

Two-color Crossed Array Tracker를 위한 반대응 기법

이석한*, 두경수*, 오정수*, 서동선**, 최중수*

*중앙대학교 첨단영상전문대학원 영상공학과, **명지대학교 전자공학과

Counter-countermeasure for Two-color Crossed Array Tracker

S.H.Lee*, K.S.Doo*, J.S.Oh*, D.S.Seo**, J.S.Choi*

*Department of Image Engineering, Graduate School of Advanced Imaging Science, Multimedia and Film, Chung-Ang Univ., 221 Huksuk-Dong, Dongjak-Ku, Seoul, Korea

**Dept. of Electronic Eng., Myoung-Ji Univ., 449-728, Yongin, Kyonggido, Korea

Tel.: 820-5295, FAX: 814-5404

E-mail: sukhan@candy.ee.cau.ac.kr

요 약

본 논문에서는 4개의 적외선 검출기로 구성된 Crossed Array Tracker를 위한 반대응 기법을 제안한다. 입력 신호로부터 표적 신호만을 추출해 내기 위해서 표적과 섬광탄의 에너지 방사 특성과 대기 투과 특성을 고려하고 2개의 검출 대역을 설정한다. 그리고 두 대역의 입력 신호 비를 이용하여 표적에 의한 신호만을 추출해서 효과적인 표적 추적을 가능하게 한다.

I. 서 론

적외선 탐색기는 일반적으로 유도 미사일의 앞부분에 장착되며, 탐색기의 시계상에 존재하는 표적이 방출하는 적외선 에너지를 이용하여 표적의 상대 위치를 탐지해서 유도 미사일의 표적 추적을 가능하게 하는 장치이다. 본 논문은 적외선 탐색기의 하나인 Crossed Array Tracker (CAT)를 위한 반대응 기법에 관한 논문이다. CAT는 그림 1과 같은 형태의 적외선 검출기 4개가 광학계의 후면에 위치한다. 광학계는 표적의 적외선 영상을 표적의 위치를 중심으로 한 회전 원을 따라 이동시키며 표적에 의한 펄스열을 발생시킨다. 발생하는 펄스의 위치 정보를 이용하여 시계상에 존재하는 표적의 상대 위치를 계산한다 [1].

본 논문에서는 기존에 사용된 표적 검출 대역 이외에 섬광탄을 검출하고 제거하기 위한 대역을 추가하여 두 개의 검출 대역을 사용하는 반대응 기법을 제안한다. 제안된 반대응 기법을 적용한 CAT는 시계 내에 표적과 섬광탄이 동시에 존재하는 경우에도 섬광탄의 영향을 최소화 시키고 효율적인 표적 추적을 가능하게 한다. 제안된 반대응 기법의 성능 평가를 위해 섬광탄과 잡음의 영향이 배제된 이상적인 상황과 잡음과 섬광탄이 고려된 동적인 상황, 그리고 반대응 기법이 적용되지 않은 경우에 대한 추적 성능을 비교 분석한다. 그리고 3차원 좌표계에서 제안된 반대응 기법 3차원 추적 성능을 분석한다.

검출 대역 선정을 위해서 우선 파장별 대기 투과 특성을 고려한 다음 섬광탄과 표적의 파장 대역별 에너지 방사 특성을 고려한다. 일반적으로 표적 신호는 midband (3~5μm) 대역에서 가장 큰 값을 가지며 섬광탄은 최고 온도 (2000K)를 갖고 에너지를 방사할 때 nearband (1.5~1.7μm)대역에서 가장 큰 에너지를 방사한다 따라서 표적 검출 대역으로 midband 대역을 이용하며 섬광탄 검출 대역으로 nearband 대역을 이용한다 [2], [3], [4].

두 수신 대역에서의 검출기 출력 신호를 식 (1)과 같이 가정한다.

$$V_M = \sum_{i=1}^M V_{FM} + V_{TM}, \quad V_N = \sum_{i=1}^N V_{FN} + V_{TN}, \quad (1)$$

여기서 첨자 M 과 N 은 각각 midband 입력과 nearband 입력을 나타내며 F 와 T 는 섬광탄과 표적에 의한 신호를 나타낸다. 그리고 I 는 시계상에 존재하는 섬광탄의 개수이다. 식 (1)의 입력 신호에서 섬광탄에 의한 두 대역의 신호비를 $r_{MN, F}$, 표적에 의한 신호비를 $r_{MN, T}$, 그리고 표적과 섬광탄이 동시에 존재할 때의 신호 비를 $r_{MN, T+F}$ 라고 하면 $r_{MN, F}$, $r_{MN, T}$, $r_{MN, T+F}$ 사이의 관계는 다음과 같다 [2], [3], [4].

$$r_{MN, F} < r_{MN, T+F} < r_{MN, T}, \quad (2)$$

그림 2는 표적 신호 비와 섬광탄 신호 비의 경계값 검출을 위한 입력 신호비의 히스토그램을 보인다. 그림에서 F영역은 섬광탄 신호 비에 의한 영역이며 T영역은 표적 신호 비에 의한 영역이다. T+F로 표시된 영역은 표적 신호와 섬광탄 신호가 겹치는 부분에 의해서 발생하는 영역이다. F영역의 가장 왼쪽에 발생하는 피크는 입력 신호가 존재하지 않는 경우에 의한 값이고 T영역의 가장 오른쪽의 피크는 순수한 표적 신호에 의해서 발생하는 값이다. 따라서 이러한 값들은 경계값 계산 과정에서 고려하지 않는다. F영역과 T+F영역 사이에 존재하는 피크의 최대값이 $r_{MN, F}$ 에 의한 부분이며 이 값을 이용해서 경계값을 다음과 같이

그림 2. 입력 신호 비의 히스토그램

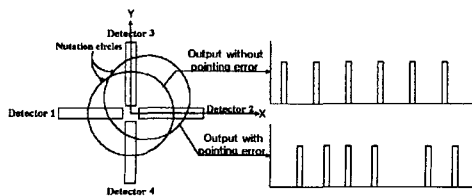


그림 1. 회전원의 중심점 변화에 따른 출력 펄스 변화

II. 적용된 반대응 기법

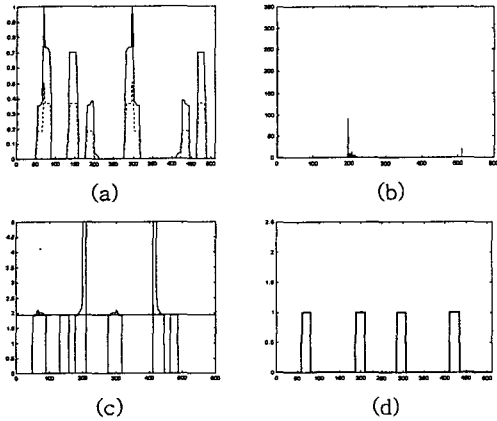


그림 4. (a) 탐색기의 출력 신호 (b) 신호비의 히스토그램 (c) 표적 신호의 비 추출 (d) 표적 펄스

계산한다.

$$j_{TH} = \underset{0 < j < B}{\text{Arg Max}} H(j), \quad (3)$$

$$r_{TH} = (j_{TH}/B) \times \text{Max}(r_{MN}), \quad (4)$$

여기서 r_{MN} 은 입력 신호의 비이며 $H(j)$ 는 r_{MN} 에 대한 히스토그램이고, B 는 히스토그램의 bin 수이다. 계산된 r_{TH} 와 r_{MN} 에 대해서 다음의 조건을 적용하여 표적에 의한 출력 펄스열을 얻는다.

$$V_o = \begin{cases} 1 & r_{MN} > r_{TH} \\ 0 & r_{MN} \leq r_{TH} \end{cases}, \quad (5)$$

그림 3(a)는 탐색기로부터 출력되는 신호이며 그림의 실선 부분이 midband 신호, 점선 부분이 nearband 신호이다. 그림 3(b)는 신호 비의 히스토그램이며 그림 3(c)는 신호 비로부터 표적 신호의 비를 추출하는 과정을 보이고 그림 3(d)는 추출된 표적의 펄스열이다.

III. 표적 추적 곡선의 근사화

잡음의 영향이 고려된 상태에서 표적 추적을 수행할 때 표적의 위치를 잃어버리는 경우가 발생할 수 있다. 이로 인하여 매우 큰 값의 오차가 발생할 수 있기 때문에 표적의 위치를 잃어버리는 경우의 처리 과정이 꼭 필요하다. 즉 이전 10주기의 추적 결과를 이용하여 표적 추적 곡선을 근사화 시키고 근사화 된 값을 표적의 현재 위치로 이용한다. 이를 위하여 탐색기의 표적 추적 곡선을 N 차의 다항식 (6)으로 근사화 시킨다.

$$g(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_Nx^N = \sum_{k=0}^N a_k x^k, \quad (6)$$

이때 실제 추적 좌표값 y_i 와 근사화 된 값과의 오차는 다음과 같다.

$$l_i = y_i - g(x_i) \quad i=1,2,\dots,L, \quad (7)$$

여기서 L 은 표적 좌표값 근사화에 사용될 이전 좌표값의 개수이다. 근사화 오차값을 최소로 만드는 $g(x)$ 의 계수 값들을 찾기 위해서 식 (8)과 식 (9)를 적용하고 식 (10)과 같은 결과를 얻는다 [5].

$$R = \sum_{i=0}^N (l_i)^2 = \sum_{i=0}^N [y_i - g(x_i)]^2 \quad (8)$$

$$\frac{\partial R}{\partial a_k} = 0 \quad k = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

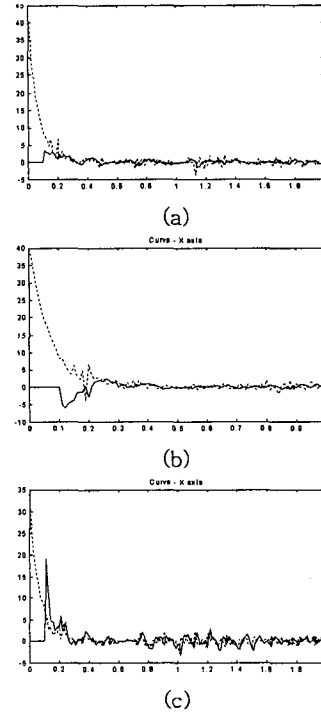


그림 4. (a) 1차 근사화 (b) 2차 근사화 (c) 3차 근사화

$$\sum_{n=0}^N \left[\sum_{i=0}^N x_i^{n+k} \right] a_n = \sum_{i=0}^L x_i^k y_i, \quad (10)$$

식 (10)을 행렬식으로 정리하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} L & \sum x_i & \dots & \sum x_i^N \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^{N+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^N & \sum x_i^{N+1} & \dots & \sum x_i^{2N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \vdots \\ \sum x_i^N y_i \end{bmatrix}, \quad (11)$$

식 (11)에서 계산된 계수들과 식 (6)을 이용하여 현재 탐색 주기의 표적 위치를 근사화 시킨다 [5]. 그림 4는 10dB의 잡음을 고려하고 1차, 2차, 3차의 근사화 다항식을 실제의 추적 곡선에 적용했을 때의 결과를 보인다. 점선부분은 실제 결과이며 실선이 근사화 된 결과이다. 그림에서 근사화 다항식의 차수를 증가시켜도 근사화 결과는 크게 개선되지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이전 10주기의 표적 좌표값을 이용해서 1차식으로 표적 좌표를 근사화 시킨다.

그림 5는 구성된 시뮬레이션 블록도를 보인다. IR seeker 블록은 주어진 조건에 맞는 CAT 신호를 생성하고 출력하며 AGC 블록은 입력되는 신호의 크기를 보상한다. CCM 블록은 제안된 반대용 기법이 적용된 부분이며 pulse detector와 error calculator를

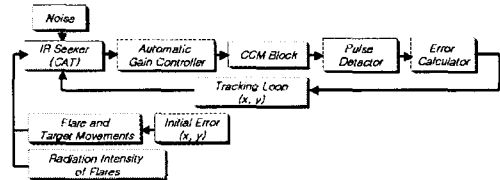


그림 5. 구성된 블록도

거쳐서 표적의 상대 좌표가 출력된다. 계산된 표적의 상대 좌표 값을 이용하여 type-I 추적 특성을 갖는 tracking loop에서 추적이 진행된다.

IV. 3차원 추적 실험

제안된 반대응 기법의 3차원 추적 성능을 평가하기 위하여 3차원 좌표계에서 모의 실험을 수행한다. 탐색기가 장착되어 있는 미사일을 구동시키기 위해서 비례 항법 유도(Proportional Navigation Guidance: PNG)를 이용한다. PNG는 식 (12)의 관계를 이용하여 미사일에 장착된 탐색기의 시선각 변화율에 따라서 미사일을 유도한다 [6], [7].

$$n_c = N V_c \dot{\lambda} \quad (12)$$

여기서 N 은 유효 항법 계수(effective navigation coefficient)이며 미사일 유도에 대한 PNG의 영향을 조절하는 역할을 하는 비례 상수이다. 일반적으로 $N=3\sim5$ 의 값을 갖는다. 미사일에 작용하는 수직 벡터를 구하기 위해서 각각의 벡터 성분을 x , y , z 축상의 성분으로 분해하여 계산한다. 식 (12)를 각 좌표 평면상의 성분으로 나타내면 다음과 같다.

$$n_{xy} = N_{xy} V_{cy} \dot{\lambda}_x, \quad n_{yz} = N_{yz} V_{cyz} \dot{\lambda}_y, \quad n_{zx} = N_{zx} V_{czz} \dot{\lambda}_z \quad (13)$$

식 (13)의 결과를 이용하여 각 평면에서의 미사일 가속도 성분을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} a_{Mxy,x} &= -n_{xy} \sin \lambda_{xy}, & a_{Mxy,y} &= n_{xy} \cos \lambda_{xy}, \\ a_{Myz,y} &= -n_{yz} \sin \lambda_{yz}, & a_{Myz,z} &= n_{yz} \cos \lambda_{yz}, \\ a_{Mzx,x} &= -n_{zx} \sin \lambda_{zx}, & a_{Mzx,z} &= n_{zx} \cos \lambda_{zx} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)에서 xy , xz 는 xy 평면의 x 축 상의 값을, xy , yz 는 xy 평면의 y 축 상의 값을 나타낸다. 식 (14)로부터 전체 좌표계에 대한 각 좌표축 상의 미사일 가속도를 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned} a_{Mx} &= a_{Mxy,x} + a_{Mzx,x}, \\ a_{My} &= a_{Mxy,y} + a_{Myz,y}, \\ a_{Mz} &= a_{Mzx,z} + a_{Myz,z} \end{aligned} \quad (15)$$

계산된 미사일의 가속도를 이용하여 샘플 구간 Δt 에 대한 미사일의 위치를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_{n+1(x)} &= M_{n(x)} + (V_x + 0.5a_{Mx}\Delta t)\Delta t, \\ M_{n+1(y)} &= M_{n(y)} + (V_y + 0.5a_{My}\Delta t)\Delta t, \\ M_{n+1(z)} &= M_{n(z)} + (V_z + 0.5a_{Mz}\Delta t)\Delta t \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 M_n 은 n 번째 탐색 주기의 미사일 위치를 나타내며 V_x , V_y , V_z 는 각각 x , y , z 축 상의 미사일의 초기 속도를 나타낸다.

V. 실험 결과

모의 실험은 MATLAB을 이용해서 수행한다. 실험에 사용된 4개의 검출기 크기는 각각 152×18 픽셀이며 표적과 섬광탄은 각각 18픽셀과 9픽셀의 지름을 갖는 원형 방사체로 가정한다. 섬광탄은 발사 1초 후에 최대의 에너지를 방사하며 3.5초 후에 완전히 연소된다고 가정한다.

5.1 2차원 추적 결과

그림 6은 섬광탄과 잡음의 영향이 고려되지 않은 이상적인 상태에서 고정 표적에 대한 추적 성능을

보인다. 초기 추적 오차값은 (38, 38)이며 일정 시간 후 추적 오차 값이 완전히 0에 수렴하는 것을 확인 할 수 있다. 그림 7은 섬광탄의 영향이 고려되지 않은 상태에서 10dB의 잡음이 존재할 때 x 축 방향으로 +1, y 축 방향으로 +1의 속도로 움직이는 표적에 대한 추적 성능이다. 잡음의 영향을 받기는 하지만 일정한 값에 수렴하는 것을 확인 할 수 있으며 이는 모의 실험에 사용된 추적 루프가 type-I 추적 특성을 갖기 때문이다. 그림 8은 잡음이 고려된 상태에서 3개의 섬광탄이 0.5초 간격으로 발사되었을 때 제안된 반대응 기법의 추적 성능을 보인다. 그림 9는 반대응 기법이 적용되지 않았을 때의 추적 성능이다. 그림 8과 그림 9로부터 제안된 반대응 기법을 적용 하였을 경우 비교적 정확한 표적 추적을 수행하는 것을 알 수 있다. 표 1은 제안된 반대응 기법이 적용 되었을 때와 그렇지 않을 때의 추적 오차값이다. 표 2는 10dB, 20dB, 30dB의 잡음에 대한 제안된 반대응 기법의 추적 오차를 보인다.

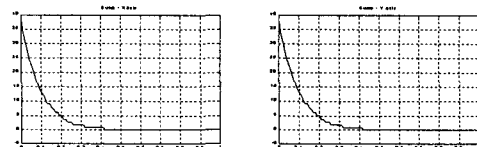
5.2 3차원 추적 결과

표 3은 본 논문에서 구성된 시나리오를 보여주고 있다. 미사일의 초기 위치는 원점이다. 미사일은 표적에 정 조건 된 상태에서 발사되며 각 시나리오에서 주어진 가속도를 받으며 이동한다. 표적 가속도의 g 는 중력 가속도 (9.8 m/s^2)를 나타낸다. 모의 실험 시작 1초 후에 0.5초 간격으로 3개의 섬광탄이 50m/s의 초기 속도로 발사된다. 섬광탄의 에너지 방사 특성은 2차원 모의 실험과 동일하다. 그림 10은 제안된 반대응 기법을 적용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 추적 성능을 보여주고 있으며 표 4는 각 시나리오에 대한 빗맞춤 거리와 교전 시간을 보여준다. 반대응 기법이 적용되지 않았을 경우 섬광탄의 영향을 심각하게 받아 표적 추적이 실패하는 반면 제안된 반대응 기법이 적용 되었을 경우 섬광탄의 영향을 배제시킴으로써 향상된 표적 추적 성능을 보인다.

VI. 결론

본 논문에서는 CAT를 위한 효율적인 반대응 기법을 제안하였다. 섬광탄의 영향을 배제시키기 위해서 2개의 검출 대역을 설정하였다. 그리고 두 대역의 입력 신호의 비를 이용하여 표적 신호를 추출하였다. 성능 평가를 위해서 제안된 반대응 기법을 적용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 2차원 좌표계 추적 실험과 3차원 좌표계 상의 추적 실험을 수행하여 성능을 비교, 분석하였다. 제안된 반대응 기법이 적용되었을 경우 섬광탄의 영향을 배제시키고 효과적인 표적 추적을 수행하는 것을 확인할 수 있었다.

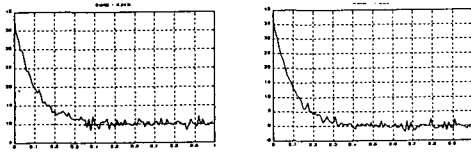
본 연구는 서울대학교 자동 제어 특화 연구 센터의 지원 및 교육부 BK21사업의 지원으로 수행된 결과입니다.



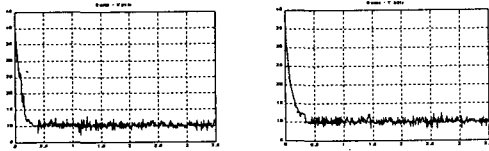
(a) $x = 38$

(b) $y = 38$

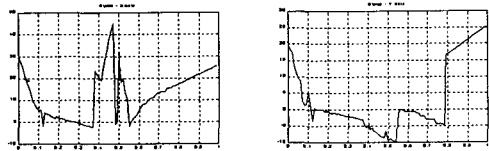
그림 6. 이상적인 상태에서의 추적 성능



(a) $x = 38$ (b) $y = 38$
 그림 7. 이동 표적에 대한 추적 성능.



(a) $x = 40$ (b) $y = 36$
 그림 8. 제안된 반대응 기법의 추적 성능



(a) $x = 30$ (b) $y = 20$
 그림 10. 반대응 기법이 적용 되지 않았을 때의 성능

표 1. 반대응 기법이 적용되었을 때와 적용되지 않았을 때의 추적 오차 (rms)

Without CCM		With CCM	
rms error		rms error	
X	Y	X	Y
8.0357	6.8287	0.0969	0.1027

표 2. 제안된 반대응 기법의 추적 오차 (rms)

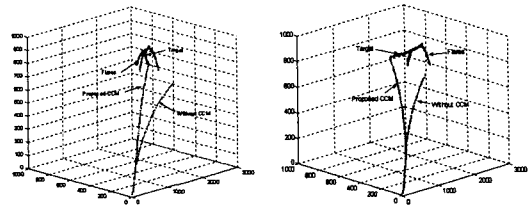
SNR	Initial error $X=45, Y=30$		Initial error $X=-30, Y=45$	
	rms error		rms error	
	X	Y	X	Y
10dB	0.0778	0.0782	0.0655	0.0786
20dB	0.0703	0.0629	0.0616	0.0514
30dB	0.0357	0.0257	0.0369	0.0249

표 3. 3차원 모의 실험의 초기 조건

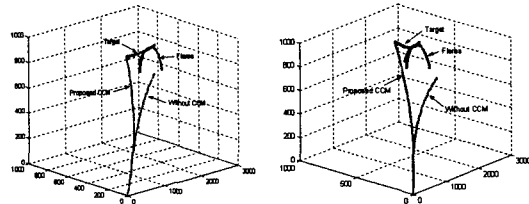
	Sinario 1	Sinario 2	Sinario 3	Sinario 4
표적 가속도	$x = 3g$	$x = -3g$	$x = 3g$	$x = 3g$
	$y = -3g$	$y = 3g$	$y = 3g$	$y = 3g$
	$z = 0g$	$z = 0g$	$z = 0g$	$z = 3g$
표적 초기 위치	$\phi = 15 \text{ deg.}, \theta = 15 \text{ deg.}$			
표적의 초기 속도	$V_T = 280 \text{ m/s}$			
표적의 이동 방향	$\phi = 180 \text{ deg.}, \theta = 0 \text{ deg.}$			
미사일 초기 위치	$x = 0, y = 0, z = 0$			
미사일 초기 속도	$V_M = 510 \text{ m/s}$			
표적과 미사일의 초기 거리	$R_{TM} = 3000\text{m}$			
섬광탄 발사 시간	Flare 1: 3sec., Flare 2: 3.5sec., Flare 3: 4 sec.			
섬광탄 발사 속도	50 m/s			

표 4. 각 시나리오에 대한 빗 맞힘 거리

	Sinario 1	Sinario 2	Sinario 3	Sinario 4
Miss distance	2.3725	2.0012	2.8182m	1.6322
Engagement Time	3.8200 sec.	3.8567 sec.	4.0233 sec.	4.0882 sec.



(a) (b)



(c) (d)

그림 11. (a) 시나리오 1, (b) 시나리오 2, (c) 시나리오 3 (d) 시나리오 4

참고문헌

- [1] 이석한, 오정수, 윤용인, 서동선, 최중수, "Two-color Cancellation을 이용한 Crossed Array Tracker", 한국통신학회 추계학술대회, 제 20권 2호, pp. 1825-1828, 1999년 11월.
- [2] 오정수, 서동선, 최중수, "Two-color 탐색기를 위한 적외선 신호 분석 및 대역 선정", 한국통신학회 논문지, Vol.25, No.1B, pp112-120, 2000년 1월
- [3] 오정수, 이석한, 윤용인, 서동선, 최중수, "대역간 신호비를 이용하는 반대응 알고리즘을 위한 MMR, 검출 성능 분석", 한국통신학회 추계학술대회, 제 21권 1호, pp.607-610, 2000년 7월
- [4] S.H. Lee, J.S. Oh, K.S. Doo, D.S. Seo, and J.S. Choi, "Two-color Counter-countermeasure for the Crossed Array Tracker", ITC-CSCC, pp. 1059-1062, July, 2000.
- [5] S.Nakamura, *Applied Numerical Methods in C*, pp. 294-303, 1995
- [6] Paul Zarchan, A.Richard Seebass, *Tactical and Strategic Missile Guidance*, pp.25-37, 1994
- [7] John H. Blacklock, *Automatic Control of Aircraft and Missiles 2nd Edition*, pp.262-273, 1991