

## 레이저빔을 이용한 펄스변조 적외선탐색기 기만

김성재<sup>1)</sup> · 정춘식<sup>1)</sup> · 신용산<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제3기술연구본부

### Laser-based Jamming of a Pulse Modulated Infrared Seeker

Sungjae Kim<sup>1)</sup> · Chunsik Jeong<sup>1)</sup> · Yongsan Shin<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 19 September 2018 / Revised 10 December 2018 / Accepted 22 March 2019)

#### ABSTRACT

Laser beam is directional and small in divergence angle so that it is well qualified to deliver high intensity infrared energy into a coming MANPADS threat for aircraft survivability. The threat will be deceived and loose tracking of a target when it is exposed to the laser beam modulated relevant to the track mechanism of the threat. The laser beam goes through scattering inside the seeker of the threat and reach the detector in a stray light form, which is a critical phenomenon enabling jamming of the seeker. The mechanism of the laser beam based jamming against a pulse modulated infrared seeker is shown. Simulations are carried out to support the understanding of how the jam technique works.

Key Words : MANPADS(휴대용대공유도탄), DIRCM(지향성적외선탐색기) Pulse Modulated Infrared Seeker(펄스변조 적외선탐색기), Scattering(산란)

#### 1. 서론

표적에서 발생하는 열을 추적하여 명중시키는 방식의 휴대용대공유도탄(MANPADS: Man Portable Air Defense System)은 세계적으로 널리 확산되어 항공기의 큰 위협이 되고 있다. 이에 따라 휴대용대공유도탄으로부터 항공기를 보호하고 전투원의 생존성을 향상시키기 위해 적외선탐색기(IRCМ: Infrared Countermeasures)

의 필요성이 증대되고 있는 상황이다<sup>1-4)</sup>.

휴대용대공유도탄은 탐색기의 기술발전 단계에 따라 세대를 구분한다. 1세대 스핀스캔(spin scan) 탐색기와 2세대 콘스캔(conical scan) 탐색기는 플레어(flare)에 취약하여 성능이 제한적이었다. 3세대 탐색기로 진화하면서 다중밴드 검출기를 사용하고 스캔방식을 개선하여 섬광탄과 표적을 구분할 수 있게 되면서 표적 식별력을 향상시켰다<sup>5)</sup>.

3세대 탐색기에 대응하기 위해 지향성적외선탐색기(DIRCM: Directional Infrared Countermeasure)의 필요성이 증가하였다. DIRCM은 지향성이 우수하기 때문

\* Corresponding author, E-mail: slthsan@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

에 레이저빔을 좁은 영역에 집중시켜 높은 에너지 밀도를 얻을 수 있으며 공격해오는 위협체를 효과적으로 방어할 수 있다. 레이저빔을 위협체를 기만할 수 있도록 변조되어 기만코드 형태로 조사된다.

적외선탐색기가 기만광원을 표적으로 인식하도록 레이저빔을 변조해야 한다. 이를 위해 적외선탐색기 추적 원리를 이해할 필요가 있다. 추적신호와 유사한 형태로 레이저빔을 변조시켜야 교란이 가능해지기 때문이다. 레이저빔을 변조하는데 필요한 정보는 기만코드에 담겨 있으므로, 결국 기만코드는 대상 위협체 탐색기의 추적원리로부터 설계된다.

또한 기만광원이 조사될 때 탐색기에서 발생하는 광학적 현상을 예측해야 한다. 레이저빔이 기만코드에 따라 변조된다고 해도 기만에 필요한 크기의 신호 형태로 검출기에 전달되지 않으면 기만이 일어날 수 없다. 광학적 현상을 고찰하여 기만이 발생할 수 있는 요건을 분석할 수 있어야 한다.

본 논문은 3세대 펄스변조 적외선탐색기의 한 형태인 슬릿형 적외선탐색기를 모델링하여 기만 원리를 살펴보았다. 기만광원이 조사될 때 탐색기에서 발생하는 산란광 현상을 분석하고 기만이 발생할 요건을 고찰했다. 이를 바탕으로 추적신호와 기만신호가 생성되고 처리되는 계통을 모델링하여 기만 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. 펄스변조 적외선탐색기 모델링

### 2.1 광학계 구조

펄스변조 적외선탐색기 광학부는 Fig. 1과 같이 반사광학계, 단일 검출기, 회전하는 레티클(reticle)로 구성된다. 레티클은 빛이 완전 차단되는 물질로 도포된 부분과 슬릿(slit)으로 구성되는데, 슬릿을 통과한 적외선 에너지만 검출기로 전달된다. 표적에서 방사된 적

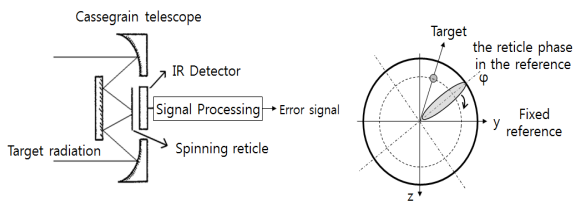


Fig. 1. Schematic of optics(left) and reticle(right) of a pulse modulated infrared seeker

외선이 광학계를 거쳐 검출면에 한 점으로 집중되고 회전하는 레티클의 슬릿을 지날 때 펄스 신호를 발생시킨다. 좁은 슬릿은 공간 분해능을 향상시켜 표적항공기와 플레이어를 구분하는데 기여하였다<sup>6)</sup>.

### 2.2 표적신호발생부 모델링

적외선탐색기 검출기에서 생성되는 표적신호를 모사하기 위해 표적신호발생부를 모델링하였다. 점표적 이미지를 생성한 후 시계방향으로 100 Hz 주기로 회전시켜 표적신호를 생성하였다. 위상은 Fig. 2의 (+y)축에 레티클이 위치하는 경우를 기준으로 하며, 표적이 (-y)축에 위치하면 위상이 180°가 된다. 레티클은 100 Hz로 회전하므로 10 ms 주기로 펄스형태의 표적신호가 발생한다. 표적이 위상 180°에 위치하고, 오차각이 각각 탐색기 시계(Field Of View)의 1/3과 1/12이면 Fig. 2와 같이 표적은 (-y)축에 위치한다. 여기서 오차각은 탐색기의 광축과 표적 LOS(Line Of Sight) 축의 차이, 즉 표적이 탐색기 광축으로부터 벗어난 각도를 의미한다. 또한 위상 0° 경우를 시간 0으로 가정하면 위상 180°에 위치한 표적신호는 5 ms 시점에 나타난다.

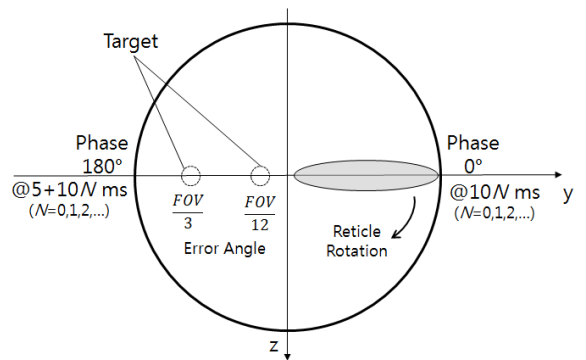


Fig. 2. Schematic of a target on the rotating reticle

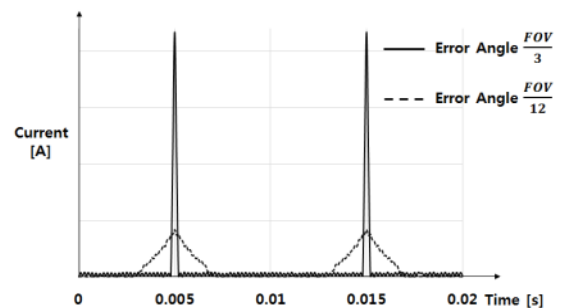


Fig. 3. Target signal generated from the model

Fig. 2와 같은 형태로 탐색기에 표적이 위치하는 경우 Fig. 3과 같이 표적신호가 생성된다. 표적이 시계의 회전 중심에서 멀어질수록 오차각이 증가하며, 이때 선속력이 빨라지기 때문에 표적신호의 폭은 감소한다. 따라서 오차각이 큰 경우인 시계의 1/3 일 때 표적신호의 폭이 더 좁게 생성된다.

### 2.3 추적신호처리부 모델링

표적신호발생부에서 생성된 표적신호는 추적신호처리부로 입력된다. 추적신호처리부는 오차각이 증가할수록 표적신호의 폭이 감소하는 특성을 이용하여 오차각의 크기에 비례하는 신호가 발생한다. 그리고 자이로스코프가 회전함에 따라 기준코일에서 발생된 신호와 추적신호처리부에서 생성된 세차신호의 위상차를 이용하여 표적의 방향에 비례하는 신호가 발생한다.

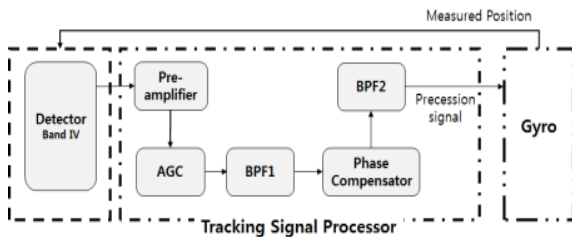


Fig. 4. Block diagram of a pulse modulated infrared seeker model

추적신호처리부는 Fig. 4와 같이 모델링하였다. 전치증폭기는 표적신호발생부 모델링에서 모사된 표적신호, 즉 미소전류를 전압으로 변환시켜 증폭시킨다. 전치증폭기 내부의 TIA(Trans-Impedance Amplifier) 회로는 전치증폭기로 입력되는 미소전류를 전압으로 변환하여 궤환저항(Feedback Resistance) 값에 해당하는 신호증폭을 수행한다. TIA를 통과한 표적 전압성분은 HPF(High Pass Filter)를 거쳐 직류 성분이 제거되고, LPF(Low Pass Filter)와 HPF로 구성된 Optimal 필터를 거쳐 특정 대역의 주파수 성분만 통과된다.

전치증폭기를 통과한 신호는 입력신호의 크기를 자동으로 일정하게 제어하는 자동이득조절기(AGC: Automatic Gain Controller)를 통과한다. 유도탄과 표적의 거리에 따라 탐색기로 입력되는 표적신호의 크기가 달라지며, 이러한 특성은 탐색기의 추적성능을 저하할 수 있는 요인이 된다. 따라서 표적신호는 AGC

를 거치면서 표적과 유도탄 사이의 거리에 무관하면서 오차각의 크기에 비례하는 신호로 바뀌어 탐색기의 일정한 추적성능을 확보한다.

AGC를 통과하여 일정한 크기로 유지되는 표적신호는 오차각에 따라 그 형상이 달라진다. 오차각이 증가할수록 표적신호의 펄스폭이 좁아지므로 신호처리 입장에서는 오차각이 증가할수록 고주파 성분의 신호가 증가하게 된다. 따라서 BPF1은 특정 대역의 입력 주파수 성분만 통과시키되 저주파일수록 입력 신호의 크기가 감쇄되도록 모델링되었다.

모델링된 여러 필터를 통과한 표적신호는 입출력간의 지연으로 인하여 원래 위상과 차이가 발생하기 때문에 표적 방향 측정의 오차를 유발시킨다. 따라서 위상보상기를 이용하여 BPF1을 통과한 표적신호의 뒤틀린 위상을 맞춰준다. 위상보상기를 거친 표적신호는 BPF2 회로를 거치며 자이로스코프의 회전주기에 따라 생성되는 표적신호의 100 Hz 대역의 주파수 성분만 통과된다. 이처럼 자이로스코프의 회전과 레티클 형상에 의하여 변조된 표적신호는 추적신호처리부에서 복조되어 자이로스코프로 입력되는 세차신호(Precision Signal)가 된다.

검출된 표적신호에 따라 추적신호처리부는 자이로스코프를 구동하는 세차신호를 생성한다. 이 세차신호는 자이로스코프를 구동하면서 표적의 오차각이 감소하는 방향으로 움직이도록 신호의 극성과 방향을 맞추어 주며, 세차신호의 크기는 오차각의 크기에 비례하고 세차신호의 위상은 표적의 오차방향과 일치하는 신호이므로 세차신호에 의해 움직이는 자이로스코프 위에 표적신호발생부가 위치하므로 펄스변조 적외선탐색기는 표적을 추적하는 페루프를 구성한다<sup>[7,8]</sup>.

이와 같이 모델링된 펄스변조 적외선탐색기의 정상 동작 여부를 시뮬레이션을 통하여 확인했다. 시뮬레이터의 좌표계는 Fig. 5와 같이 설정하였다. 탐색기의 위치는 (0m, 0m, -50 m), 표적항공기의 위치는 (2000 m, 0m, -300 m)로 설정했다. 이때 탐색기는 지구에 장착된 상태로, 유도탄의 움직임이 없는 상황을 모사한다. 유도탄의 움직임이 없기 때문에 표적항공기의 초기 위치가 어디에 있는지 탐색기 LOS가 표적항공기를 지향하고 있다고 가정하였다. 또한 교전거리 2 km에서 표적항공기가 Hovering 할 때와 수평 비행하는 상황을 모사하여 탐색기 시계 내에서 초당 50 m씩 (-) Y<sub>c</sub> 방향으로 이동할 때 펄스변조 적외선탐색기가 정상적으로 표적을 추적하는지 확인하였다.

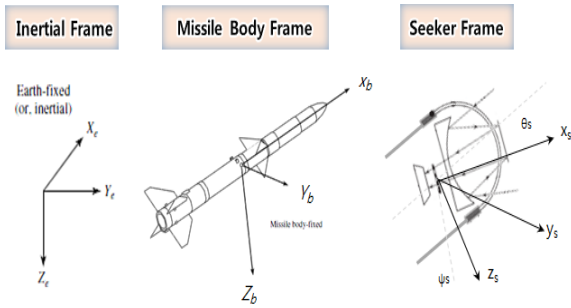


Fig. 5. Coordinate system used in the simulation

먼저 고정표적의 추적 결과로서 오차각의 변화는 Fig. 6과 같다. 탐색기가 측정한 표적의 위치는 탐색기의 초기 안정화 구간이 지나면 오차각이 약 0.03도에 수렴하므로 모델링된 탐색기가 정상적으로 고정표적을 추적하고 있음을 알 수 있다. 또한 이동표적인 경우, Fig. 7과 같이 추적이 시작되고 일정시간이 지나면 오차각이 약 0.07도에 수렴하여 모델링된 펄스변조 적외선탐색기가 정상적으로 이동표적을 추적하고 있음을 확인할 수 있다.

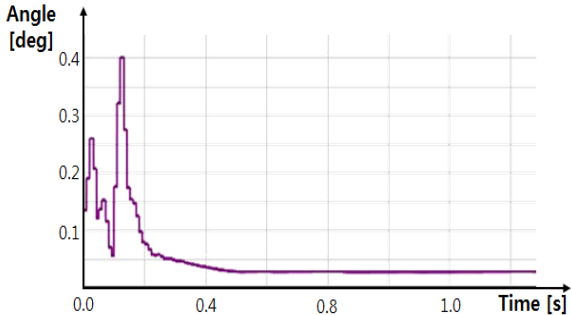


Fig. 6. Track error simulation for a static target

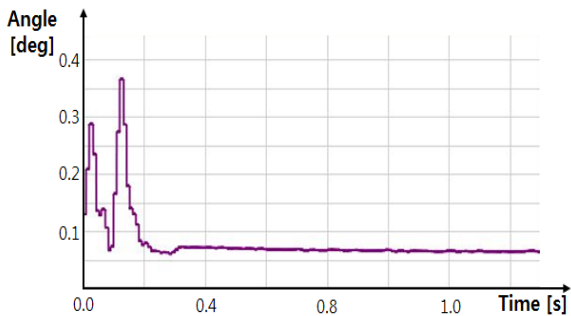


Fig. 7. Track error simulation for a dynamic target

### 3. 기만원리 분석

#### 3.1 레이저빔 산란 모델

표면거칠기(surface roughness)는 광부품 표면의 가공정밀도를 나타낸다. 광부품이 완벽하게 매끈하다고 가정하면 표면거칠기가 0이 된다. 매끈한 광학계에 입사된 광선은 Fig. 8과 같이 매우 작은 점(spot) 형태로 초점면에 결상된다.

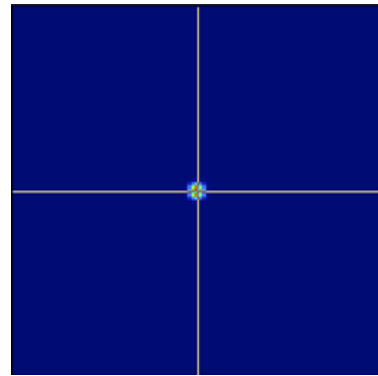


Fig. 8. Beam spot model for an optical system with ideal surface roughness

아무리 정밀하게 잘 가공된 광부품이라도 현실적으로 표면거칠기 0은 불가능하며 표면의 불균일이 존재한다. 이러한 불균일에 의해 빛은 산란(scatter)된다. 광부품 표면의 불균일에 의한 산란 모델은 다양하게 연구되었는데 대표적으로 Harvey-Shack 모델이 사용된다. Harvey-Shack 모델은 J. E. Harvey 등에 의해 개발된 모델로 다음 식 (1)과 같다.<sup>[9]</sup>

$$BSDF = b(100|\sin\theta_{scat} - \sin\theta_{spec}|)^s \quad (1)$$

이 때  $\theta_{scat}$ 은 산란된(scattered) 광선의 각도,  $\theta_{spec}$ 은 입사(specular) 광선의 각도를 의미한다.  $b$ 는 0.01rad 각도에서의 BSDF(Bidirectional Scattering Distribution Function)이다.  $s$ 는 입사각과 BSDF의 로그그래프 기울기인데, 산란되어 퍼지는 정도를 나타내는 양이다. 일반적으로  $s$ 는 -1에서 -2.5까지의 값을 가지며 -1에 가까울수록 더 거친 면을 표현한다. Fig. 9는 Harvey-Shack 모델을 적용했을 때 퍼진 형태를 나타낸다. 완벽하게 매끈한 광부품을 가공하는 것은 불가능하므로 Fig. 8에 비해 Fig. 9가 더 현실에 가깝다.

Fig. 10은 Fig. 8과 Fig. 9의 퍼짐 양상을 밀도 분포로 나타낸 그래프다. Harvey-Shack 모델을 이용하여 현실적인 광학계의 표면(practical surface,  $S = -1.7$ )과 표면 산란이 매우 적은 이상적인 광학계의 표면(ideal surface,  $S = -2.2$ )을 비교했다<sup>[10-12]</sup>. 이상적인 광학계는 중심의 최대값이 크고 퍼짐이 작다. 반면 현실적인 광학계는 이상적인 광학계에 비해 중심의 최대값은 작지만 넓게 퍼지는 양상을 보인다.

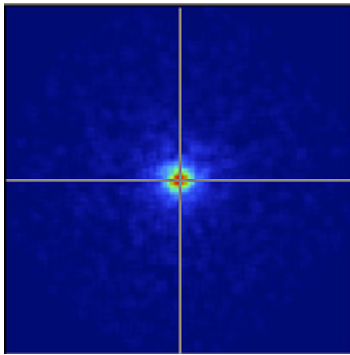


Fig. 9. Beam spot model for an optical system with practical surface roughness

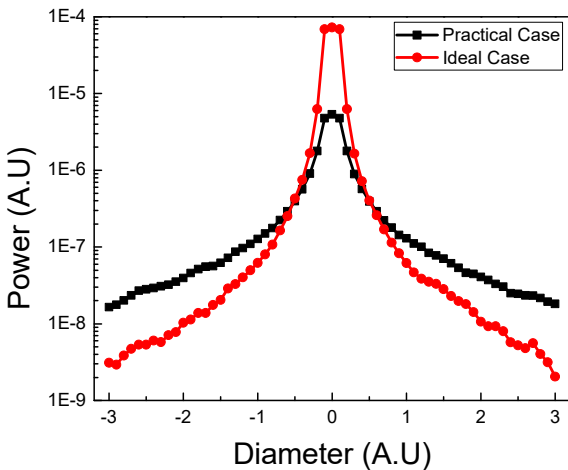


Fig. 10. Beam spot distribution prediction due to scattering for different surface roughnesses

표면 산란에 영향을 주는 대표적인 요소는 가공 과정에서 표면 가공 정밀도에 따른 산란과 광학면에 먼지입자 등의 오염으로 인한 입자 산란이 있다. 산란이 적은 매끈한 표면을 얻기 위해선 광학면 가공 정밀도

가 높아야 하며, 제작 및 운용간 표면 오염도가 낮아야 한다. 많은 시간과 비용을 들여야만 가공 정밀도를 높이고 표면 오염도를 낮출 수 있기 때문에 특수한 목적의 고성능 대형광학계를 제외하고는 비용을 고려하여 적절한 수준의 가공 정밀도를 선택한다. 소형 적외선 광부품으로 구성된 적외선탐색기도 일반적인 적외선 광학계 수준의 표면거칠기를 가질 것으로 예상된다.

변조된 레이저빔을 이용하여 펄스변조 적외선탐색기를 기만하는 경우, 위와 같은 산란현상을 통해 기만원리를 설명할 수 있다. 탐색기에 입사한 레이저빔이 산란되면 초점면에서 넓게 퍼져 레티클 위상과 상관없이 검출기로 레이저빔이 전달된다. 만약 레이저빔이 산란되지 않고 초점면에서 한 점에 집중되면 레티클을 지나지 않을 때 레이저빔이 차단되므로 기만에 필요한 변조신호를 검출기에 전달할 수 없다. 회전하는 레티클 위상에 상관없이 기만신호가 레티클을 통과하여 검출기로 도달하기 위해서는 레이저빔이 산란되어 퍼져야 한다. 그래야만 회전하는 레티클이 어떤 위치에 있더라도 원하는 시간에 켜(on)/꺼짐(off)을 반복하는 레이저 신호를 검출기가 원활하게 받아들일 수 있다.

레이저빔이 탐색기 검출기에 전달되더라도 신호 크기가 약하면 기만이 발생하지 않는다. 정상적인 추적신호보다 레이저빔에 의한 기만신호가 더 강하면 추적신호를 왜곡시켜 교란된 표적신호가 만들어진다. 이러한 교란으로 인해 탐색기는 실제 표적이 존재하는 방향이 아닌 엉뚱한 곳에 표적이 있다고 인식하게 된다.

추적신호 대비 기만신호의 비율이 증가할수록 추적신호가 쉽게 왜곡되므로 기만이 효율적으로 일어난다고 알려져 있다. 기만신호의 크기를 표현하기 위해 JSR(Jamming to Signal Ratio) 개념을 적용한다. JSR은 표적 대비 기만광원의 강도를 나타낸다. 표적과 레이저빔 세기(radiant intensity)의 비율로 계산된다. 기만광원 출력이 높을수록 JSR이 증가하고 기만이 일어날 확률도 높아진다.<sup>[13]</sup>

### 3.2 레이저빔 산란 현상과 기만원리

Fig. 11은 회전하는 레티클 위 표적과 레이저빔 위상에 따른 표적신호와 레이저신호 생성 개념을 나타낸다. 레이저빔은 표적항공기에 장착되어 있으므로 표적과 레이저빔은 물리적으로 같은 위치에 집중된다.

표적은 항공기 엔진에서 대부분 적외선을 연속적으로 방출한다. 회전하는 레티클 슬릿이 한 점의 표적을 지나가는 시점에 펄스 형태의 신호를 발생시킨다. 반면 레이저빔은 한 점으로 집중되지 않고 산란되어 퍼지기 때문에 레티클 회전과 상관없이 언제나 검출기로 전달될 수 있다. 따라서 변조된 레이저빔 위상이 그대로 검출기에 나타난다. 결과적으로 표적신호와 기만신호의 위상차는 표적 위치와 기만신호 변조 타이밍에 따라 달라지며,  $0 \sim T$ (자이로스코프 회전주기)사이 임의의 값을 가지게 된다.

Fig. 11(a)와 같이 표적이 레티클 위상 0도(+y축)에 위치하면 표적신호는 0초에서 생성된다. JSR 100인 레이저빔이 레티클 위상 0도일 때 발생되면 Fig. 10(a)와 같이 표적신호보다 100배 강한 레이저신호가 0초에서 중첩되어 생긴다. 이때 표적신호와 레이저신호가 탐색기 광학계를 거치며 같은 비율로 감쇄된다고 가정한다. 이 경우 레이저신호가 상대적으로 매우 강하므로 탐색기의 표적 추적에 필요한 세차신호보다 큰 세차신호가 생성된다. 이로 인하여 자이로스코프가 실제 표적의 위치를 지나치게 되어 표적의 위상은 약  $180^\circ$ 가 변하고, 레이저신호의 위상은 변하지 않아 결국 탐색기의 LOS는 표적의 반대 방향으로 움직인다.

또한 레이저신호와 표적신호가 중첩되어 위상차가 없는 경우는 확률적으로도 매우 드물다. 탐색기의 자이로스코프 회전주파수가 계속 변하기 때문이다. 이로 인해 실질적으로 레이저신호와 표적신호의 위상차가 없는 경우가 지속될 확률은 거의 없다.

Fig. 11(b)와 같이 레티클 위상 90도(-z축)일 때 레이저빔이 발생되면  $T/4$ 에서 레이저신호가 생긴다. 이때 레이저신호의 크기는  $\alpha$ 다. Fig. 11(c)와 같이 레티클 위상 180도(-y축)에 레이저빔이 입사하는 경우는  $T/2$ 에서 레이저신호가 생긴다. 이때 레이저신호의 크기는  $\beta$ 다. 슬릿이 레이저빔 중심에서 멀어질수록 산란광 강도가 약해지므로 레이저신호가 작아진다. 위상 180도일 때 레이저빔 중심에서 슬릿이 가장 먼 곳에 위치하므로 이때 레이저신호가 가장 작다. 레티클 위상에 따른 레이저신호의 크기는  $100 > \alpha > \beta$  관계를 가진다.

위상 180도일 때 레이저신호가 가장 작고 기만이 일어날 확률이 낮다. 기만 관점에서 가장 열악한 조건이다. 따라서 위상 180도에서 기만이 일어날 조건을 충족한다면 나머지 위상에서도 기만이 발생할 수 있게 된다.

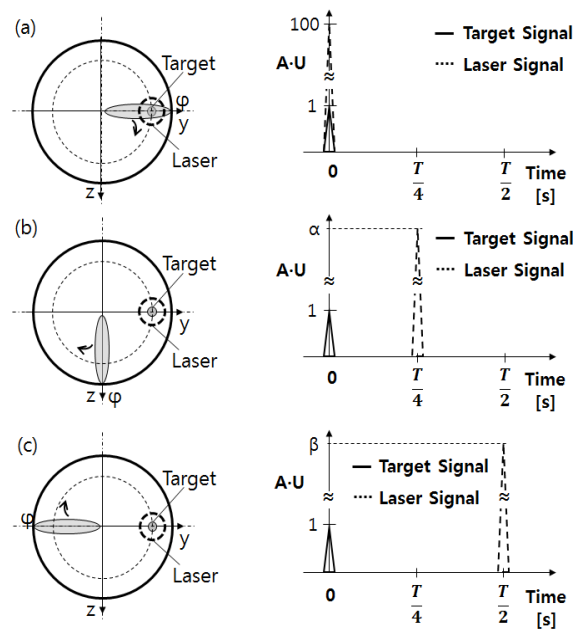


Fig. 11. Notion of how a target signal and a laser signal are acquired as the reticle phase varies

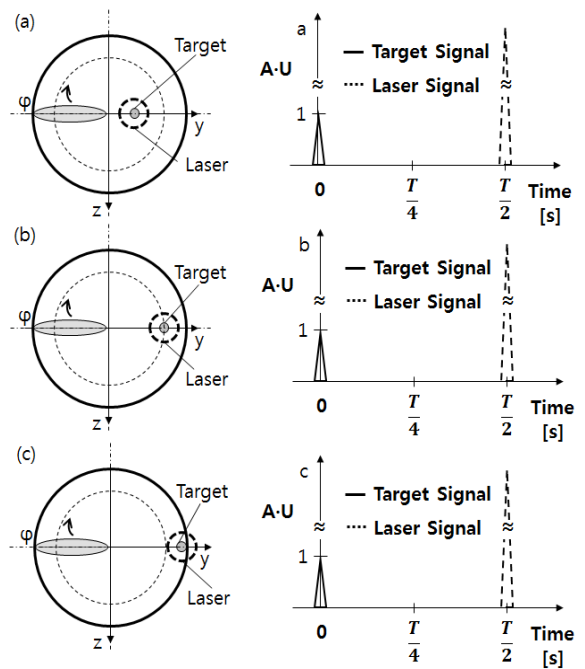


Fig. 12. Notion of how a target signal and a laser signal are acquired as error angle varies



위상이 180도로 갈더라도 오차각이 커지면 레이저빔 중심에서 슬릿이 멀어지므로 검출기에 감지되는 레이저신호는 작아진다. Fig. 12와 같이 펄스변조 적외선탐색기의 오차각에 따른 표적신호와 레이저신호를 비교하여 설명 가능하다. Fig. 12(c)가 Fig. 12(a), 12(b)보다 오차각이 더 크므로 이때 가장 작은 레이저신호가 감지되고 Fig. 12에서 레이저신호의 크기는  $a > b > c$ 가 된다. 결국 Fig. 12(c) 상황이 JSR 관점에서 기만이 가장 일어나기 어려운 조건이므로 이 조건에서 기만이 일어날 수 있다면 다른 모든 위상과 오차각 조건에서도 기만이 일어날 수 있다고 간주할 수 있다.

### 3.3 레이저빔 산란에 따른 JSR<sub>d</sub>

위의 내용을 종합하여 펄스변조 적외선탐색기의 오차각과 레티클 위상에 따라 검출기에 감지되는 레이저빔 광량을 Fig. 13에 나타내었다.  $\rho$ 은 오차각,  $\phi$ 는 레티클의 위상, P는 검출기에 입사되는 광량을 각각 의미한다. P는 정규화(normalization) 값이다. 레이저빔은 Fig. 11, 12에서 정의된 좌표축에서 (+y)축 위에 있고 오차각  $\rho$ 은 0과 FOV/2 사이 값을 가진다고 가정한다. 레이저빔에 대한 슬릿의 위상은 0도에서 360도까지 변하지만 180도를 기준으로 대칭성을 가지므로 180도까지만 표현했다.

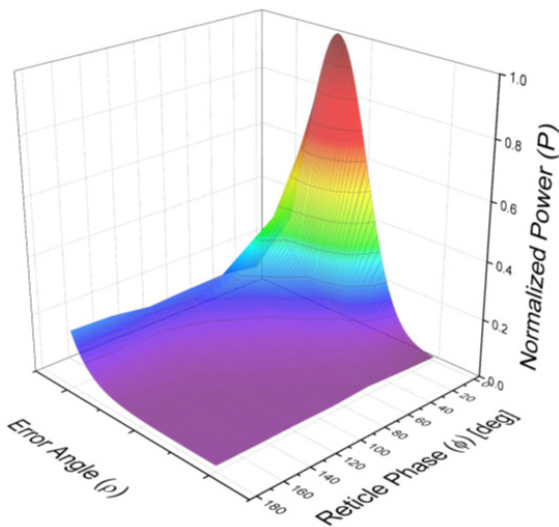


Fig. 13. 3D power distribution of laser beam received on the detector through the slit as the reticle rotates and the laser beam moves along the +y axis

레티클 위상  $\phi$ 가 0도일 때 가장 큰 광량을 보인다. 위상 0도에서 에너지가 집중된 레이저빔 중심이 슬릿을 통과하기 때문이다. 슬릿 형상일 일정하지 않고 길쭉한 타원형이기 때문에 위상 0도에서도 오차각에 따라 광량이 변한다. 타원형 슬릿 가운데 부분을 레이저빔이 통과할 때 많은 에너지가 투과되므로 광량이 높다.

레티클 위상  $\phi$ 가 180도일 때 가장 낮은 광량을 보인다. 레이저빔과 슬릿이 반대편에 위치하므로 서로 멀어지기 때문이다. 그중에서도 레이저빔이 FOV/2인 지점에 위치할 때 슬릿과 레이저빔 거리가 가장 멀다. 이때 검출기에 감지되는 광량이 가장 작다.

앞에서 언급한 2가지 산란 조건을 이용하여 Fig. 14에 펄스변조 적외선탐색기 검출기에 감지되는 신호비 JSR<sub>d</sub>(Jamming to Signal Ratio on Detector)를 계산했다. JSR은 표적과 기만광원 세기를 단순 비교하여 얻을 수 있지만 JSR<sub>d</sub>는 검출기에 도달하는 산란광 크기를 예측해야 하므로 복잡한 산란광 시뮬레이션 과정을 거쳐야 한다. 기만이 일어날 수 있는지 판단하기 위해 산란된 레이저빔이 가장 약하게 전달되는 조건, 즉 표적신호와 레이저빔의 위상차가 180도인 경우를 기준으로 계산했다.

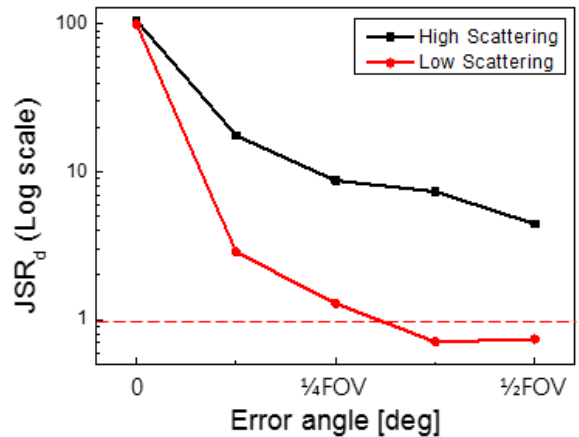


Fig. 14. JSR<sub>d</sub> prediction for different scattering models as the laser beam moves along the +y axis and the reticle phase remains at 180 deg

광학계에서 산란이 많이 발생할수록 오차각 크기에 상관없이 전 영역에 걸쳐 JSR<sub>d</sub>가 큰 것을 확인할 수 있다. 산란이 많으면 레이저빔이 넓게 퍼지므로 레이

저빔과 슬릿의 거리가 먼 조건에서도 효과적으로 레이저빔이 슬릿을 통과하여 검출기로 전달된다.

산란이 적을수록 오차각에 따라  $JSR_d$ 가 급격하게 변한다. 산란광이 넓게 퍼지지 못하고 레이저빔 중심에 에너지가 집중되므로  $JSR_d$ 가 오차각에 따라 민감하게 반응하는 것으로 분석된다. 산란이 아주 낮은 수준까지 감소하면 오차각이 큰 조건에서  $JSR_d$ 가 기만을 만족하는 문턱값 이하로 작아질 수 있다. 이때는 기만이 원활하지 않을 것으로 예상된다.

산란 크기에 상관없이 오차각 0도일 때는  $JSR_d$ 가 최대가 된다. 표적신호와 기만신호가 중첩되어  $JSR_d$ 가  $JSR$ 과 같은 값이 된다. 기만광원이 조사되는 시작 시점에는 탐색기가 표적신호를 잘 추적하므로 레이저빔 오차각이 0에 가깝다. 이때  $JSR_d$ 이 높으므로 기만이 원활하게 시작된다. 기만이 진행되면 오차각이 증가하므로  $JSR_d$ 는 점점 작아진다.  $JSR_d$ 가 작아지는 양상을 앞에서 분석한 바와 같이 레이저빔 산란의 크기에 따라 달라질 것으로 예상된다.

이론적으로  $JSR_d$ 가 1 이상이면 기만이 가능해진다. 기만코드의 성능에 따라 달라지겠지만, 원칙적으로  $JSR_d$ 가 높으면 표적신호를 왜곡시킬 가능성이 높아지므로 기만이 일어날 확률도 높아질 것으로 예상된다. 만약 산란이 충분하지 않아 특정 조건에서  $JSR_d$ 가 부족한 상황이 예측된다면,  $JSR_d$ 를 증가시키기 위해 기만광원의 출력력을 높이는 것도 해결책이 된다. 기만광원 출력력이 높으면  $JSR$ 에 비례하여  $JSR_d$ 도 증가하기 때문이다.

#### 4. 기만 시뮬레이션

펄스변조 적외선탐색기 모델과 레이저빔 산란 모델을 적용하여 기만 시뮬레이션을 수행했다. 레이저빔에 비해 표적신호의 크기가 매우 작기 때문에 산란으로 인한 효과가 미미하다. 수준이므로 작기 때문에 계산의 효율성을 위해 표적은 산란모델을 적용하지 않고 점표적 모델로 가정했다.

기만 시뮬레이션을 위하여 표적항공기와 펄스변조 적외선탐색기의 상태는 추적신호처리부 모델링의 정상 동작 확인 시 설정한 조건과 동일하게 모사하였고, 표적항공기는 수평 비행하는 상태에서만 시뮬레이션을 수행하였다. 레이저빔 산란 모델은 Harvey 모델을 이용하여 산란 많은 경우와 작은 경우로 나눠 시뮬레

이션 하였다. 펄스변조 적외선탐색기가 추적을 시작한 후 약 1.3초 후에 기만광원을 1초 동안 조사하도록 모사하였다.

기만에 성공하면 탐색기는 추적 중인 표적을 놓치고 다른 방향을 지향하게 된다. 표적이 탐색기 시계를 벗어나 다시 추적할 수 없는 상태가 되려면 오차각이 탐색기 시계의 1/2보다 커야 한다. 기만되어 표적을 다시 추적할 수 없는 상태를 OBL(Optical Break Lock)이라 한다.

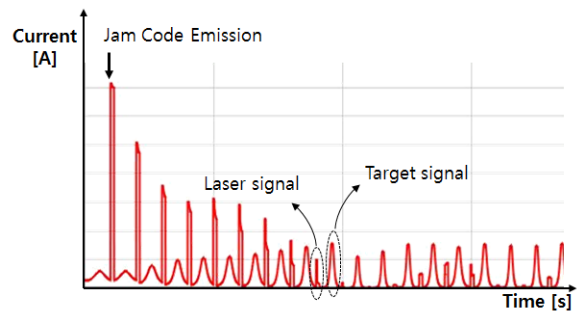


Fig. 15. Signal received for lower scattering case during the initial moment of jamming

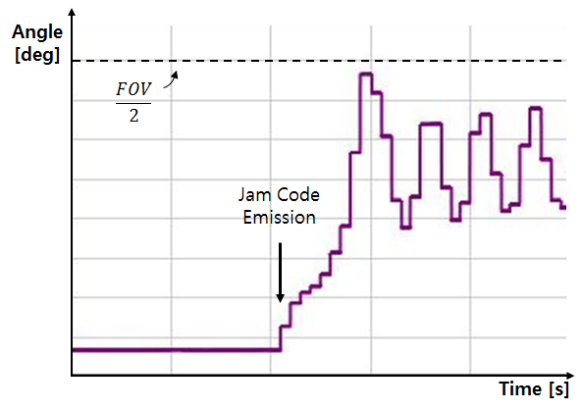


Fig. 16. Error angle variation for lower scattering case during the initial moment of jamming

Harvey-Shack 모델의 변수를 조절하여 산란이 작은 상황을 모사한 경우, 검출기에서 감지된 표적신호와 레이저 신호를 Fig. 15에 나타내었다. 탐색기가 표적을 정상적으로 추적하고 오차각이 작은 상태에서는 Fig. 14와 같이 매우 큰  $JSR_d$ 가 감지된다. 이에 따라 탐색기의 추적신호처리부에서 생성되는 세차신호 크



기는 급격하게 증가하고, 그에 비례하여 자이로스코프의 이동량도 커진다. 기만광원에 의하여 생성된 세차신호 때문에 탐색기의 시선이 유도됨에 따라 표적신호와 레이저 신호의 위상차는 180도에 근접하게 되므로 오차각이 증가하면 Fig. 14와 같이 JSR<sub>d</sub>이 감소한다.

산란이 약하게 모델링된 레이저빔은 위상차가 180도에서 JSR<sub>d</sub>가 1보다 작기 때문에 Fig. 16과 같이 오차각이 증가하여 시계의 약 1/2에 근접하면 레이저빔에 의한 신호가 표적신호보다 작아진다. 따라서 레이저빔에 의한 신호보다 표적신호에 의하여 생성된 세차신호가 탐색기의 자이로스코프 더 큰 영향을 끼치므로 자이로스코프가 표적 방향으로 시선을 이동함에 따라 오차각이 감소한다. 오차각이 감소하면 JSR<sub>d</sub>이 다시 높아지므로 레이저빔에 의하여 생성된 세차신호로 오차각은 증가한다. 오차각이 증가하여 시계의 약 1/2에 근접하면 다시 오차각이 감소한다. 이러한 과정을 반복하며 Fig. 16와 같이 OBL이 발생하지 않고, 탐색기는 표적을 계속 추적한다.

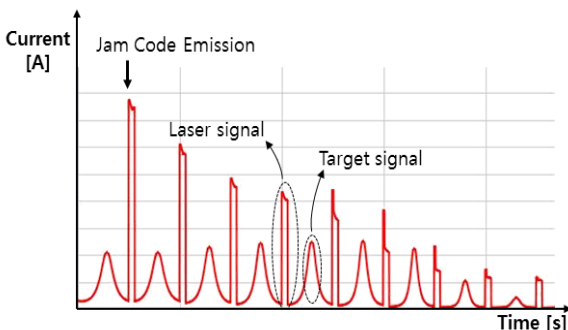


Fig. 17. Signal received for higher scattering case during the initial moment of jamming

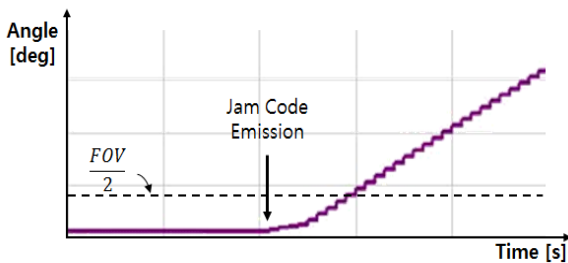


Fig. 18. Error angle variation for higher scattering case during the initial moment of jamming

산란이 강하게 일어나도록 설정된 레이저빔 모델을 적용한 시뮬레이션 결과를 Fig. 17과 18에 나타내었다. 앞서 설명한 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 탐색기가 표적을 정상적으로 추적하고 있는 상태에서는 오차각이 급격히 증가한다. 그러나 오차각이 증가하여 시계의 약 1/2에 근접하더라도 레이저빔에 의한 신호의 크기가 표적신호보다 크기 때문에 탐색기의 시선이 레이저빔에 의한 신호에 의하여 유도되어 오차각이 지속적으로 증가한다. 산란이 강하면 Fig. 17과 같이 레이저 신호가 표적신호보다 여전히 수 배 이상 크기 때문에 레이저 신호에 의한 세차신호가 계속 생성된다. 결국 Fig. 18과 같이 OBL이 발생하게 된다.

## 5. 결론

펄스변조 적외선탐색기를 모델링하여 추적 기능을 모사하였고, 탐색기 내부에서 일어나는 산란 현상을 분석했다. 모델링과 시뮬레이션을 통해 기만이 일어나는 원리를 고찰하고 기만이 일어날 조건을 살펴보았다. 기만코드로 변조된 레이저빔이 탐색기에 주입될 때 어떻게 기만이 발생하는지를 확인했다. 레이저빔을 이용하여 펄스변조 적외선탐색기를 기만하기 위해선 검출기에 수신되는 기만신호가 표적신호보다 커야 한다는 사실을 확인했다. 내부 광부품의 산란 정도를 조절하여 산란의 영향성도 확인했다.

## References

- [1] M. A. Richardson, "The anatomy of the MANPAD," Proc. SPIE 6738, Technologies for Optical Countermeasures IV, 2007.
- [2] D. H. Titterton, "A Review of the Development of Optical Countermeasures," Proc. SPIE 5615, Technology for Optical Countermeasures, 2004.
- [3] S. Chapman, "The Next Generation in Aircraft Protection Against Advanced MANPADS," Proc. SPIE 9251, Technologies for Optical Countermeasures XI, 2014.
- [4] C. R. Smith, R. Grasso, J. Pledger and N. Murarka, "Trends in Electro-optical Electronic Warfare," Proc. SPIE 8543, Technologies for Optical Countermeasures

- IX, 2012.
- [5] J. R. White, "Aircraft Infrared Principles, Signatures, Threats, and Countermeasures," Naval Air Warfare Center Weapons Division TP 8773, 2012.
- [6] S. A. Yasin, A. R. Erfanian, M. R. Mosavi and A. Mohammadi, "Design and Simulation a New Unique-slit Reticle for Pulsed Infrared Seekers," Journal of the Optical Society of Korea, Vol. 18, No. 1, pp. 1-8, 2014.
- [7] Chun-Sik Jeong, et. al., "Modeling of a Pulse Modulated Infrared Seeker for Jamming Simulation," Army Modeling & Simulation Education Conference, pp. 82, 2015.
- [8] Chun-Sik Jeong, et. al., "Jamming Simulation of a Pulse Modulated Infrared Seeker," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 463-464, 2016.
- [9] J. E. Harvey, "Light-scattering Characteristics of Optical Surfaces," ph D thesis, The University of Arizona, 1976.
- [10] W. D. Caplan, "Requirements for Laser Countermeasures Against Imaging Seekers," Proc. of SPIE 9251, Technologies for Optical Countermeasures XI, 2014.
- [11] J. Davidson, et. al., "Achieving the Background Limit on SOFIA: A Stray-Light Issue," Proc. of SPIE 4014, Advanced in Infrared Imaging and Applications, 2000.
- [12] K. Sun, et. al., "In-field Stray Light Due to Surface Scattering Effects in Infrared Imaging Systems," Proc. of SPIE 8193, In Airborne Telescope Systems, 2011.
- [13] D. H. Titterton, "Military Laser Technology and Systems," Artech House, pp. 265-304, 2015.