

표적 Glint의 효과적인 필터링에 의한 CLOS 유도성능 개선

CLOS Guidance Performance Improvement with Effective Glint Filtering

신상진, 송택렬

(Sang Jin Shin and Taek Lyul Song)

Abstract : In this paper, an effective filter structure for filtering of target glint in tracking radar systems is used to improve the performance of CLOS(Command to Line-Of-Sight) guidance. The filter decouples range and angle channels so that it has a sound mathematical basis as well as computation efficiency as applied to the IMM algorithm. The effective filter structure in conjunction with CLOS guidance is tested by a series of simulation runs and it is shown to have superior performance compared with the other filter structures.

Keywords : CLOS guidance, glint filtering, IMM

I. 서론

레이다나 능동형 전파탐색기는 표적의 표면에 전파가 조사되는 각도에 따라 표적에서 반사되어 수신안테나로 들어오는 신호의 잡음의 강도가 달라지는데 이러한 형태의 잡음을 *glint* 노이즈라 하며 원거리의 작은 표적의 경우에는 표적추적 시스템을 이용하여 유도 명령을 산출하는 유도 시스템에 미치는 영향이 적지만 근거리의 큰 표적의 경우에는 큰 영향을 미친다.

Glint 노이즈의 확률적 분석을 다루고 *glint* 노이즈 환경 하에서 필터링 알고리즘을 연구한 문헌으로는 대표적으로 [1]과 [2]를 들 수 있다. [1]에서 *glint* 노이즈를 outlier로 큰 공분산을 가지는 Laplacian 노이즈로 보고 Gaussian과 Laplacian의 합으로 모델링하였다. Gaussian 분포를 하지 않는 *glint* 노이즈를 필터링하는데 칼만 필터를 사용하면 필터의 성능이 저하되며 이러한 경우를 위해 minimum variance를 얻기 위해 score function을 사용하는 Masreliez filter를 사용하여 표적의 상태변수를 추정하는 방법을 제안하였다.

[2]에서는 IMM(Interacting Multiple Model)[3]을 사용하여 *glint* 노이즈에 대처하는 필터링 기법을 제안하였다. 여기에서는 레이다 측정치의 공분산 크기를 달리 가정하는 두 개의 Extended Kalman filter(EKF)를 기본 필터로 사용하여 mode probability를 산출하기 위한 확률밀도함수의 계산에서 Gaussian process인 표적위치변수와 *glint* 노이즈의 합으로 구성된 의사측정치를 구성해서 사용하였다. 그러나 이같은 방식은 직교좌표계에서 표적상태변수가 정의되고 레이다의

측정치가 비선형이 되므로 인해 비선형 측정치를 선형화하기 위한 의사측정치를 사용할 때 형성되는 측정잡음은 상태변수의 함수인 state dependent 노이즈로서 bias와 측정치간에 상관관계가 존재하게 된다[4]. [5]에서는 *glint* 노이즈의 필터링에 따른 기존 방식의 문제점을 해결하기 위해 EKF를 IMM의 기본 필터로 사용하지 않고 [6]의 채널분리형 필터를 개조하여 사용하였다. 이 필터는 시스템의 상태변수를 직교좌표계에서 정의하지 않고 원래의 레이다 측정치가 나타나는 극좌표계에서 정의한다. 표적의 거리와 각도를 표현하는 동력학이 서로 coupled되어 있으나 coupling을 일으키는 항들을 분리된 채널에서의 상태변수 추정치들로 대체하여 마치 선형시변시스템으로 시스템을 모델링하는 것과 같다.

본 논문에서는 [5]에서 제안한 필터를 사용하여 *glint* 노이즈가 시선지령유도 (CLOS;Command to Line-Of-Sight)성능에 미치는 악영향을 개선하는 효과를 얻고자 한다. 시선지령유도 방식으로 유도하는 지대공 유도탄의 경우에는 지상의 레이다에 의해 추적되는 표적의 각도정보가 *glint* 노이즈에 의해 높은 주파수로 진동하게 된다. 이러한 각도 정보의 큰 진동폭은 CLOS방식의 유도명령에서 유도탄의 비행거리가 각도정보에 곱해지게 되므로 표적과 유도탄의 거리가 가까워질수록 *glint* 노이즈에 의한 유도명령의 진동폭이 커지게 되고 유도명령을 받은 유도탄의 구동장치가 명령에 반응하게 되어 구동장치의 원동력인 전력이나 공압, 유압 장치의 자원을 크게 소모하게 된다. 또한 조종날개의 진동운동에 따라 공기 저항력이 증가하여 유도탄의 전체적인 성능을 저하시키는 원인이 될 수 있다.

본 논문에서는 CLOS 유도방식과 [5]의 필터구조를 설명하고 [5]의 필터 알고리즘을 CLOS 유도방식과 feedback 루우프로 결합하여 시뮬레이션을 수행함으로써 유도에너지 및 miss distance 면에서 기존의 다른 필터의 결과와 비교한다.

접수일자 : 2001. 1. 15, 수정완료 : 2001. 4. 9.

신상진, 송택렬 : 한양대학교 제어계측공학과(sumin@ihanyang.ac.kr/ tsong@hanyang.ac.kr)

* 본 논문은 서울대학교 자동제어특화연구센터와 한양대학교 2000년 교내 연구비 지원으로 연구되었습니다.

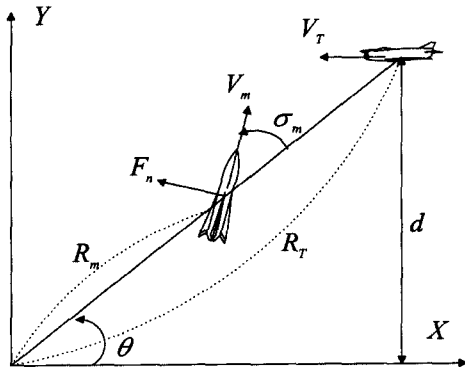


그림 1. 유도탄-표적의 요격상황.
Fig. 1. Missile-target engagement.

II. CLOS 유도

유도탄과 표적의 기하학적 요격상황을 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서 표적은 V_T 의 속력으로 직선운동을 하고 feedforward 명령[7]은 유도탄이 지상추적시스템의 LOS(line-of-sight)위에 위치한다는 초기 가정하에서 LOS 운동변화에 대처하여 항상 LOS 위에 위치하기 위한 가속도로써 계산된다. 유도탄이 지상추적장치의 LOS 선상 근방에 위치하여 지상레이더의 유도지시를 받게되면 유도탄이 LOS 위에 정확히 존재하지 않음으로 해서 생긴 각도보상명령은 feedforward 명령보다 상대적으로 작은 값을 갖게 된다. 그림 1에 나타난 CLOS 유도방식의 kinematics로부터 feedforward 명령은 다음과 같이 계산된다.

$$F_n = 2 V_m \dot{\theta} + \frac{R_m \ddot{\theta}}{\cos \sigma_m} - V_m \tan \sigma_m \quad (1)$$

여기서 σ_m 은 지상추적시스템의 LOS에 대한 유도탄 heading angle이다. LOS의 각속도 $\dot{\theta}$ 와 각가속도 $\ddot{\theta}$ 은 표적의 위치와 속도에 관계하며 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{\theta} = \frac{V_T \sin^2 \theta}{d} \quad (2)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{2 V_T^2 \sin^3 \theta \cos \theta}{d^2} \quad (3)$$

그림 2는 CLOS 유도방식을 블록다이어그램으로 나타낸 것이고 본 논문에서 사용된 각 블록의 전달함수는 다음과 같다.

- ① 노이즈 필터 : $R_m \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
- ② Lead-lag compensator : $\frac{(b_1 s + 1)(b_2 s + 1)(b_3 s + 1)}{(a_1 s + 1)(a_2 s + 1)(a_3 s + 1)}$
- ③ PID 제어기 : $K_p + K_d s + K_i \frac{1}{s}$

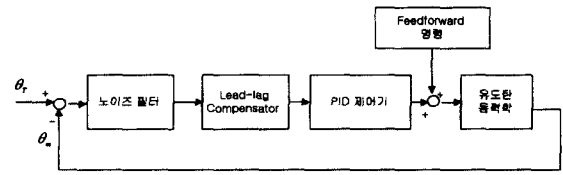


그림 2. CLOS 유도루우프.
Fig. 2. CLOS guidance loop.

④ 유도탄 동력학 : $\frac{1}{R_m s^2}$

⑤ 오토파일럿 동력학 : $\frac{1}{\tau s + 1}$

그림 2에서 노이즈 필터는 기준에 2차의 전달함수를 갖는 static 필터를 사용하여 표적의 glint 노이즈와 레이더의 열잡음으로 생기는 불필요한 유도명령을 제거하는 역할을 한다. 본 논문에서는 이러한 static 필터를 사용하지 않고 [5]에서 제안한 필터를 사용하여 CLOS 유도성능을 향상시키고자 한다. 오토파일럿 동력학은 1차의 전달함수를 갖는다고 가정하고 lead-lag compensator를 이용하여 유도루우프의 안정도를 확보한다.

III. 필터 구조

본 논문에서는 glint 노이즈의 수학적 모델링과 필터구조를 [5]와 같이 사용한다. [5]에서는 표적의 가속도 모델로 거리와 각도 채널에 각각 Singer model[8]을 사용하였다. [5]에서 사용된 채널 분리형 필터는 [2]의 EKF가 직교좌표계를 사용하는데 반해 극좌표계를 사용하여 표적의 거리와 각도 그리고 이들의 시간 변화율들이 상태변수가 된다. 이러한 상태변수를 사용할 경우에도 시스템 동력학은 비선형이 되지만 채널별로 상태변수를 분리하여 두 개의 시스템 방정식을 세웠을 경우에 거리 채널의 경우에는 각도 채널의 필터 출력인 상태변수 추정치를 사용하여 시스템 행렬을 구성하고 각도 채널에서는 거리 채널의 상태변수 추정치를 사용하여 시스템 행렬을 구성함으로써 마치 선형 시변 시스템으로 모델링하는 것이 된다. 이 시스템의 추정치는 거리와 각도로써 분리된 채널의 상태변수의 선형함수가 되어서 각 채널의 추정잡음은 자연스럽게 확률적으로 독립이다. 이 시스템의 동력학 모델을 채널별로 (4)에서 (6)까지 정리하였다.

① 거리 채널

$$x_R = (R, \dot{R}, A_{T_k})^T \quad (4)$$

$$\dot{x}_R = A_R x_R + D w_R$$

$$A_R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \hat{\theta}^2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \quad (5)$$

② 각도 채널

$$\begin{aligned}
 x_\theta &= (\theta, \dot{\theta}, A_{T_r})^T \\
 \dot{x}_\theta &= A_\theta x_\theta + D w_\theta \\
 A_\theta &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2\frac{\hat{R}}{R} & \frac{1}{R} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6}$$

(4)의 w_R 은 공정잡음으로서 평균이 0이며 power spectral density는 $q = 2\tau \sigma_{A_T}^2$ 이 되며, 여기서 τ 는 표적 가속도의 correlation time constant이고 $\sigma_{A_T}^2$ 은 예상되는 표적기동의 분산이다. (6)의 w_θ 는 w_R 과 마찬가지로 평균이 0이고, 거리채널과 같은 power spectral density를 가진다.

시스템의 측정방정식은 잡음이 섞인 거리와 각도 정보로서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 z_R &= H x_R + v_R \\
 z_\theta &= H x_\theta + v_\theta
 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $H = (1 \ 0 \ 0)$ 이고 v_R 과 v_θ 는 시선거리와 시선각의 측정잡음이다.

제안하는 필터는 (4)에서 (7)까지 기술되는 선형 시변 시스템에 적용하는 칼만 필터의 구조를 가지며 IMM 알고리즘을 사용하기 위해 [2]과 같이 두 개의 필터를 사용한다. 각각의 필터는 거리와 각도 채널별로 상태변수가 3개로서 3×3 행렬의 공분산을 계산하게 되지만 채널의 분리가 불가능한 [2]의 필터는 9×9 행렬의 공분산 계산을 하게 되어 제안하는 필터의 계산량과 기억용량이 적다. 첫 번째 필터는 측정잡음이 Gaussian 확률분포의 특성을 갖는다는 mode 1의 가정을 사용하고 두 번째 필터는 측정잡음이 Laplacian 확률분포를 갖는다는 mode 2의 가정을 사용한다. 각 mode가 맞을 확률의 계산에 필요한 predicted measurement의 조건확률밀도함수는 참고문헌 [5]에서 수록되어 있다.

IV. 시뮬레이션

Glint 노이즈에 대처하기 위해 [5]의 필터링 기법을 CLOS 유도방식에 적용하는 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하고자 한다. CLOS 유도명령은 추적장치와 표적이 이루는 시선방향 위에 유도탄이 위치되도록 하기 위해 표적의 kinematics로부터 계산된 feedforward 명령과 이때 생기는 오차를 보상하기 위한 feedback 명령의 합으로써 제안하는 채널 분리형의 필터를 사용하여 필요한 상태변수의 추정치를 구한다.

시뮬레이션에 사용된 표적의 초기위치는 관성좌표계에서 (12000m, 4000m)이고 비행 경로각이 180° , 속도는 351 (m/sec)으로써 등속운동을 한다고 가정하였다. 추적장치는 관성좌표계에서 (0m, 0m)에 고정되어 있고 유도탄의 초기위치는 (10m, 0m)에서 자세각 23° 로 발사된다고 하였다. 필터에 사용된 추정치의 초기값은 시선거리에 실제값과 4(m)의 위치오차와 0.1(m/sec)의 속도오차를 두고

시선각에는 실제값과 4(mrad)의 각도 오차와 0.3(mrad/sec)의 각속도 오차를 두었으며 가속도는 모두 '0'으로 두었다. 필터의 동력학 모델에 사용되는 표적 가속도의 correlation time constant는 5(sec)으로 하였으며, $\sigma_{A_T} = 1 (m/s^2)$ 으로 하였다. 또한 IMM 알고리즘에 필요한 mode별 확률의 초기치는 거리와 각도 채널에 공히 mode 1은 0.8, mode 2는 0.2를 사용했고 mode의 천이확률은 다음의 값으로 정한다.

$$\{\pi_{ij}\} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.8 & 0.2 \end{bmatrix} \tag{8}$$

여기서 π_{ij} 는 $k-1$ 시간의 mode i 가 k 시간에는 mode j 로 변하는 확률을 뜻한다. 또한 mode 1의 측정잡음의 표준편차로는 시선거리와 시선각에 대해 각각 $\sigma_{R_s} = 1(m)$, $\sigma_{\theta_s} = 0.25(mrad)$ 을 사용하며 mode 2의 측정잡음의 σ_{R_s} 과 σ_{θ_s} 은 mode 1의 측정잡음의 표준편차보다 5배로 하였으며 Laplacian 노이즈의 발생확률을 0.2로 하였다.

그림 3는 2차 노이즈 필터를 이용하여 계산된 유도명령으로써 glint 노이즈의 영향으로 유도명령이 큰 값으로 나타나는 반면에 그림 4의 경우는 채널 분리형 필터를 사용한 유도명령으로 glint 노이즈 영향이 상당히 줄어들어 유도탄 기동에 불필요한 유도명령을 크게 없앨 수 있음을 보여주고 있다. 그림 5과 그림 6은 유도명령의 제곱의 값을 시간에 대해 적분한 값으로 유도명령에 의해 소실되는 구동에너지를 나타낸다. 2차 노이즈 필터를 사용한 경우인 그림 5에 비하여 채널 분리형 필터를 사용한 그림 6의 결과가 에너지 효율 면에서 우월함을 알 수가 있다. 이러한 결과는 모터나 공압장치를 사용하는 구동장치의 전력소모나 가스소모를 상당량 줄일 수 있으며 결과적으로 유도탄의 유효사거리를 늘어나게 할 것으로 예상된다. 2차 노이즈 필터의 BW(band width)를 줄임으로써 그림 4와 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 추론할 수 있으나 이와 같이 할 경우에는 유도루우프의 안정도가 크게 떨어지게 된다. 그림 7과 그림 8는 [2]에서 제안한 EKF를 사용하여 시뮬레이션 한 결과로써 채널 분리형 필터의 결과와 비슷한 성능을 얻을 수 있었다. 그러나 EKF 필터구조에 비해 채널 분리형 필터구조는 상태변수 추정치를 구하기 위한 계산량이 적을 뿐 아니라 IMM알고리즘에 적용할 때 mode 확률의 계산이 간단하고 이론의 전개에 무리가 없다[5]. Laplacian 노이즈 발생확률이 0.2일 때 30번의 Monte-Carlo 시뮬레이션 한 결과로써 기존의 2차 노이즈를 사용한 경우는 miss distacne의 평균이 3.45(m)이고 분산이 $15.21(m^2)$ 으로 크게 나타난 반면에 채널 분리형 필터를 사용한 경우는 평균이 0.86(m)이고 분산이 $0.16(m^2)$ 으로 나타났으며 [2]에서 제안한 EKF를 사용한 경우에는 평균이 0.88(m), 분산이 $0.12(m^2)$ 으로 나타내서 glint 노이즈가 존재하는 경우 IMM 구조를 사용하여 필터링을 할 경우는 추정치의 정밀도가 우수하며 유도오차를 상당히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 표 1에서 표 3까지는 Laplacian 노이즈 발생확률

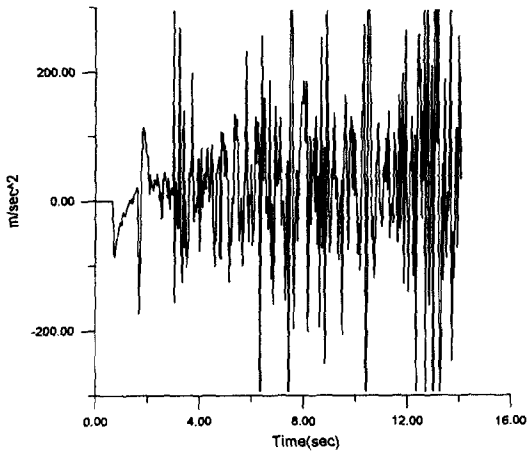


그림 3. 유도명령(2차 노이즈 필터).
Fig. 3. Guidance command(2nd-order noise filter).

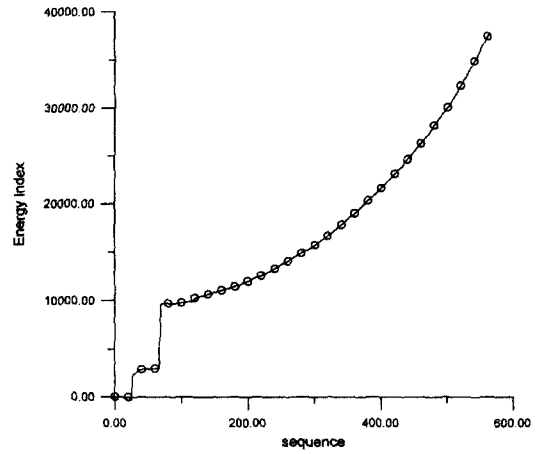


그림 6. 유도명령 제곱의 합(채널 분리형 필터).
Fig. 6. Square sum of guidance command (proposed filter).

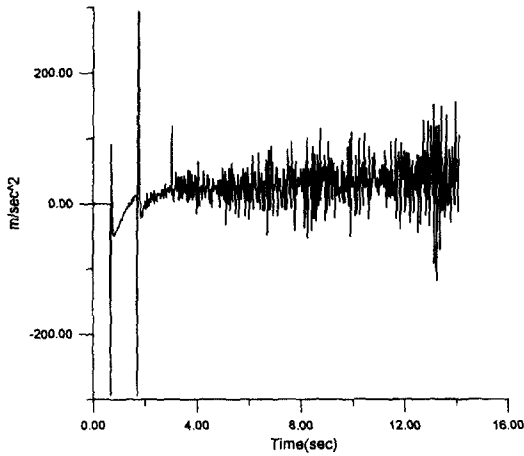


그림 4. 유도명령(채널 분리형 필터).
Fig. 4. Guidance command(proposed filter).

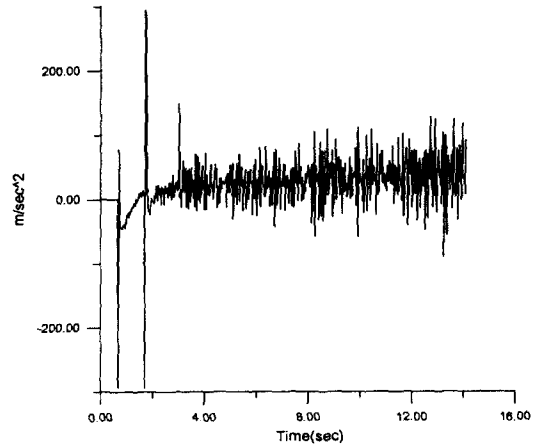


그림 7. 유도명령(Daeipour 필터).
Fig. 7. Guidance command(Daeipour filter).

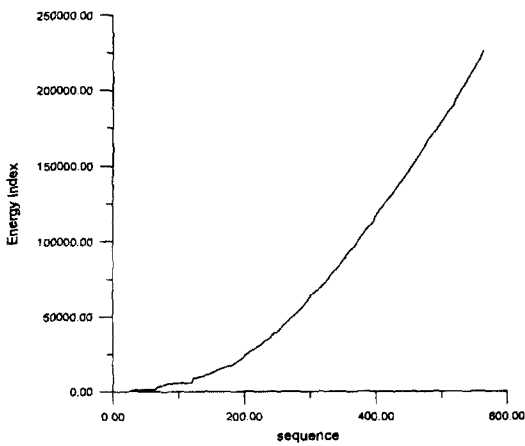


그림 5. 유도명령 제곱의 합(2차 노이즈 필터).
Fig. 5. Square sum of guidance command (2nd-order filter).

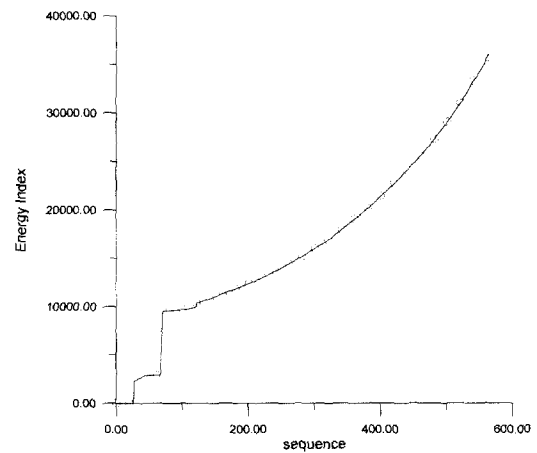


그림 8. 유도명령 제곱의 합(Daeipour 필터).
Fig. 8. Square sum of guidance command (Daeipour filter).

을 0에서 0.2까지 변화시키면서 30번의 Monte-Carlo 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. Laplacian 노이즈 존재확률이

0일 때 2차 노이즈 필터를 사용한 경우의 miss distance는 IMM 구조를 사용한 필터의 miss distance와 비슷하게 나타

표 1. 유도오차(2차 노이즈 필터).
Table 1. Miss distance(2nd-noise filter).

Laplacian 노이즈 발생확률	miss distance	
	평균(m)	분산(m ²)
0	0.61	0.07
0.05	1.20	0.77
0.1	1.66	0.77
0.15	2.23	1.60
0.2	3.45	15.21

표 2. 유도오차(채널 분리형 필터).
Table 2. Miss distance(proposed filter).

Laplacian 노이즈 발생확률	miss distance	
	평균(m)	분산(m ²)
0	0.72	0.06
0.05	0.80	0.06
0.1	0.79	0.13
0.15	0.69	0.07
0.2	0.86	0.16

표 3. 유도오차(Daeipour 필터).
Table 3. Miss distance(Daeipour filter).

Laplacian 노이즈 발생확률	miss distance	
	평균(m)	분산(m ²)
0	0.76	0.06
0.05	0.79	0.04
0.1	0.83	0.10
0.15	0.73	0.08
0.2	0.88	0.12

나지만 존재확률이 커짐에 따라 miss distance도 커짐을 볼 수 있다. 반면 IMM 구조의 필터는 Laplacian 노이즈 존재 확률이 커지더라도 miss distance에 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

V. 결론

본 논문에서는 표적 glint 노이즈에 효과적인 필터링 방

식을 사용하여 CLOS 유도성능을 개선하였다. CLOS 유도 방식의 가속도명령 계산에는 각도 오차에 유도탄과 지상추적시스템 사이의 거리가 곱해지므로 glint 노이즈로 인해 지상추적시스템에 인가되는 각도오차가 유도명령의 진동폭을 크게 만듦으로 이를 glint 노이즈에 효과적인 필터를 사용하여 유도명령의 진동폭을 상당량 줄일 수 있었다. 이는 실제 요격상황에서 유도탄에 불필요한 유도에너지를 줄임으로써 유도탄 기동에 소모되는 공압이나 유압, 전기의 소비를 절감하여 유도탄 사거리를 연장시킬 수 있는 효과가 있을뿐 아니라 조종날개의 진동에 의한 공기 저항력을 줄임으로써 체계성능을 향상시킬 수 있다. Glint 노이즈에 효과적인 필터를 CLOS 유도방식에 적용시켜서 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 유도탄의 기동에 필요한 에너지와 miss distance를 계산한 결과를 보면 IMM알고리즘을 사용한 CLOS 유도방식이 성능이 우수함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] W. Wu, "Target tracking with glint noise," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, vol. 29, no. 1, Jan. 1993.
- [2] E. Daeipour and Y. Bar-Shalom, "An interacting multiple model approach for target tracking with glint noise," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, vol. 31, no. 2, Apr., 1995.
- [3] H. Blom, and Y. Bar-Shalom, "The interacting multiple model algorithm for systems with markovian switching coefficients," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 33, no. 8, Aug., 1988.
- [4] D. Lerro and Y. Bar-Shalom, "Tracking with debiased consistent converted measurements versus EKF," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, vol. 29, no. 3, Jul., 1993.
- [5] T. L. Song and D. G. Lee, "Effective filtering of target glint," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, vol. 36, no. 1, pp. 234-240, Jan., 2000.
- [6] J. Pearson, and E. Stear, "Kalman filter applications in airborne radar tracking," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, vol. 10, no. 3, pp. 319-329, May, 1974.
- [7] P. Gamell, *Guided weapon control systems*, Pergamon press, 1980.
- [8] R. A. Singer, "Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 473-483, July, 1970.



신상진

1970년 6월 25일생. 1996년 한양대 제어계측공학과 졸업. 동대학원 석사(1998), 1998년~현재 동대학원 박사 과정. 1998년~현재 한국 레이컴 기술연구소 연구원. 관심분야는 발사체 유도제어 및 표적 추적 필터, 레이더 신호처리 및 운용 알고리즘.



송택렬

1974년 서울대 공학사, 1981년 Univ. of Texas at Austin 항공 우주공학과 석사, 1983년 Univ. of Texas at Austin 항공우주공 학과 박사. 1974년~1995년 국방 과학연구소. 1995년~현재 한양대 제어계측공학과 교수. 관심분야는 유도제어, 항법, 표적상태추정 등.