



Received: 2026/07/23
Revised: 2026/07/31
Accepted: 2026/08/27
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Donggeon Kim

333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea

Tel: +82-31-5179-7358

Fax: +82-31-5179-7086

E-mail: donggeon.kim@ligdna.com

함정 방어를 위한 복합 대드론체계의 EO/IR 센서 운용개념 및 해상 환경 고려요소 분석

A Concept of Operations for EO/IR Sensors Within Shipboard Hybrid Counter-UAS Systems for Naval Self-Defense and an Analysis of Maritime Environmental Factors

김동건^{1*}, 현철², 노태원³, 손현구¹

¹LIG디펜스엔에어로스페이스 유도무기개발단 수석연구원

²LIG디펜스엔에어로스페이스 M&S팀 수석연구원

³LIG디펜스엔에어로스페이스 유도무기개발단 선임연구원

Donggeon Kim^{1*}, Chul Hyun², Taewon Noh³, Hyeongu Son¹

¹Chief research engineer, Global PGM R&D Center, LIG Defense&Aerospace Co. Ltd.,

²Chief research engineer, M&S Team, LIG Defense&Aerospace Co. Ltd.,

³Senior research engineer, Global PGM R&D Center, LIG Defense&Aerospace Co. Ltd.,

Abstract

본 연구에서는 레이더와 전자광학·적외선 센서를 통합한 함정 복합 대드론체계에서 전자광학·적외선 센서가 식별과 정밀 추적의 핵심 역할을 수행하는 운용개념을 정리하고, 탐지, 추적, 식별, 교전, 효과 평가의 다섯 단계 교전 사이클에서 센서 역할 분담을 제시하였다. 또한 해상 환경 요소를 대기 광학, 해면 배경, 함정 플랫폼의 세 범주로 구분하여 센서 성능과 운용 단계에 미치는 영향을 정성적으로 분석하였다. 그 결과는 함정 자체방어 능력 확보를 위한 체계공학적인사결정의 기반을 제공한다.

This study presents a concept of operations for electro-optical/infrared (EO/IR) sensors within shipboard hybrid counter-UAS systems, defining the sensor role distribution across the detect-track-identify-engage-assess engagement cycle. Maritime environmental factors were categorized into atmospheric optical, sea background, and ship platform groups, and their qualitative effects on EO/IR performance were analyzed.

Keywords

함정 자체방어(Naval Self-Defense),
EO/IR 센서(EO/IR Sensor),
복합 대드론체계(Hybrid Counter-UAS System),
교전 사이클(Engagement Cycle),
해상 환경(Maritime Environment)

1. 서론

최근 우크라이나 전쟁과 홍해 해상 작전 사례를 통해 드론이 현대 전장에서 차지하는 위협 비중이 급격히 확대되고 있다. 특히 2023년 말부터 후티 반군이 홍해와 바브엘만데브 해협 일대에서 미 해군 함정과 상선을 대상으로 일방향 공격 드론(one-way attack drone), 자폭 드론(loitering munition), 대함 순항·탄도미사일 등을 혼합한 복합 공격을 지속적으로 수행하면서 함정 자체방어를 위한 대드론 방어 능력의 중요성이 본격적으로 부각되었다[1,2]. 2026년 5월에는 호르무즈해협을 통과하던 미 해군 구축함에 대해 미사일, 드론 및 소형보트가 결합된 복합 위협이 제기되었다고 미 중부사령부가 발표한 바 있으며[3], 이는 함정이 마주하는 위협의 양상이 기존의 고속·고고도 대함미사일 중심에서 저속·저고도 드론 위협으로 확장되고 있음을 보여준다.

기존 함정 탑재 근접방공체계는 함포 기반 체계와 단거리 미사

일 기반 체계로 구분되며, 본래 고속 대함미사일 종말 단계 요격을 목적으로 설계되었기 때문에 저속·저 RCS·저고도 드론과 같이 표적 특성이 크게 다른 위협에 대해서는 표적 매칭(weapon-to-target match) 측면에서 비효율이 발생한다. 또한 근접방공용 단거리 미사일은 한 발당 수십만 달러 이상의 고비용 무장이어서 다수의 저가 드론으로 구성된 군집 공격에 대해서는 비용 교환비(cost-exchange ratio) 측면에서도 지속가능하지 않다[4]. 이러한 한계를 보완하기 위해 함정 방어체계는 레이더와 EO/IR(electro-optical/infrared) 센서를 통합한 다중 센서 기반 사격 통제 구조와 다양한 효과기를 갖춘 복합 대드론 체계(hybrid counter-UAS system)로 발전하고 있으며[5,6], Phalanx Block 1B는 기존 레이더 기반 근접방공체계에 전방주시적외선(FLIR) 센서를 추가하여 교전 전 표적의 시각적 추적 및 식별을 지원하도록 구성된 대표적 사례이다[7]. 국내에서 개발 중인 차세대 함정 근접방공체계 역시 다기능 레이더와 전자광학 추적장치, 함포를 통합하여 군집 드론을 포함한 복합 위협에 대응하도록 설계되고 있다[8].

이러한 복합 대드론체계 안에서 레이더는 전방위 광역 탐지와 초기 추적을, EO/IR 센서는 표적 식별(identification)과 정밀 추적(precision tracking), 그리고 사격 통제 단계의 광학 기반 위협 판단을 담당하는 것이 일반적인 운용 구도이다. 따라서 본 논문에서 다루는 복합 대드론체계 내 EO/IR 운용개념은 EO/IR 센서가 탐지·추적·식별·교전 통제의 모든 기능을 단독으로 수행하는 구성을 의미하지 않으며, 레이더를 주된 광역 탐지·초기 추적 수단으로 하는 복합 대드론체계 안에서 EO/IR 센서가 식별과 정밀 추적의 핵심 역할을 수행하는 구성을 의미한다. 또한 EO/IR 센서는 EMCON(emission control) 운용 환경이나 레이더 운용이 제한되는 상황에서 수동 탐지 수단으로서 보조적 탐지 기능을 수행할 수 있다는 부가적 가치도 가진다[5,9].

대드론 방어 분야의 기존 연구는 지상 기반 방어체계를 중심으로 다층 방어(layered defense) 개념, 탐지 센서 융합, 효과기(effector) 다양화 등의 주제에서 다수 수행되어 왔으나[6,10], 상당수가 지상 고정 자산 또는 모바일 부대 방어를 전제로 하며, 일부 함정 방어 연구는 구축함 방호 대안과 무장 방어수단 비교에 초점을 둔다. 반면 함정 플랫폼 환경과 EO/IR

식별·정밀추적 역할을 교전 사이클과 연계하여 다룬 연구는 제한적이다. 이에 본 연구는 함정 방어를 위한 복합 대드론체계 안에서 EO/IR 센서가 수행하는 운용개념을 정리하고 해상 환경 고려요소를 정성적으로 분석함으로써, 기존에 분산되어 있던 논점들을 교전 사이클의 틀로 재구성하는 것을 목표로 한다. 본 연구의 범위는 함정 자체방어(self-defense) 수준의 근거리 방어로 한정하며 함대 방어나 지역방어는 다루지 않는다. 대상 위협은 일방향 공격 드론, 군집 드론, 자폭 드론, FPV(first-person view) 드론을 포함하는 소형 무인기 위협으로 한정하고, 정량적 효과도 분석과 시뮬레이션 기반 검증은 다음 단계의 연구 범위로 남겨둔다.

2. 함정에 대한 드론 위협 특성

함정에 대한 드론 위협은 운용 방식과 기능에 따라 구분된다. 정찰 및 표적획득용 드론은 비교적 높은 고도에서 운용되며 상선·함정의 위치와 식별 정보를 적 지휘체계에 전달한다. 일방향 공격 드론은 탄두를 탑재하고 표적까지 직선 또는 사전 입력된 경로로 비행하여 충돌 공격을 수행하며, 후티 반군이 홍해에서 사용한 Samad 계열이 대표적 사례이다[11]. 자폭 드론은 표적 지역 상공에서 일정 시간 배회(loiter)하면서 표적을 탐색·식별한 후 공격을 개시한다는 점에서 구분되며, Shahed 계열과 Qasef 계열이 이 범주에 해당한다[1,11]. 군집 드론(drone swarm)은 다수의 소형 드론이 동시 또는 시간차로 동일 표적을 공격하여 방어체계의 처리율을 포화시키는 전술적 위협이며[10], FPV 드론은 운용자의 영상 기반 직접 조종을 통해 정밀충돌 공격을 수행하는 저비용·고기동 근거리 위협이다. Table 1은 위협 유형별 주요 운용 특성을 정리한 것이다.

함정은 지상 고정 자산과 비교할 때 드론 위협 대응에 있어 고유한 특성을 갖는다. 함정은 해상에서 비교적 고립된 단일 표적으로 식별되므로 적 입장에서 표적 우선순위 결정이 단순하고 회피 공격이 어려우며, 항상 360° 전방위 위협에 노출되어 있어 전방위 탐지 능력이 필수적이다[5]. 해면 위 저고도로 접근하는 sea-skimming 드론의 경우 해면 클러터와 수평선 가림(horizon masking) 효과로 인해 레이더 탐지가 제한되며, 이러한 상황에서 EO/IR 센서가 보조 탐지

Table 1. Characteristics of drone threat types against naval vessels

Threat type	Typical speed	Operating altitude	Warhead mass	Threat range	Available reaction time
Reconnaissance / targeting drone	100–200 km/h	1,000–5,000 m	None	50–500 km	N/A
One-way attack drone	150–300 km/h	100–3,000 m	20–50 kg	500–2,500 km	Mins.
Loitering munition	100–200 km/h	50–2,000 m	5–30 kg	50–200 km	Mins.
Drone swarm (per vehicle)*	50–200 km/h	50–1,000 m	1–10 kg	5–100 km	Tens of secs. to mins.
FPV drone	100–200 km/h	10–500 m	1–5 kg	5–20 km	Secs. to tens of secs

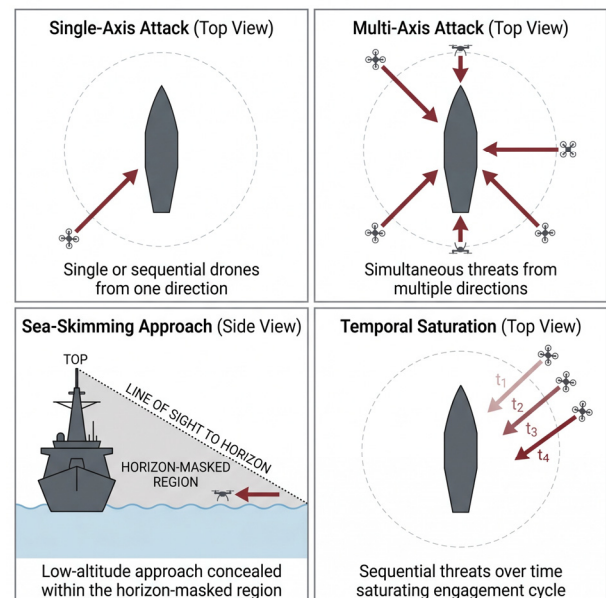
수단으로 기여할 수 있으나 해면 반사와 배경 복잡성으로 인해 EO/IR 또한 영향을 받는다[12,13]. 더불어 함정은 자체 회피 기동 능력이 제한적이고 표적 자체가 비교적 큰 IR 신호를 방사하기 때문에 적의 표적 획득이 상대적으로 용이하다는 점도 위협 환경의 비대칭성을 가중시킨다.

함정에 대한 드론 위협 접근 시나리오는 단일 방향 접근, 다방향 동시 접근(multi-axis attack), 해면 근접 비행(sea-skimming), 시간 분산 침투(temporal saturation)의 네 유형으로 정리할 수 있다. 다방향 동시 접근은 둘 이상의 방향에서 동시에 위협이 유입되어 360° 전방위 탐지·교전 자원을 동시에 요구하는 시나리오로, 함정의 레이더 자원과 EO/IR 센서 배치 및 추적 자원의 한계가 동시에 노출되는 조건이다. 해면 근접 비행은 수평선 효과로 레이더탐지 시간을 단축시키고 해면 클러터로 인한 식별 곤란을 유발하여 EO/IR 센서의 보조 탐지 및 식별 역할이 특히 중요해지는 조건이며, 시간 분산 침투는 군집 드론이 일정 시간 간격을 두고 연속 유입되어 방어체계의 재교전 사이클을 포화시키는 시나리오이다. 실제 홍해 작전에서 후티 반군은 단일 공격에 18대의 일방향 공격 드론, 2발의 순항미사일, 1발의 대함 탄도미사일을 혼합 운용한 사례를 보였으며[2], 이는 다방향·시간분산·복합위협이 결합된 형태의 전형이라 할 수 있다. Fig. 1은 네 가지 접근 시나리오를 함정 중심의 평면도에서 개념적으로 나타낸 것이다.

3. 복합 대드론체계 내 EO/IR 센서 운용개념

3.1 체계 구성 및 단계별 센서 역할 분담

함정 자체방어용 복합 대드론체계는 광역 탐지를 담당하는 레이더, 식별 및 정밀 추적을 담당하는 EO/IR 센서, 신호처리 및 자료융합 모듈, 추적·통제

**Fig. 1.** Drone threat approach scenarios against a naval vessel

컴퓨터, 표적 할당 및 사격 통제 모듈, 그리고 효과기(effector)에 해당하는 무장으로 구성된다. 효과기는 전자전 재머, 데이터링크 교란, 디코이 등 비살상 무력화 수단인 소프트킬(soft-kill)과 함포, 단거리 미사일, 직충돌형 요격드론 등 물리적 파괴 수단인 하드킬(hard-kill)로 구분된다[10,14]. 직충돌형 요격드론은 최근 저비용 군집 드론 위협에 대한 비용 효율적 대응 수단으로 주목받고 있는 효과기 유형으로, 함정 탐재 운용을 위한 발사대 및 통제 모듈 통합 형태로 개념 연구가 진행되고 있다[14]. Fig. 2는 함정 자체방어용 복합 대드론체계의 기능 블록도를 나타낸 것이다.

본 논문에서는 함정 자체방어용 복합 대드론체계의 교전 사이클을 detect, track, identify, engage, assess의 다섯 단계로 정의한다. Detect 단계에서는 함정 다기능 레이더가 360° 전방위 광역 탐지를 주도하며, EO/IR 센서는 레이더 트랙 정보를 큐(cue)로

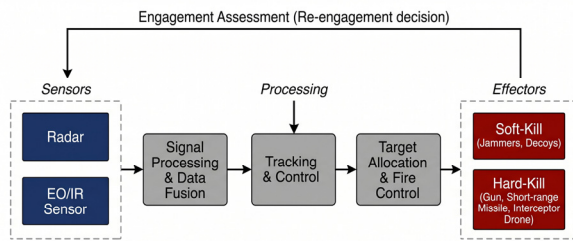


Fig. 2. Functional block diagram of a shipboard hybrid counter-UAS system for naval self-defense

제공받아 해당 방향으로 시야각을 정렬하는 보조적 기능을 수행한다. 다만 *sea-skimming* 비행이나 저 RCS 표적에 대해 레이더 탐지가 지연되는 경우 EO/IR 광역 감시 모드가 보조 탐지 수단으로 기여할 수 있으며, EMCON 운용 환경에서는 EO/IR이 주 탐지 수단으로 전환될 수 있다[5,9]. Track 단계에서 초기 추적은 레이더가 주도하여 표적의 위치, 속도, 진행 방향 등 운동학적 정보를 안정화시키고, 정밀 추적 단계에서는 EO/IR 센서가 핵심 역할을 수행한다. 이는 사격 통제에 필요한 각도 정확도가 레이더의 빔 분해능보다 EO/IR의 광학 분해능에서 더 높게 확보되기 때문이며[6,9], 함정 자체방어와 같이 표적이 근거리로 진입할수록 EO/IR의 각도 정확도 이점이 더욱 부각된다.

Identify 단계는 EO/IR 센서가 주도하는 핵심 단계이다. 레이더 트랙만으로는 표적이 적 드론인지, 우군 항공기 또는 새인지를 구분하기 어렵기 때문에 EO/IR 영상 기반 식별이 위협 판단의 결정적 정보를 제공하며[9,15], 식별 결과는 단순한 표적 분류를 넘

어 위협 우선순위 결정과 교전 권한 부여(**weapon engagement authorization**)에 직접 영향을 미친다. Engage 단계에서는 레이더와 EO/IR이 사격 통제 모듈을 통해 융합된 정보로 무장을 운용하며, 함포 운용 시 EO/IR 기반 정밀 추적 정보는 사격 해(**fire solution**) 정확도를 결정하고, 단거리 미사일 운용 시에는 시커 유도에 필요한 초기 표적 지정 정보를 제공한다. 직충돌형 요격드론 운용 시에는 EO/IR 표적 영상 정보를 요격드론에 직접 전송하여 종말단계 유도를 지원하는 운용개념도 제안되고 있다[14]. Assess 단계에서는 교전 후 표적의 무력화 여부를 평가하고 재교전 필요성을 판단하며, EO/IR 영상이 즉시적인 시각 정보를 제공하므로 레이더 트랙 단절만으로 판단하는 것보다 정확한 효과 평가가 가능하다. Table 2는 다섯 단계별 주 센서, EO/IR의 기능, 핵심 성능 지표, 운용 제약사항을 정리한 것이다.

3.2 교전 사이클 시간 구조와 처리율 개념

함정 자체방어용 복합 대드론체계의 교전 효율성은 단일 표적에 대한 교전 성공률뿐만 아니라 단위 시간당 안정적으로 처리할 수 있는 표적 수, 즉 처리율(**throughput**)에 의해서도 결정된다. 군집 드론 위협이나 시간 분산 침투 시나리오에서 위협 유입률이 체계 처리율을 초과할 경우 일부 표적이 교전되지 못한 채 잔존하게 되며, 이는 함정 방어 임무의 실패로 직결된다[4,10]. 식 (1)은 교전 사이클 시간과 처리율의 관계를 단순화하여 나타낸 것이다.

Table 2. EO/IR sensor roles and key performance measures by engagement cycle stage

Stage	Primary sensor	EO/IR function	Key performance measures	Operational constraints
Detect	Radar	Cue-based FOV alignment; passive backup detection under EMCON	Detection range, field of view, revisit time	Auxiliary EO/IR detection limited by atmospheric transmittance and FOV
Track	Radar (initial) + EO/IR (precision)	Precision angular tracking based on radar cue	Angular accuracy, track stability, update rate	Precision tracking degraded by ship motion and LOS jitter
Identify	EO/IR	Image-based target classification and threat assessment	DRI range, SNR, spatial resolution	Identification range strongly dependent on atmospheric and background conditions
Engage	Radar + EO/IR (fused)	Fire-control input; terminal-phase target designation	Fire solution accuracy, reaction time	Engagement geometry limited by weapon envelope and platform stability
Assess	EO/IR (primary) + Radar (auxiliary)	Visual battle damage assessment after engagement	Kill assessment time, re-engagement decision delay	Visual assessment limited by smoke, debris, and atmospheric attenuation

$$N = \frac{1}{t_D + t_T + t_I + t_E + t_A} \quad (1)$$

여기서 N 은 단위 시간당 안정적으로 처리 가능한 표적 수이며, t_D, t_T, t_I, t_E, t_A 는 각각 탐지, 추적, 식별, 교전, 효과 평가 단계의 소요 시간을 의미한다. 식 (1)은 단일 채널(single-server) 가정 하의 단순 모델이며, 실제 복합 대드론체계는 다중 채널 동시 처리 능력을 갖추므로 정확한 처리율은 동시 추적 가능 수, 사격 채널 수, 재장전 시간 등을 추가로 반영하여 산출되어야 한다. 본 논문에서는 EO/IR 센서가 담당하는 식별 단계 시간 t_I 와 정밀 추적 단계 시간 t_T 가 체계 처리율에 직접 영향을 미친다는 정성적 관계만을 제시하며, 정량적 모델링은 후속 연구의 범위로 남겨둔다.

식 (1)의 관점에서 EO/IR 센서가 담당하는 식별 단계는 운용상 가장 시간 압박이 큰 단계 중 하나이다. 사거리가 짧은 함정 자체방어 환경에서는 표적 유입에서 충돌까지의 가용 시간이 수 초에서 수십 초 수준에 불과하므로 EO/IR 식별 단계의 신속성이 전체 처리율을 결정짓는 병목 요소가 될 수 있다. 또한 정밀 추적 단계에서 EO/IR의 LOS(line-of-sight) 안정성이 부족할 경우 사격 해 산출이 지연되어 t_E 가 증가하게 되며, 이는 다음 장에서 다룰 해상 환경 요소와 직접 연결된다.

4. 해상환경 고려요소 분석

함정 자체방어용 복합 대드론체계에서 EO/IR 센서가 식별과 정밀 추적의 핵심 역할을 수행할 때, 해상 환경은 EO/IR 센서의 성능에 다양한 형태로 영향을 미친다. 본 장에서는 해상 환경 요소를 대기 광학적 환경, 해면 배경 환경, 함정 플랫폼 환경의 세 범주로 구분하고, 각 요소가 체계 운용에 미치는 영향을 정성적으로 분석한다.

4.1 대기 광학적 환경 요인

해상 환경에서 EO/IR 센서의 탐지 성능에 가장 직접적인 영향을 미치는 요인은 대기 투과율이다. 해무, 강수, 높은 수증기 함량, 해염 에어로졸 등은 적외선 영역의 대기 투과율을 감소시켜 EO/IR 센서가 받

는 표적 신호의 강도를 약화시킨다[12,16]. 대기 투과율은 파장 의존성을 가지며, Beer-Lambert 법칙에 기반하여 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\tau(R, \lambda) = \exp(-\sigma(\lambda) \cdot R) \quad (2)$$

여기서 $\tau(R, \lambda)$ 는 거리 R , 파장 λ 에서의 대기 투과율이며, $\sigma(\lambda)$ 는 흡수와 산란의 합으로 결정되는 파장 의존적 대기 감쇠계수(extinction coefficient)이다. 해상 환경에서는 수증기 흡수와 에어로졸 산란이 주된 감쇠 요인으로 볼 수 있다. 균질 대기와 대비 임계치 0.02를 가정한 Koschmieder 근사($\sigma = 3.912/V$)를 가시광 EO 파장대에 적용하면, 시정 $V = 10$ km 조건에서 거리 1 km의 투과율은 약 0.68이지만 시정 $V = 1$ km 조건에서는 약 0.02로 저하되어, 시정 악화만으로 수신 신호가 약 1/34 수준으로 약화될 수 있다. MWIR 및 LWIR 파장대는 소산 특성이 가시광과 상이하므로 정량 평가를 위해서는 파장대별 대기전파 모델의 적용이 필요하다[12,16].

EO/IR 센서의 탐지 가능성은 표적 신호 대 잡음비(SNR, signal-to-noise ratio)에 의해 결정되며, 적외선 영역에서의 SNR은 식 (3)과 같이 단순화하여 표현될 수 있다.

$$SNR \propto \frac{\Delta T_{eff} \cdot \tau(R, \lambda)}{NETD} \quad (3)$$

여기서 ΔT_{eff} 는 표적과 배경 간의 등가 온도차, NETD(noise equivalent temperature difference)는 적외선 센서의 잡음 등가 온도차이다. 식 (3)은 동일한 센서와 표적 조건에서 대기 투과율이 SNR에 직접 비례함을 보여주며, 결과적으로 식별 가능 거리와 식별 신뢰도가 대기 광학 환경에 강하게 의존함을 의미한다. 함정 자체방어 환경에서는 표적이 근거리로 진입하므로 절대적인 탐지 거리는 확보될 수 있으나, 영상 기반 식별과 정밀 추적에 요구되는 최소 SNR 수준이 대기 조건에 따라 충족되지 못할 가능성이 있어 운용상 유의해야 한다. 또한 EO/IR 센서는 일출·일몰 시 태양 직사광 또는 해면 반사광이 광학계로 유입되어 일시적 포화(saturation) 또는 식별 곤란이 발생하는 태양 간섭(solar glint) 영향을 받는다[13]. 함정의 항해 방향과 시간대에 따라 특정 시야각이 태양 간

섭에 일시적으로 노출되는 운용상 사각이 발생할 수 있으며, 이는 다방향 동시 위협 시나리오에서 방어 자원 가용성에 영향을 미칠 수 있다.

4.2 해면 배경 환경 요인

해상 표적 탐지에서 해면은 균일한 배경이 아니라 파고, 흰물결(white cap), 해면 반사 등으로 인해 복잡한 신호처리 환경을 형성한다. 적외선 영역에서 해면은 파고 분포와 해면 온도에 따라 비균일한 배경 복사를 방출하며, 가시광 및 단파장 적외선 대역에서는 태양광 또는 달빛이 해면에서 반사되어 비정상적으로 높은 휘도를 형성한다[12,13,17]. 이러한 해면 클러터(sea clutter)는 sea-skimming 비행하는 저고도 드론 표적의 표적-배경 분리 성능을 저하시키는 주요 요인으로 작용하며, 파고와 흰물결의 빠른 시간적 변동은 IR 영상 내에서 표적과 유사한 점원 신호를 다수 생성하여 오경보율(false alarm rate)을 증가시킨다[17,18]. 이러한 환경에서 표적 식별의 신뢰도를 확보하기 위해서는 표적과 클러터의 외형 안정성(appearance stability) 차이나 시간적 일관성(temporal consistency)을 활용하는 시공간 영상 처리 기법이 적용되어야 하며 [17], 이는 식별 단계 시간 t_I 에 직접 영향을 미쳐 결과적으로 식 (1)에서 정의한 처리율 N 의 분모를 증가시키는 방향으로 작용한다. 또한 해면 배경 환경의 영향은 운용 파장 대역에 따라 다르게 나타나는데, 단파장 적외선(SWIR) 대역은 태양 반사광의 영향을 크게 받으며 중적외선(MWIR) 및 원적외선(LWIR) 대역은 해면 자체 복사와 대기 투과율 특성에 따라 영향을 받으므로[12,16], 다파장 통합 운용 또는 운용 환경에 따른 파장 대역 선택이 식별 성능에 영향을 미친다.

4.3 함정 플랫폼 환경 요인

함정 EO/IR 센서가 지상 또는 항공기 탑재 센서와 가장 크게 구분되는 점은 플랫폼 자체의 동요 환경이다. 함정은 파도, 바람, 항해 기동 등에 의해 surge, sway, heave 및 roll, pitch, yaw를 포함하는 6자유도 운동을 지속적으로 겪으며, 이러한 동요는 EO/IR 센서의 LOS 안정성에 직접 영향을 미친다[19]. LOS 안정성은 짐벌 안정화 시스템(gimbal stabilization)에 의해 일정 수준 보상되지만, 잔류 오차는 식 (4)와

같이 근사적으로 표현될 수 있다.

$$\sigma_{LOS} \approx \sqrt{\sigma_{roll}^2 + \sigma_{pitch}^2 + \sigma_{yaw}^2 + \sigma_{sensor}^2} \quad (4)$$

여기서 σ_{roll} , σ_{pitch} , σ_{yaw} 는 각각 함정 roll, pitch, yaw 동요가 안정화 제어를 거친 후 LOS에 등가적으로 잔류하는 오차 성분을, σ_{sensor} 는 자이로, 짐벌 구동, 영상추적 및 제어오차 등 플랫폼 동요에 따른 축별 잔류성분과 구분되는 센서-추적계 잔류오차를 의미하며, 식 (4)는 각 오차 성분이 상호 비상관이라고 가정한 근사적 오차 결합식이다. LOS 오차의 증가는 정밀 추적 단계에서 표적의 각도 위치 추정 정밀도를 저하시키며 정밀추적 및 사격 해 산출 시간의 증가로 이어진다. 특히 표적이 근거리로 진입하는 함정 자체 방어 상황에서는 작은 각도 오차라도 사격 명중 확률에 직접 영향을 미치므로 함정 동요 환경의 영향은 무시할 수 없다. 또한 함정 상부 구조물(상부 데크, 마스트 등)의 배치에 따라 EO/IR 센서의 시야각이 일부 방향에서 제한되며, 함정 자체에서 방사되는 IR 신호 또는 엔진 배기열이 EO/IR 센서의 배경 잡음으로 작용하는 경우도 있다[12,19].

위 세 범주의 해상 환경 요소는 EO/IR 센서의 운용 단계별로 서로 다른 비중으로 영향을 미친다. 대기 광학적 환경은 주로 식별 단계의 SNR과 식별 거리에, 해면 배경 환경은 식별 단계의 표적-배경 분리 성능과 오경보율에, 함정 플랫폼 환경은 정밀 추적 단계의 LOS 안정성과 사격 해 산출 정확도에 영향을 미친다. Table 3는 각 환경 요소가 EO/IR 센서의 성능 지표 및 운용 단계에 미치는 영향을 정성적으로 정리한 것이다. Table 3의 high는 명목 운용조건 대비 핵심 성능지표가 50% 이상 저하되거나 해당 단계의 안정적 수행이 곤란하여 보조 센서 또는 대체 운용모드 전환이 필요한 경우, medium은 20~50% 수준의 성능저하가 발생하나 보완 조치를 통해 임무 수행이 가능한 경우, low는 20% 미만의 제한적 성능저하가 발생하는 경우를 의미하는 정성적-상대적 분류기준이며, 실제 임계치는 센서 사양, 표적 특성 및 운용조건에 따라 달라질 수 있다. 이러한 해상 환경의 통합적 영향은 식별 단계 시간 t_I 와 정밀 추적 단계 시간 t_T 의 증가로 귀결되어 식 (1)의 처리율 N 을 감소시키는 방향으로 작용하며, 군집 드론 위협이나 다방향 동시 접근

Table 3. Qualitative effects of maritime environmental factors on EO/IR sensor performance and operational stages

Environmental factor	Affected performance measures	Mechanism	Qualitative severity	Affected stages
Sea fog, precipitation	Atmospheric transmittance, SNR, identification range	Increased extinction due to water vapor absorption and aerosol scattering	High	Detect, Identify
Water vapor, humidity	Transmittance, band-dependent attenuation	Selective absorption in IR bands	Medium	Detect, Identify
Solar interference (glint)	SNR, image saturation, identification reliability	Direct or reflected solar radiation entering the optical aperture	High (transient)	Detect, Identify, Engage
Sea surface reflection	Image contrast, false alarm rate	Specular reflection of sunlight or moonlight	Medium	Identify
Sea clutter	Target-background separation, false alarm rate, identification time	Spatiotemporal variation of sea radiance due to waves and whitecaps	High	Identify
Ship motion	LOS stability, angular tracking accuracy, fire solution accuracy	Residual LOS error from roll/pitch/yaw motion	High	Track, Engage
Own-ship IR signature	Background noise, sensor saturation	Own-ship radiation and engine exhaust heat within EO/IR FOV	Conditional medium	Detect, Identify
Sensor mounting constraints	FOV coverage, blind zones	Obstruction by ship superstructure	Medium	Detect, Track

시나리오와 같이 처리율 한계가 방어 효과에 직결되는 조건에서는 위협 환경의 난이도를 가중시키는 누적적 영향을 발생시킬 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 함정 자체방어를 위한 복합 대드론 체계 안에서 EO/IR 센서가 수행하는 운용개념을 정리하고, 해상 환경이 EO/IR 센서 운용에 미치는 영향을 정성적으로 분석하였다. 본 논문에서 다룬 EO/IR 운용개념이 EO/IR 센서 단독 운용이 아니라 레이더를 주된 광역 탐지·초기 추적 수단으로 하는 다중 센서 체계 안에서 EO/IR이 식별과 정밀 추적의 핵심 역할을 수행하는 구성을 의미함을 명확히 하였고, 이러한 위치 설정 위에서 detect-track-identify-engage-assess의 다섯 단계 교전 사이클을 정의하여 각 단계에서 레이더와 EO/IR의 역할 분담을 정리하였다. 또한 대기 광학적 환경, 해면 배경 환경, 함정 플랫폼 환경의 세 범주로 해상 환경 요소를 구분하여 EO/IR 센서의 성능 지표와 운용 단계에 미치는 영향을 분석하였다.

운용상 측면에서 EO/IR 센서가 식별과 정밀 추적 단계에서 핵심 역할을 수행한다는 점은 EO/IR 식별 신뢰도와 정밀 추적 안정성이 복합 대드론체계 전체의 교전 효과를 결정짓는 핵심 변수임을 의미한다. 따

라서 함정 자체방어 운용에서는 레이더 탐지·추적 성능뿐만 아니라 EO/IR 식별 단계 시간 단축, 영상 처리 알고리즘의 클러터 강건성 확보, 정밀 추적 단계의 LOS 안정성 유지가 동등한 비중으로 관리되어야 한다. 단일 EO/IR 센서로 360° 전방위 식별을 동시에 처리하는 것은 물리적으로 불가능하므로 함정 상부 구조물 배치를 고려한 다중 EO/IR 센서 배치와 레이더 큐 기반의 우선순위 할당 알고리즘이 운용 효과를 좌우하며, EMCON 운용 환경에서는 EO/IR이 주 탐지 수단으로 전환될 수 있도록 운용 모드와 운용자 훈련 절차가 사전에 마련되어야 한다.

본 연구의 핵심 기여는 기존에 분산되어 있던 함정 방어, EO/IR 성능 및 해상 환경 논점을 대드론 교전 사이클과 단계별 센서 역할의 틀 안에서 재구성하고, 함정이라는 이동 플랫폼 특유의 환경 요소인 360° 전방위 노출, 함정 동요에 따른 LOS 불안정성, 해면 클러터를 교전 사이클의 단계 구조 안에 통합적으로 위치시킨 데 있다. 최근 개발 중인 함정 근접방공체계가 AESA 레이더와 전자광학추적장비를 통합하여 탐지, 식별 및 정밀추적 능력을 보완하는 방향으로 발전하고 있다는 점은 본 연구에서 다룬 대기 투과율, 해면 배경 및 플랫폼 안정성 문제가 실제 함정 방어체계 설계에서도 핵심 고려요소임을 보여준다. 본 연구는 정성적 분석에 한정되며, 향후 연구로는 식 (1)의 처리율 모델을 정량적으로 확장하여 EO/IR 센서 특성과

복합 대드론체계의 처리율 및 포화 특성 간의 관계를 모델링하고, 특정 위협 시나리오에서 함정 자체방어 임무 성공률과 누설률 등을 산출하는 시뮬레이션 기반 정량 분석으로 확장하는 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] Wilson Center, Timeline: Houthi Attacks, 2024.
<https://www.wilsoncenter.org/article/timeline-houthi-attacks> (accessed 2026.03.11.)
- [2] NPR, Yemen's Houthis Launch Their Largest Red Sea Aerial Attack, but No Damage Is Reported, 2024.
<https://www.npr.org/2024/01/10/1223906769/yemens-houthi-s-red-sea-attack-missiles-drones-us-navy-un-resolution> (accessed 2026.03.12.)
- [3] U.S. Central Command, CENTCOM Protects U.S. Warships Transiting Strait of Hormuz, 2026.
<https://www.centcom.mil/MEDIA/PUBLIC-RELEASES/Article/4480437/centcom-protects-us-warships-transiting-strait-of-hormuz/> (accessed 2026.05.12.)
- [4] Demostenes Balbuena, Michael Casserly, Brandon Dickerson, Stephen Graves, Vicente Maldonado, Bhavisha Pandya, Loc V Pham, & James Sanders, UAV Swarm Attack: Protection System Alternatives for Destroyers, Monterey, CA: Naval Postgraduate School, Capstone Project Report ADA573999, 2012.
- [5] Mark Everett, Don Manson, Alex Brook, & Glen Davidson, 'A Naval Infrared Search and Track Demonstrator and Its Fusion with Other Ship Sensors,' *Proceedings of SPIE*, VOL. 6206, 2006, 620626.
- [6] David Cormack, Isabel Schlangen, James R. Hopgood, & Daniel E. Clark, 'Joint Registration and Fusion of an Infrared Camera and Scanning Radar in a Maritime Context,' *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, VOL. 56, NO. 2, 2020, pp. 1357-1369.
- [7] Raytheon (RTX), Phalanx Close-In Weapon System, 2026.
<https://www.rtx.com/raytheon/what-we-do/sea/phalanx-close-in-weapon-system> (accessed 2026.04.10.)
- [8] Dmytro Shumlianskyi, 'South Korea Completes Facility for CIWS-II Anti-Aircraft System Production,' *Military*, 2025.
<https://military.com/en/news/south-korea-completes-facility-for-ciws-ii-anti-aircraft-system-production/> (accessed 2026.04.09.)
- [9] Ronald G. Driggers, Melvin H. Friedman, John W. Devitt, Orges Furxhi, & Anjali Singh, *Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems* (3rd ed.), Artech House, 2022.
- [10] Stacie Pettyjohn & Molly Campbell, *Countering the Swarm: Protecting the Joint Force in the Drone Age*, Washington, DC: Center for a New American Security, 2025.
<https://www.cnas.org/publications/reports/countering-the-swarm>
- [11] Mark Voskuijl, Thomas Dekkers, & Ralph Savelsberg, 'Flight Performance Analysis of the Samad Attack Drones Operated by Houthi Armed Forces,' *Science & Global Security*, VOL. 28, NO. 3, 2020, pp. 113-134.
- [12] Gerard J. Kunz, Marianne A. C. Degache, Marcel M. Moerman, Alexander M. J. van Eijk, Filip P. Neele, Stephen M. Doss-Hammel, & Dimirti Tsintikidis, 'Status and Developments in EOSTAR, a Model to Predict IR Sensor Performance in the Marine Environment,' *Proceedings of SPIE*, VOL. 5572, 2004, pp. 57-68.
- [13] Jian-An Liang, Xia Wang, Si He, & Wei-Qi Jin, 'Sea Surface Clutter Suppression Method Based on Time-domain Polarization Characteristics of Sun Glint,' *Optics Express*, VOL. 27, NO. 3, 2019, pp. 2142-2158.
- [14] Joseph Trevithick, Coyote, Roadrunner Loitering Drone Interceptors to Arm U.S. Navy Destroyers, *The TWZ Newsletter*, 2025.
<https://www.twz.com/sea/coyote-roadrunner-loitering-drone-interceptors-to-arm-u-s-navy-destroyers> (accessed 2026.04.02.)
- [15] Jaroslaw Barela, Krzysztof Firmanty, & Mariusz Kastek, 'Measurement and Analysis of the Parameters of Modern Long-Range Thermal Imaging Cameras,' *Sensors*, VOL. 21, NO. 17, 2021, Article 5700.
- [16] Gerard J. Kunz, Marcel M. Moerman, Alexander M. J. van Eijk, Stephen M. Doss-Hammel, & Dimitri Tsintikidis, 'EOSTAR: An Electro-Optical Sensor Performance Model for Predicting Atmospheric Refraction, Turbulence, and Transmission in the Marine Surface Layer,' *Proceedings of SPIE*, VOL. 5237, 2004, pp. 51-62.
- [17] Fan Wang, Weixian Qian, Ye Qian, Chao Ma, He Zhang, Jiajie Wang, Minjie Wan, & Kan Ren, 'Maritime Infrared Small Target Detection Based on the Appearance Stable Isotropy Measure in Heavy Sea Clutter Environments,' *Sensors*, VOL. 23, NO. 24, 2023, Article 9838.
- [18] Sunho Kim & Joohyoung Lee, 'Small Infrared Target Detection by Region-adaptive Clutter Rejection for Sea-based Infrared Search and Track,' *Sensors*, VOL. 14, NO. 7, 2014, pp. 13210-13242.
- [19] Yunxia Xia, Qiliang Bao, & Zidong Liu, 'A New Disturbance Feedforward Control Method for Electro-Optical Tracking System Line-of-Sight Stabilization on Moving Platform,' *Sensors*, VOL. 18, NO. 12, 2018, Article 4350.