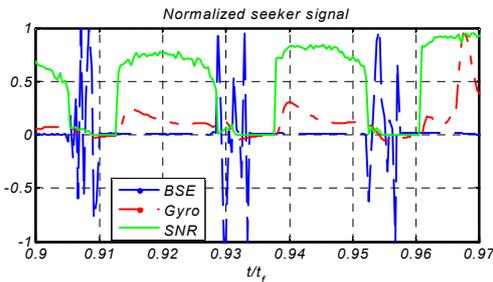


Fig. 5. Normalized seeker signals

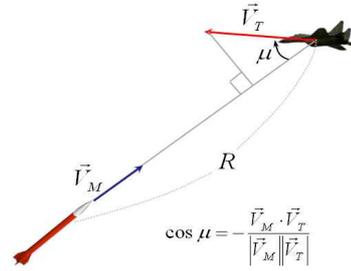


Fig. 6. Engagement geometry

여기서 A 는 표적의 넓이, K 는 비례상수, R 은 상대거리, μ 는 조우각도를 의미한다.

한편 기계적 특성에 의해 시선각 오차는 일정 정도 이하로 작아질 수 없으며, 이는 안정화 및 추적루프의 특성 과도 관련이 있다.

따라서 이를 모두 고려하면 시선각오차 측정 공분산은 다음과 같이 정리 될 수 있다.

$$\sigma_{BSE}^{measure} = \sigma_{SNR} + \sigma_{GLT} + \sigma_{VIS} \quad (7)$$

Figure 7에는 이러한 시선각오차의 특성을 도시하였다. 여기서 점선은 탐색기에서 측정되는 시선각오차이며, 실선은 식 (5)로 계산되는 시선각오차의 공분산이다. 그림 8은 식 (7)의 각 성분이 잘 보이도록 그림 7을 확대하여 도시한 것이다. 그림 8에서 짧은 점선은 시선각오차, 일점쇄선은 식 (5)에 의해 결정되는 시선각오차의 한계, 긴 점선은 글린트에 의한 분산값, 실선은 이러한 모든 효과를 고려한 측정치의 분산값을 도시하고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 신호의 일식이 빈번하게 발생하는 부분에서는 식 (5)에 의해 측정치 공분산이 설정되고 있으며, 비교적 근접한 영역에서는 표적 글린트 효과에 의한 영향이 주요히 반영되고 있음을 알 수 있다. 한편 탐색기의 신호들이 비정상적인 경우, 올바르게 판단되는 측정치를 가정해서 측정치를 대체하거나, 단순 propagation에 의한 추정을 수행하는 방식을 고려할 수 있으며, 본 논문에서는 후자의 방식을 택하였다.

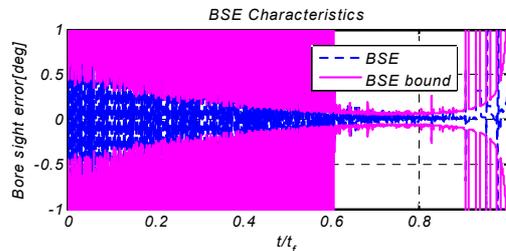


Fig. 7. BSE characteristics

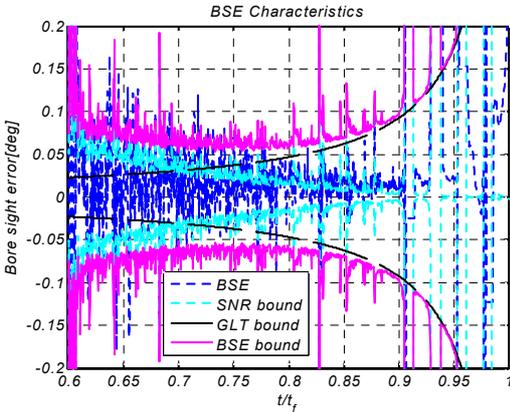


Fig. 8. BSE covariance management

3.2 공정잡음 공분산

실제 측정치가 있는 측정잡음의 경우, 최악의 경우 실측치의 통계적 특성을 사용하는 방법을 사용할 수도 있지만, 공정잡음(Process noise)의 경우 그러한 접근법이 불가능하다. 하지만 측정치가 필터 계산주기에 비해 간헐적으로 주어지는 경우 공정잡음이 필터링 결과에 미치는 영향은 매우 크다. 식(1)-(2)에서 보이는 것과 같이 상태 변수는 시선각 오차, 시선각 변화율, 표적 가속도이다. 따라서 이 각각의 상태변수에 대한 특성이 반영되어야 한다. 이때 시선각 오차나 시선각 변화율의 공분산은 탐색기의 하드웨어적 특성에 의해 결정될 수 있다. 한편 공정 공분산이 추정 특성에 미치는 영향을 해석적으로 파악하기 위해 연속 칼만필터 오차공분산식 및 칼만이득을 고려하자.

$$\dot{P} = AP + PA^T + GQG^T - KRK^T \quad (8)$$

$$K = PH^TR^{-1} \quad (9)$$

여기서 $P = P^T = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ p_2 & p_4 & p_5 \\ p_3 & p_5 & p_6 \end{bmatrix}$ 이며 G 는 단위행렬이다.

$Q = \text{diag}[\sigma_\epsilon, \sigma_\lambda, \sigma_T]$, $R = \sigma_m$ 로 정의하고 식(8)을 전개하면 다음과 같다.

$$\dot{p}_1 = 2p_2 + k_1^2\sigma_m + \sigma_\epsilon \quad (10)$$

$$\dot{p}_2 = -2\frac{\dot{R}}{R}p_2 - \frac{1}{R}p_3 + p_4 + k_1k_2\sigma_m \quad (11)$$

$$\dot{p}_3 = a_x p_2 + p_5 + k_1k_3\sigma_m \quad (12)$$

$$\dot{p}_4 = -4\frac{\dot{R}}{R}p_4 - \frac{2}{R}p_5 + k_2^2\sigma_m + \sigma_\lambda \quad (13)$$

$$\dot{p}_5 = a_x p_4 - 2\frac{\dot{R}}{R}p_5 - \frac{1}{R}p_6 + k_2k_3\sigma_m \quad (14)$$

$$\dot{p}_6 = 2a_x p_5 + k_3^2\sigma_m + \sigma_T \quad (15)$$

측정치로 시선각오차만을 고려하고 있으므로, 시선각 변화율 추정에 영향을 주는 칼만이득과 관련된 오차공분산인 p_2 만을 고려하자. p_2 의 특성은 식(11)에 의해 결정된다. 유도탄이 표적에 접근하는 경우 $R \rightarrow 0$ 이므로 식(11)의 두 번째 항이 p_2 에 가장 큰 영향을 줄 것이라 판단할 수 있다. 한편 식(12)에서 p_3 는 p_5 에 의해 특성이 결정될 것이며, p_5 는 식(14)에 의하면 p_6 의 영향이 가장 크게 받음을 알 수 있다. 이때 식(15)를 살펴보면 p_6 는 결국 σ_T 즉 표적가속도 공정 공분산에 의해 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 즉 유도탄이 표적에 접근함에 따라 표적가속도 공정 공분산이 p_2 에 큰 영향을 주고 이는 시선각 변화율에 큰 영향을 준다. 따라서 적절한 표적 공분산 관리가 시선각 변화율 추정의 주된 요인임을 알 수 있다.

3.3 추정 안정도 검토

이번 절에서는 호밍필터에 측정치가 들어오지 않는 경우, 필터의 안정성을 검토한다. 식(3)의 시스템 행렬에서 계산의 편의를 위해 시선축에서 바라본 표적 x축 가속도를 0으로 설정하자. 한편 측정치가 들어오지 않는 경우 탐색기의 정보는 무의미하므로 입력은 0으로 설정한다. 따라서 시스템 방정식과 상태 추정식은 다음과 같이 변형된다.

$$\dot{x} = Ax + 0 + Gw \quad (16)$$

$$\hat{x} = A\hat{x} + K[0 - H\hat{x}] \quad (17)$$

이 경우 식(16)의 가관측 행렬은 다음과 같다.

$$R(O) = \text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & a & -b \end{bmatrix} = 3: \text{Full rank} \quad (18)$$

여기서 $a = -2\frac{\dot{R}}{R}$, $b = \frac{1}{R}$ 는 항상 양수이며 시변 변수이다. 이러한 시변 변수에 대해 선형해석을 하는 것은 일반적으로 맞지 않는 해석이지만, 시간에 따른 시스템의 변화가 크지 않은 경우라 가정하면, 고유치에 의한 선형해석이 의미가 없는 것은 아니다. 식(18)의 결과를 보면 상태변수 추정에는 무리가 없음을 알 수 있다. 식(16)의 고유

치는 다음과 같다.

$$\det(sI - A) = \det \begin{bmatrix} s & -1 & 0 \\ 0 & s-a & b \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} = s^2(s-a) = 0 \quad (19)$$

식(19)와 같은 고유치를 갖는 경우 상태변수는 다음과 같은 해석해를 갖는다.

$$x = \exp\left(-\frac{2\dot{R}}{R}t\right)x_0 \quad (20)$$

따라서 이 경우 상태변수는 발산함을 알 수 있고 $-2\dot{R}=R$ 인 상태에서 1초가 경과하면 상태변수는 약 2.7배 발산하는 것으로 생각할 수 있다.

한편 1초 경과 시 상태변수의 발산의 정도를 파악하기 위해 거리와 속도에 따른 $-2\dot{R}/R$ 의 값을 살펴보자. Fig. 9를 살펴보면 거리 2km 이상에서는 속도가 빠른 경우라 하더라도 $-2\dot{R}/R$ 값이 2이하의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 $-2\dot{R}/R$ 이 1보다 작은 경우는 1초간 발산한다 하더라도 최초 초기치 대비 2.7배 발산할 것임을 예측할 수 있다. 따라서 1초간 탐색기 측정치 없이 예측만 수행하는 경우 초기상태 변수 대비 2.7배로 증가된 상태를 추정할 것임을 알 수 있다.

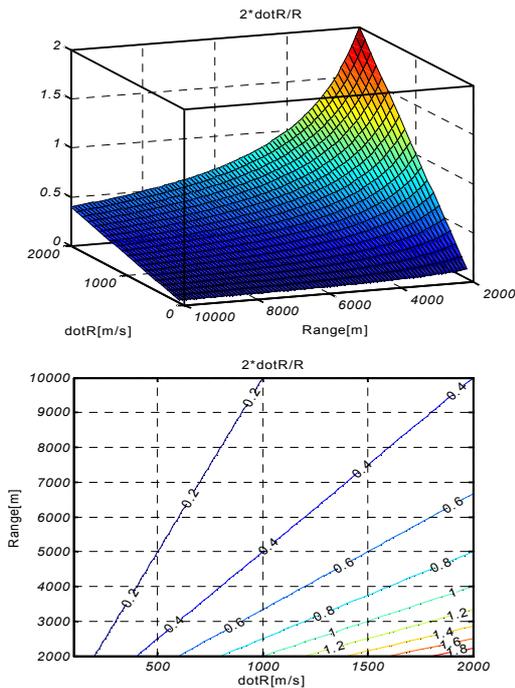


Fig. 9. Divergency factor w.r.t distance and velocity

한편 만일 이러한 정도를 시스템에서 감내할 수 있다면 이는 필터 안정성의 기준이 될 수 있다. 즉 측정치 없이 필터가 신호가 기준 신호대비 2.7배로 한정되는 영역은 $-2\dot{R}/R < 1$ 이다. 이를 다시 정리하면 $2 < R/(-\dot{R})$ 이 되고, 이는 상대거리 대 상대속도가 2배 이상인 경우를 뜻한다. R은 R_{go} 이므로 이를 호밍시간으로 변환하면 2초에 해당하는 시간이다. 즉 t_{go} 기준으로 2초 이상의 영역에서는 1초간 탐색기의 측정치가 없는 경우라도, 초기 추정치 대비 2.7배 이상으로 추정하지는 않을 것이라 판단 할 수 있다.

III. 수치 시뮬레이션

제안한 호밍필터의 성능을 파악하기 위해 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 필터의 성능을 확인하기 위해 각 상태변수의 추정에 관련된 결과를 Fig. 10 ~ 13에 도시하였다.

Figure 10에는 시선각오차의 측정치 대 추정치를 도시하였다. 실선은 시선각오차의 측정치를, 점선은 추정치를 도시한다. 측정치의 경우 RF탐색기의 특성상 고주파 성분이 있음을 알 수 있으며, 신호의 진폭도 매우 크다. 반면 추정한 시선각오차는 상대적으로 그 값도 작으며 또한 부드럽게 생성되었음을 알 수 있다. Ranging 영역과 조우 직전 탐색기 일식에 의해 시선각오차가 크게 출렁이는 것을 살펴볼 수 있다. 이렇듯 측정신호가 양호하지 않은 구간에서는 SNR도 낮으므로, 측정공분산은 매우 큰 값을 갖게 되며, 이 경우 상태변수 추정에 있어 탐색기 측정치에 대한 의존도가 낮아지게 된다. 이러한 칼만필터의 기본특성에 의해 시선각오차는 잘 추정됨을 알 수 있다. 또한 조우 직전에는 Eclipse 및 글린트 효과가 반영되어 상태 추정치와 측정치에 차이가 발생함을 알 수 있다.

Figure 11에는 시선각속도 변화율의 참값(true, 점선) 및 칼만필터를 이용한 추정치(KF, 실선) 및

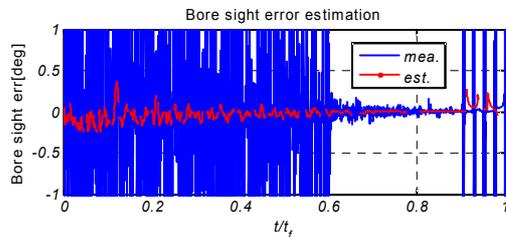


Fig. 10. BSE measurement vs. estimation

저역통과필터(LF, 일점쇄선)를 이용한 추정치를 보이고 있다. 유도기법의 특성상 시스템이 발산하는 조우 직전을 제외하고 제안된 호밍필터는 일반적인 저역통과필터 보다는 참값을 비교적 잘 추정하는 것으로 판단된다. 탐색기 일식이 발생한 상대시간 0.9초 부근에서도 호밍필터는 참값을 잘 추종함을 알 수 있다. 이는 측정치에 대한 의존도를 낮추고 propagation에 의한 추정의 결과로 Fig. 10에서 보이는 0.9초 부근의 일식에 의해 탐색기의 측정 신호가 불안정한 경우에도 상대변수 추정에는 큰 영향을 주지 않음을 확인하는 결과이다.

Figure 12에는 시선각속도 변화율 추정오차를 보이고 있다. 조우 직전 발산 구간을 제외하면, 최대 약 $0.1^\circ/s$ 의 추정오차를 가짐을 알 수 있다. 제안된 호밍필터의 성능을 평가하기 위해 200회의 Monte-carlo 시뮬레이션을 수행하여 추정오차의 통계적 특성을 살펴보았으며, 이의 결과를 표 1에 정리하였다. 제안된 호밍필터의 성능이 2차 필터에 비해 월등히 좋음을 확인 할 수 있다.

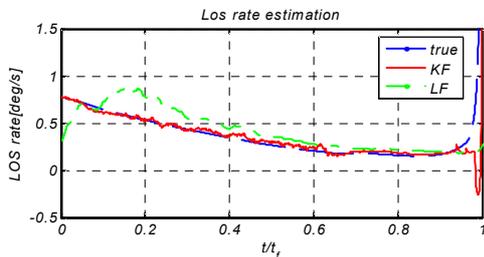


Fig. 11. LOS rate estimation

Table 1. Performance of LOS rate estimation

	2차 필터	호밍필터
오차 평균	0.0182	0.0068
오차 분산	0.2476	0.0317

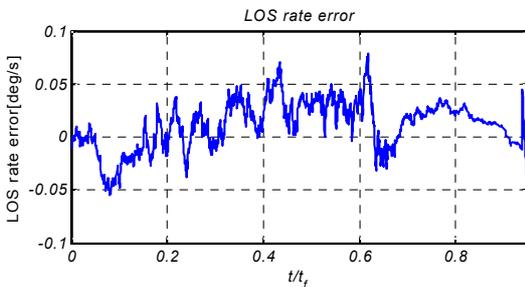


Fig. 12. LOS rate estimation error

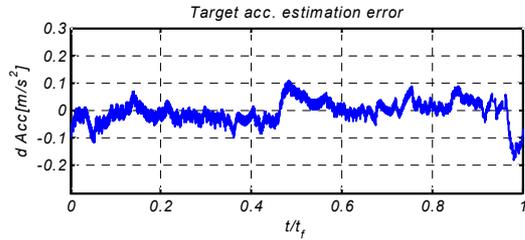


Fig. 13. Acceleration estimation error

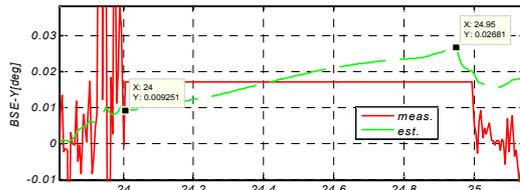


Fig. 14. Propagation example

Figure 13에서는 상대가속도 추정오차를 나타내었다. 상대가속도 역시 참값과의 큰 오차 없이 참값을 비교적 잘 추정하고 있다.

한편 Fig. 14에는 측정치가 없는 경우 필터의 안정성을 살펴보았다. 24초부터 25초까지 탐색기의 신호를 강제로 제거하고 필터가 propagation만을 수행하도록 하였다. 실선은 탐색기의 측정값을 의미하며 점선은 필터의 추정치이다. 표적과의 조우는 26초에 근방인 경우이다. 25초의 추정치는 0.0095도이며 26초의 추정치는 0.026도로 약 2.7배 증가하였음을 확인 할 수 있다. 탐색기 신호 유실이 비교적 조우직전이며, 6자유도 비선형 시뮬레이션임에도 불구하고 앞서 예측한 정도로 발산함을 확인 할 수 있다.

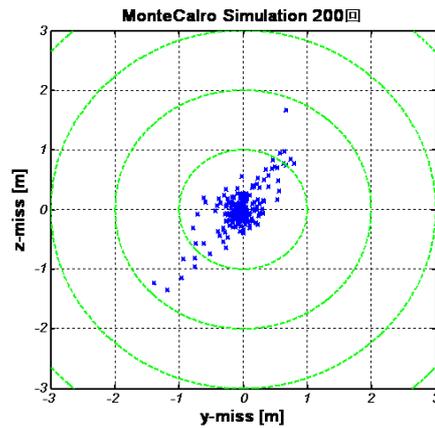


Fig. 15. Monte-carlo simulation result

Figure 15에는 제안된 필터의 통계적 특성을 확인하기 위해 몬테칼로(Monte-carlo) 시뮬레이션을 수행한 결과를 보이고 있다. 비행환경에 영향을 줄 수 있는 다양한 인자에 잡음을 포함하여 200회의 수치 시뮬레이션을 수행한 결과 유도오차의 분산은 약 1m 이내에 존재하고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

칼만필터를 이용한 호밍필터 설계를 수행하였다. 시선각 변화율 추정을 위해 탐색기 신호대 잡음비 특성을 이용하여 공분산 관리를 수행하였으며, 탐색기의 기계적 특성 및 표적 기동 특성을 고려한 영향도 동시에 고려하였다. 수치 시뮬레이션을 통해 추정된 시선각 변화율은 참값을 비교적 잘 추정하는 것을 살펴보았으며, 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 제안된 필터의 통계적 특성을 검토하였다.

참고문헌

1) Uhrmeister, B. "Kalman Filters for a Missile with Radar and/or Imaging Sensor," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 17, No. 6, 1994, pp.1339~1344.
 2) Waldmann, J. "Line-of-Sight Rate Estimation and Linearizing Control of an Imaging Seeker in a Tactical Missile Guided by Proportional Navigation," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.10, No.4, 2002, pp.556~567.

3) 정상근, 김을곤, "Bank-to-Turn 유도탄의 호밍 유도를 위한 2축 김발형 탐색기 동체운동 상관 보상," *한국항공우주학회지*, Vol. 30, No. 6, 2002, pp.101~106.

4) 오승민, "스트랩다운 탐색기를 장착한 전술 유도탄의 UKF 기반 종말호밍 유도," *한국항공우주학회지*, Vol. 38, No. 3, 2010, pp.221~227

5) Bhattacharyya, A.K., Bhattacharya, S., and Mukhopadhyay, S, "Modeling of RF Seeker Dynamics and Noise Characteristics for Estimator Design in Homing Guidance Application," *IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems*, 2008., Kharagpur, Dec. 2008, pp.1~7.

6) Ekstrand B., "Tracking Filters and Models for Seeker Application," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 37, No. 3, 2001, pp.965~977.

7) 문관영, 전병을, 이재웅, "RF 탐색기 호밍필터 공분산 및 신호 관리기법," *한국항공우주학회 추계 학술발표회*, 제주, 2011, pp.623~626.

8) Zarchan P., *Tactical and Startegic Missile Guidance*, 4th edition, AIAA, Inc., Reston, Virginia, USA, 2007.

9) Brown R.G and Hwang P. Y.C., *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, 3rd edition, John Wiley & Sons Inc., New York, USA, 1997.

10) Gelb A., *Applied Optimal Estimation*, The MIT press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1974.

11) Huges, E., *Guided Weapon Seekers*, Cranfield Univ., UK, 2007.