

## 海洋环境对红外诱饵弹干扰特性建模及仿真

柴国贝, 张建奇, 刘德连, 黄 曦, 张冬阳

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘 要:** 在复杂海洋背景下, 诱饵弹的发射对海面环境及舰船目标的干扰影响不可忽略。为了实时计算耦合的红外海洋干扰场景, 利用了舰载和机载诱饵弹空时域分布特性及红外辐射模型, 分析了诱饵弹在红外波段的工作特点; 根据诱饵弹与海洋环境的辐射能量作用机理, 利用双向反射率分布函数建立了海面面元的散射特性模型; 构建了基于 GPU 并行运算的海上诱饵弹干扰场景渲染框架, 实现了复杂海洋环境中舰载和机载诱饵弹干扰结果的实时计算; 评估了舰载和机载诱饵弹对舰船成像结果的影响, 并定量分析了舰船对比度随诱饵弹发射角度及观察高度的影响, 为复杂海环境目标的侦查探测算法研究、诱饵弹开发提供了依据。

**关键词:** 红外诱饵弹; 红外海洋; 干扰建模; 实时计算; 舰船识别

**中图分类号:** TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0304009

## Modeling and simulation of the interference of marine environmental targets by infrared decoys radiation

Chai Guobei, Zhang Jianqi, Liu Delian, Huang Xi, Zhang Dongyang

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The interference of marine environment and vessel by decoys cannot be neglected in the complicated marine background. The characteristics of infrared decoys were indicated based on its spatial and temporal distribution characteristics and infrared radiation model. According to the mechanism of radiation energy from decoys and the marine environment, the marine surface scattering model was built based on bidirectional reflectance distribution function (BRDF). A GPU-based parallel computing framework of marine interference scenes with infrared decoys was designed, and a 3D real-time simulation of interference of complicated marine scene was performed before and after marine-/aerial-decoys launch. The influence on the imaging by marine-/aerial-decoys established, and the vessel contrast variation with decoys launch angle and observing height were analyzed. The research provides the basis for the study of marine objectives detection algorithms and decoy development.

**Key words:** infrared decoy; infrared marine scene; interference model; real-time computation; vessel detection

收稿日期: 2015-07-07; 修订日期: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61301290)

作者简介: 柴国贝(1988-), 男, 博士生, 主要从事光电成像建模与仿真方面的研究。Email: chaiguobei@sina.com

导师简介: 张建奇(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事目标与环境光辐射特性、光电系统仿真与评估、光电景象生成技术方面的研究。Email: jqzhang@mail.xidian.edu.cn

## 0 引言

现代海洋光电对抗中,强干扰源对红外系统性能<sup>[1-2]</sup>及目标探测识别算法影响<sup>[3]</sup>的研究尤为重要,特别是由于动态海面对光源的散射特性及海、天背景的交互影响等原因,干扰源在复杂海洋环境中的干扰影响与陆地环境相差很大,导致诱饵弹发射对海面目标特征的变化与陆地目标差别很大。通常,对海上诱饵弹的研究是通过海洋试验对系统性能<sup>[4]</sup>及算法进行评估<sup>[5]</sup>,但是该方法成本较高、海洋气象条件复杂多变不可控、实施难度较大。而通过可信的精确模型,可以准确模拟复杂海况下光电对抗状态,由于研发费用少、环境条件可控等优势,使该方法成为红外系统性能评价、目标识别算法开发及海上诱饵弹研发的重要手段。

从公开文献来看,国内外科研人员在红外诱饵弹和红外海洋建模方面开展了大量工作。红外诱饵弹建模方面:杨东升建立了诱饵弹运动模型<sup>[6]</sup>并推导了红外诱饵辐射计算模型<sup>[7]</sup>,田晓飞<sup>[8]</sup>针对工程化模拟,通过简化模型建立了面源红外诱饵模型,王超哲<sup>[9]</sup>针对拖拽式诱饵运动及干扰机理,建立了拖拽式诱饵弹运动模型和红外辐射模型,Hu H<sup>[10]</sup>针对主动诱饵弹和反辐射导弹(Anti-radiation Missile, ARM)的基站部署需求,建立了主动诱饵干扰模型和反辐射导弹运动模型。红外海洋建模方面: Mastin<sup>[11]</sup>使用快速傅里叶变换(FFT)创建了无缝拼接的大规模海面,为快速生成海浪几何模型提供了参考, Karine<sup>[12]</sup>假定海面是各态历经的高斯随机过程,选取 Elfouhaily 谱描述细小波浪,使用一级几何光学近似,并综合考虑阴影及遮挡效应,建立起粗糙海面模型, Wolfe<sup>[13]</sup>、Charles Cox 和 Walter Munk<sup>[14]</sup>、Masuda<sup>[15]</sup>等人建立了与角度、粗糙性相关的发射率模型, Ross<sup>[16]</sup>基于表面总体方差提出一种基于物理的各项异性 BRDF 模型,能逼真计算海面结果。真实环境中诱饵弹发射会产生强反射干扰,对海洋环境的红外辐射分布产生剧烈影响,必须考虑红外诱饵弹与海洋的耦合作用,而由于海洋表面的动态性及耦合作用计算的复杂性,难以实现实时输出复杂海洋环境下的干扰图像,目前的红外诱饵弹和海洋的红外建模工作都是独立开展的,无法对真实的海洋环境进行干

扰建模和实时仿真。

为了实时输出耦合的海洋干扰场景,文中针对复杂海洋环境中诱饵弹的干扰建模开展了两方面工作,一是建立诱饵弹与海洋辐射耦合模型,即海面散射干扰特性模型,二是设计了基于 GPU 并行处理的渲染框架,完成了海洋环境中诱饵弹干扰场景的实时计算,并对计算结果进行了分析。

## 1 干扰及环境辐射模型

### 1.1 诱饵弹的红外辐射模型

要实现海洋环境对诱饵弹辐射反射的仿真,需要首先计算诱饵弹本征辐射特性。依据一般诱饵弹的燃烧和工作环境,可将燃烧的红外诱饵弹近似为灰体<sup>[17-18]</sup>,火焰近似为小面源<sup>[19]</sup>和朗伯体,则在诱饵弹的红外辐射照度计算结果<sup>[20]</sup>如公式(1)所示。

$$E_{\text{Decoy}} = \frac{\Delta A_s \cos \theta}{\pi l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{\varepsilon(\lambda_1 - \lambda_2)}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon(\lambda_1 - \lambda_2)$  表示火焰在  $\lambda_1 - \lambda_2$  波段范围内的发射率;  $\theta$  为海面面元法线方向与诱饵弹辐射亮度之间的夹角;  $l$  为诱饵弹火焰与海面面元之间的距离;  $\Delta A_s$  表示诱饵弹火焰在目标/海面面元入射光方向投影面积;  $c_1$  为第一辐射常数;  $c_2$  为第二辐射常数;  $T$  为诱饵弹火焰平均温度。

### 1.2 海面辐射模型

要建立干扰环境下海面辐射模型,就要结合诱饵弹辐射模型,依据实际干扰条件,定量计算海洋的自身辐射以及诱饵弹的反射,完成诱饵弹干扰环境下海面红外特性的分析。

与地物自身辐射计算不同的是,由于海面的波浪特性,海水的发射率与角度、粗糙性相关性极高,不能简单近似为固定值<sup>[21]</sup>。依据 Wolfe 的模型结果,可以得知,  $\lambda_1 - \lambda_2$  波段范围内,海面面元  $\Delta A$  上产生的辐射亮度如公式(2)所示。

$$L_{\text{eml}} = \frac{\xi(\lambda_1 - \lambda_2)}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{\varepsilon(\lambda_1 - \lambda_2)}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (2)$$

式中:  $\xi(\lambda_1 - \lambda_2)$  为  $\lambda_1 - \lambda_2$  波段范围内,海面的辐射发射率。当入射角与法线夹角小于  $75^\circ$  时  $\xi(\lambda_1 - \lambda_2) = 0.98 \times (1 - (1 - c)^5)$ 。当入射角与法线夹角大于  $75^\circ$  时  $\xi(\lambda_1 - \lambda_2) = 1 - F$ , 其中  $F$  为非涅尔因子,计算公式  $F = \frac{1}{2} \frac{(g - c)^2}{(g + c)^2} \left\{ 1 + \frac{(c(g + c) - 1)^2}{(c(g - c) + 1)^2} \right\}$ , 其中  $g^2 = n^2 + c^2 - 1$ ,  $n$  为海洋镜面折

射率,  $c=V \cdot H$ ,  $V$  和  $H$  分别是单位向量, 表示海面面元发生辐射作用过程。海面面元上辐射作用过程中各角度和向量定义如图 1 所示, 图中各向量含义为:  $N$  为面元法线单位向量;  $L$  为入射光线单位向量;  $V$  为观察方向单位向量;  $H$  为  $L$  和  $V$  的角平分线单位向量。

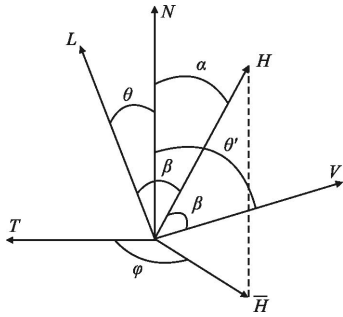


图 1 海面面元上各角度和向量示意图  
Fig.1 Angles and vectors of marine surface

### 1.3 辐射耦合模型

完成诱饵弹和海面自身红外辐射建模后, 要真实描述诱饵弹与海洋辐射的耦合模型, 即准确计算海面对于干扰弹的反射辐射量, 必须引入双向反射率 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 的概念<sup>[22]</sup>以表征海面的反射特性, 其数学表达式如公式(3)所示。

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dL_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (3)$$

式中:  $\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$  分别表示入射方向的天顶角、方位角和和反射方向的天顶角、方位角, 单位为  $\text{sr}^{-1}$ 。

由 Cook 和 Torrance<sup>[23]</sup>提出经典的 BRDF 物理模型与实验数据相符, 可靠性强, 因此文中选用该模型描述海面面元的散射特性, 其表达式结果如公式(4)所示。

$$R = sR_s + dR_d \quad (4)$$

式中:  $s+d=1$ ,  $R_s, R_d$  分别为双向反射分布函数的漫反射、镜面反射分量, 可分别通过公式(5)和(6)计算。

$$R_s = \frac{\rho}{\pi} \quad (5)$$

$$R_d = \frac{F}{\pi} \frac{D}{(N \cdot L)} \frac{G}{(N \cdot V)} \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为垂直海面面元  $\Delta A$  的辐射反射率;  $F$  为非涅尔因子;  $G$  为几何衰减因子;  $D$  为斜率分布函数;  $G$  和  $D$  分别通过公式(7)和(8)求得。

$$G = \min \left\{ 1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{(N \cdot H)}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{(N \cdot H)} \right\} \quad (7)$$

$$D = \frac{1}{m^2 \cos^4 \alpha} e^{-\left(\frac{\tan^2 \alpha}{m}\right)} \quad (8)$$

式中:  $m$  为海面微平面斜率的均方差, 表征海面的粗糙程度。

由此, 根据诱饵弹的辐射模型和双向反射函数的定义, 可以计算出海洋环境下海面元反射诱饵弹的辐射, 叠加自身辐射后可得到在观测产生的辐射亮度  $L_{\text{sea}}$  如公式(9)所示。

$$L_{\text{sea}} = (L_{\text{em}} + E_{\text{Decoy}} R) \cdot \tau_{\text{atm}} + \int_{\Omega} \cos \theta \cdot R \cdot L_{\text{atm}} d\Omega \quad (9)$$

式中:  $\tau_{\text{atm}}$  为海面面元与观测点间大气的透过率;  $L_{\text{atm}}$  为天空背景辐射亮度;  $\Omega$  为天空背景辐射在成像系统方向的立体角。

由公式(9)可以看出红外成像系统观测到的辐射亮度  $L_{\text{sea}}$  由三部分组成: 海洋的自身辐射、对诱饵弹辐射的散射在观测方向产生的辐射亮度及对天空背景辐射的散射。通过借鉴前人提出的精确模型<sup>[24]</sup>计算得到大气透过率和天空背景辐射的结果, 另外, 针对太阳的干扰, 已经有许多成熟的回避策略和方法<sup>[25-27]</sup>, 为了更精确地研究诱饵弹的干扰效果, 文中不考虑太阳的影响。

## 2 实时计算框架

红外诱饵弹模型及海面模型提供了红外海洋渲染的理论基础, 依据理论基础, 需要设计真实对抗环境的计算框架, 有效的提高仿真应用开发效率。随着 GPU 技术的发展, 在保证计算精度的前提下, 为实时的红外海洋场景生成提供了可能。为此, 设计了实时计算的基本框架, 如图 2 所示。

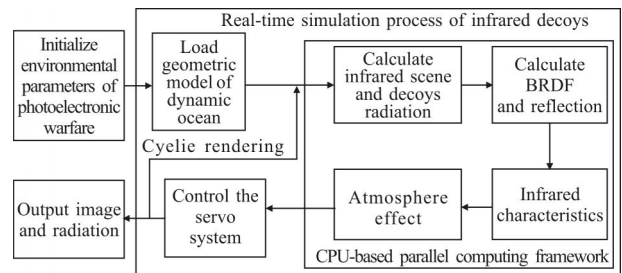


图 2 海上诱饵弹干扰场景实时渲染流程

Fig.2 Real-time simulation process of marine scene impacted by infrared decoys

从复合系统的成像链路来看,可以分成场景几何建模、图像渲染生成两个模块。由于目标几何形态固定,数学化的动态海洋几何运动单一,因此场景的几何建模模块满足实时性要求。为了充分发挥 GPU 流式并行计算能力,满足成像链路的实时性要求,需要对图像渲染模块进行实时计算的设计,即对物理模型进行预处理和合理简化:预生成场景材质的光学属性纹理及大气属性纹理;降低各模型的耦合性,实现自辐射、反射辐射、大气效应等模型的独立运算。通过上述设计,并在 GPU 中完成以下计算:红外目标、海洋、诱饵弹的自辐射, BRDF 结果,场景中反射辐射,大气效应结果等,实现了红外诱饵干扰图像的实时输出。详细计算流程如下所示。

(1) 依据对抗环境,完成仿真环境参数的初始化。主要参数设置为:波段, 3~5  $\mu\text{m}$ ; 时间, 2011 年 7 月 1 日 0:00; 天气状况, 晴天, 无云; 能见度, 23 km; 地理位置, 北纬 39.9°, 东经 116.3°; 海拔高度, 0 km; 海浪风速 6 m/s。舰船的表面粗糙度因子为 0.5, 各项同性因子为 1.0; 海面微平面斜率均方差为 0.01, 诱饵弹投射速度为 300 m/s。

(2) 构建动态的海洋几何模型。要表现动态海洋表面的红外辐射特征,需要对海洋表面进行几何建模。笔者采用了 Phillips 谱函数<sup>[20]</sup>,用来计算海浪波面的振幅和相位,进而计算出海浪的波面位移。

(3) 在 GPU 模块中完成并行计算内容。

1) 舰船和海洋自辐射及诱饵弹辐射照度的计算  
利用舰船温度及红外材质属性,计算舰船的辐射亮度分布;获取海面的几何信息,依据公式(2)计算海面自身辐射亮度分布;结合诱饵弹初始位置、初始速度以及重力加速度、风速等参量,绘制诱饵弹运动形态,获取诱饵弹位置;并根据公式(1),红外诱饵弹火焰在每一个海面面元处产生的辐射照度  $E_{\text{Decoy}}$ 。

2) 舰船/海面 BRDF 值的计算

结合诱饵弹的位置、观测位置以及海面面元的位置和法向量  $N$ ,计算每一处的入射光向量  $L$ 、反射光向量(即观察方向向量) $V$ 、平分线向量  $H$  及诱饵弹与海面面元之间的距离  $l$ ,并根据公式(4),计算红外系统响应波段下的每一块海面面元的 BRDF 的值  $R$ 。

由于舰船材质和地物目标材质从形态及光学属性相差不大,因此舰船 BRDF 值及辐射计算方法与地物目标相同,不再赘述,文中的舰船 BRDF 值计算

采用了 Schlick 模型<sup>[29]</sup>。

3) 干扰条件下红外海洋图像输出

结合  $R$  和  $E_{\text{Decoy}}$ ,根据公式(9)可以计算出红外成像系统观测到海面面元的辐射亮度  $L_{\text{sea}}$ ,将辐射亮度值进行量化处理,输出强光干扰下的红外海洋图像,具体量化过程如公式(10)所示。

$$\text{Gray}_i = L_{\text{sea}} / L_{\text{range}} \quad (10)$$

式中:  $\text{Gray}_i$  表示海面面元辐射亮度结果显示到屏幕时的灰度值;  $L_{\text{range}}$  表示量化范围。

当用户响应或伺服系统控制成像系统时,重复 GPU 并行计算模块内容,实时完成图像的输出。

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 渲染实时性验证

为了验证复杂海洋环境下诱饵弹干扰渲染的实时性,笔者在第 2 节计算框架下,在场景中发射 7 枚诱饵弹,记录了发射过程中场景渲染帧频。仿真使用的计算机参数如下。

处理器: Intel(R) Core(TM) i3-2120 CPU 3.30 GHz; 系统内存: 4.00 GB; 显卡: NVIDIA GeForce GTX 460 v2; 渲染海洋场景尺寸: 5 km×5 km; 面片数: 63 204。

在该计算机平台下,场景的渲染帧频能稳定在 50~80 Hz,最高达 130 Hz 以上,完全满足实时渲染要求。

#### 3.2 干扰结果及分析

实际诱饵弹发射时,由于诱饵弹自身高能量,会对海面辐射分布产生交互耦合效果,表现为动态海面会出现高亮的闪耀光斑,对红外目标的识别产生干扰效果。为了分析复杂海洋环境中诱饵弹干扰影响,笔者依据 1 节诱饵弹模型及第 2 节计算流程,分别发射舰载、机载诱饵弹,模拟计算成像结果,并对结果进行分析。场景中,用三维向量  $(x, h, y)$  表示各目标的位置,其中  $x, y$  为海平面的横、纵坐标,  $h$  为海拔高度,单位都为 m。

(1) 计算了海上单独发射诱饵弹结果,分析了诱饵弹发射前后海面成像结果的变化。设置红外成像仪位置(200, 500, 300),并在(0, 50, 0)处发射 7 枚诱饵弹,分别计算发射过程红外系统的成像结果,如图 3 所示,其中,图 3(a)为发射初始 0.5 s,图 3(b)时刻为 1.0 s,图 3(c)为 1.5 s,图 3(d)为 2.0 s,诱饵弹将要落入海面时。

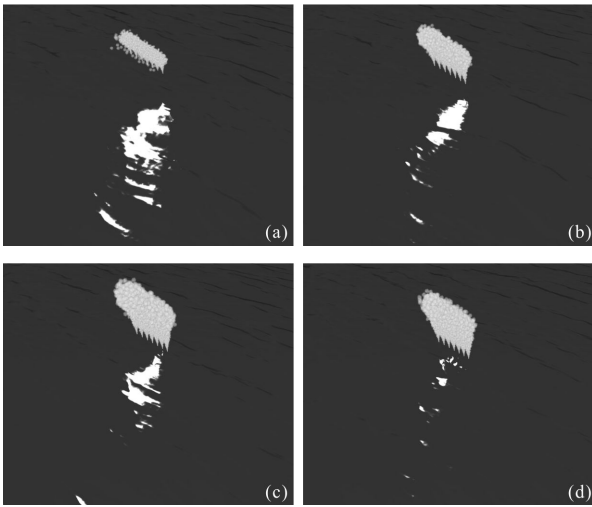


图 3 诱饵弹发射过程海面模拟计算结果

Fig.3 Imaging simulation results at different moments after decoys launched

图 3 示出,诱饵弹发射时,会对成像系统产生如下成像结果:(I) 诱饵弹头部是一个高亮度球形火焰,拖尾是火焰燃烧烟雾,与头部相比,亮度较低;(II) 当初始发射时,燃烧火焰能量巨大,会使成像面元迅速饱和,由于海面面元的 BRDF 特性,满足入射、反射与面元法线近似相等的海面位置会反射火焰辐射形成一片高亮度光斑并导致饱和;(III) 随着诱饵弹燃烧结束,海面上光斑分散、变小,由于海洋波面是动态变化的,光斑在整个过程中会随机跃动。

(2) 计算了舰载发射诱饵弹结果,分析了诱饵弹发射前后舰船目标成像结果的变化。以舰体中心为原点,北方为初始方向  $U$ ,发射方向为  $P$ ,且与初始方向  $U$  夹角为  $\gamma$ ,红外成像仪位置为  $\gamma=330^\circ$  方向,如图 4 所示。

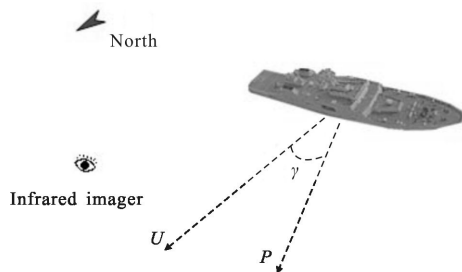


图 4 舰载诱饵弹发射方向及与红外成像仪的位置关系

Fig.4 Relationships of angles of decoys launched on vessel and position of infrared imager

设置舰船位置(0,0,0)、红外成像仪位置(200,500,

300),并在(0,50,0)处向不同方向发射 7 枚舰上诱饵弹,分别计算发射过程红外系统的成像结果,如图 5 所示,图 5(a)为未发射时成像结果,图 5(b)为发射方向为  $\gamma=30^\circ$  的结果,图 5(c)为发射方向为  $\gamma=150^\circ$  的结果,图 5(d)为发射方向为  $\gamma=270^\circ$  的结果。

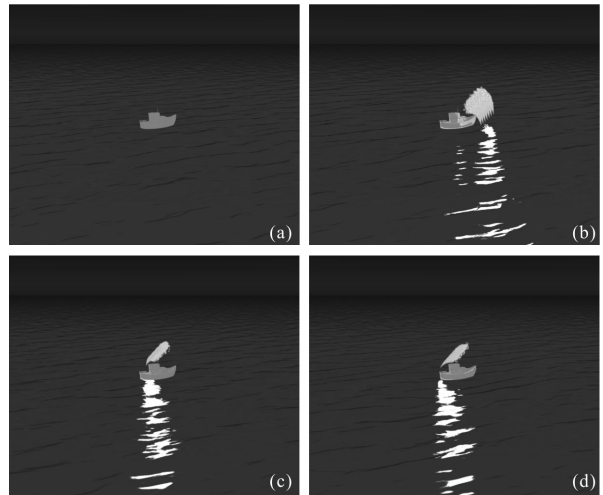


图 5 不同方向的舰载诱饵弹的模拟结果

Fig.5 Imaging simulation results of vessel decoys launched at different angles

由图 5 可知,舰载诱饵弹的发射会导致舰船表面的灰度值迅速升高,且不同发射方向对舰体亮度影响结果不同:(I) 当  $\gamma=30^\circ$  时,舰船整体灰度变亮,尤其是舰船头部区域亮度几乎饱和,(II) 当  $\gamma=150^\circ$  和  $\gamma=270^\circ$  时,舰船整体灰度变亮程度不高,头尾部分边缘区域明显变亮。

为了进一步研究发射角度对舰船成像结果的影响,绘制了舰船对比度随发射角度变化图,结果如图 6 所示,图 6 中,从初始角度  $\gamma=0^\circ$  开始,每隔  $5^\circ$  计算一次舰船对比度,并拟合结果。

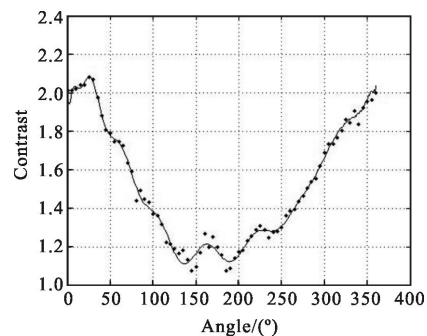


图 6 舰载诱饵弹发射角度与舰船对比度关系图

Fig.6 Vessel contrasts with the variation of the infrared decoys launching angles

由图 6 可知, 诱饵弹发射角度对舰船的对比度影响较大: 当  $\gamma \in [0^\circ, 50^\circ] \cap [330^\circ, 360^\circ]$  时, 即发射方向为朝向成像仪时, 诱饵弹起到了照明作用, 使舰体亮度提高, 舰船对比度变为原来两倍(无诱饵弹时对比度为 1), 在 [1.8, 2.1] 范围; 当  $\gamma \in [120^\circ, 220^\circ]$  时, 即发射方向为背向成像仪时, 舰船自身遮蔽了被诱饵弹照亮的大部分舰体, 成像结果中的舰体部分受诱饵弹影响不大, 舰船的对比度在 [1, 1.2] 范围。

(3) 计算多种探测位置下机载诱饵弹发射的红外成像结果。通过海面 BRDF 特性分析可知, 在不同的舰船、诱饵弹和成像仪的相对位置时, 成像结果不同, 即当诱饵弹发射后, 不同位置成像仪观测结果不同, 针对这种情况, 设置舰船位置(0, 0, 0)、诱饵弹发射位置(-2000, 500, 0) 及红外成像仪位置(3000,  $h$ , 0), 相对位置关系如图 7 所示。

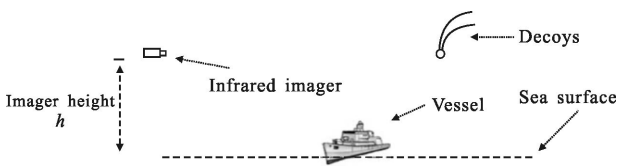


图 7 机载诱饵弹发射过程诱饵弹、舰船、红外成像仪相对位置关系图

Fig.7 Positions of decoys, vessel and IR imager during the infrared decoys launched in the air

调整成像仪高度  $h$ , 诱饵弹发射位置不变, 空中投掷 7 枚诱饵弹, 并计算红外系统的成像结果, 如图 8 所示。

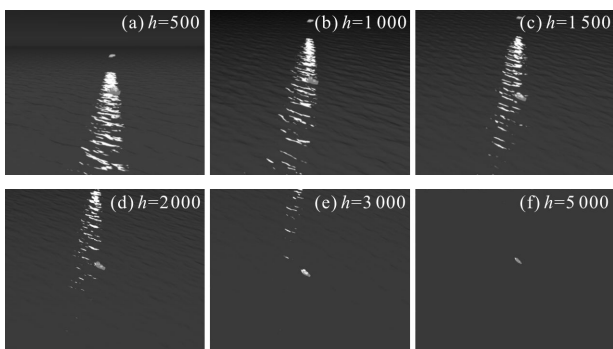


图 8 不同红外成像仪高度  $h$  观测舰船目标结果

Fig.8 Imaging simulation results of imager at different altitudes

由图 8 可知, 当成像仪位置升高时, 诱饵弹在海面上形成的亮斑区域面积减小, 对舰船识别造成的

干扰降低。这是由于当诱饵弹发射位置不变时, 随着成像仪位置的升高, 海面元与成像仪视口夹角变小, 能形成高亮度的海面区域减小, 图像结果中目标受干扰程度就越小。

为了定量分析诱饵弹干扰效果受观测高度的影响, 分别计算了 100~5 000 m 范围的观测高度下舰船对比度值, 绘制成图如图 9 所示。

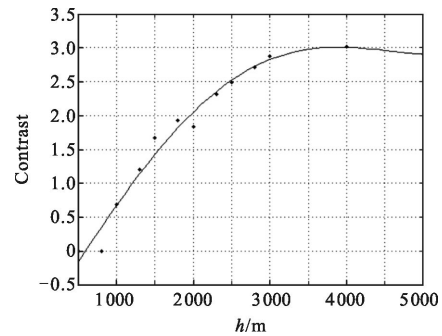


图 9 不同红外成像仪高度  $h$  的舰船对比度曲线

Fig.9 Vessel contrasts with the variation of the imager altitudes

由图 9 曲线可知, 成像仪高度在 [100, 3 000] 范围时, 随着高度的增加, 舰船的对比度提高, 而当高度范围为 [3 000, 5 000] 时, 随着高度增加, 舰船对比度减小。这是由于当成像仪高度增加时, 海面亮斑减少, 可观测到的舰船反射部分增加, 随着成像仪的继续抬高, 海面亮斑几乎不再影响舰船的对比度, 受到大气效应的影响, 对比度会出现缓慢降低结果。

另外, 随着诱饵弹发射位置降低且与目标的距离变远时, 会出现另外一种干扰程度较大的情况。设置舰船位置(0, 0, 0)、红外成像仪位置(-5 000, 500, 0), 并在(3 000, 300, 0)处发射 10 枚空中诱饵弹, 计算远距离高空发射过程红外系统的成像结果, 如图 10 所示。

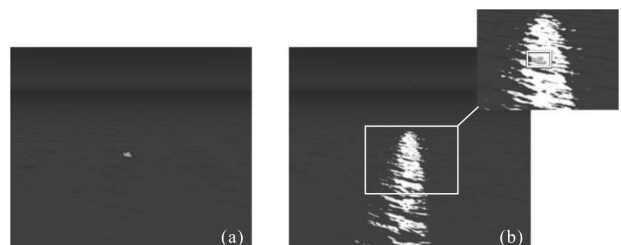


图 10 低空投掷诱饵弹发射过程模拟计算结果

Fig.10 Imaging simulation results of decoys launching at low altitude

图 10 中, 图 10(a)为未发射时刻, 图 10(b)为发射初始时刻。由图 10 可知, 当诱饵弹位置较低时, 低空成像结果中, 海面上会出现大片亮斑, 将舰船信号

淹没。由于红外系统观测的是舰船背向诱饵弹的侧面,因此场景中舰船大部分表面没反射诱饵弹的红外辐射,表现结果为海面亮斑区域中有灰度较暗的舰船轮廓,局部放大图如图10(b)右上角所示。

根据上述分析可知,诱饵弹发射不但对海面成像有影响,而且会对舰船的识别产生影响:诱饵弹发射会导致海面反射区域会迅速饱和;当朝向成像仪发射舰载诱饵弹时,舰船对比度明显增高,当背向诱饵弹发射时,舰船对比度变化较小;机载诱饵弹发射时,成像仪位置越高,舰船对比度越大。由此可知,当研制海上目标算法时,针对舰载诱饵弹,可以借助舰船对诱饵弹的反射提高识别概率;针对机载诱饵弹,可以抬高红外成像仪的位置降低诱饵弹对舰船目标识别的干扰。

## 4 结论

文中实现了复杂海/空环境中诱饵弹、舰船、海面的耦合场景的实时计算,并定量评估了舰载/机载诱饵弹对舰船的干扰效果,结果表明:(1)海面会对诱饵弹产生强反射,并在海面上形成高亮光斑,形成新的干扰辐射源;(2)舰载诱饵弹发射角度目标成像结果影响很大,不同角度下舰船的对比度变化将近一倍;(3)机载诱饵弹干扰效果受成像仪高度影响很大,极端情况下,舰船目标会完全淹没在海面亮斑中。文中研究成果为目标识别跟踪算法、诱饵弹的研制提供依据。

由于诱饵弹的干扰效果同样会受齐投数量、发射角度、投放起止时间、诱饵弹序列投放间隔等投放决策参数的影响,要进一步更全面精细地评估诱饵弹的干扰效果,需要在文中的研究成果上,考虑红外诱饵弹、海面元及导引头的相对几何关系,依据投放参数建立三者的相对运动模型,该研究内容也将是笔者以后研究的重点。

## 参考文献:

- [1] Hu Y F, Song B. Evaluation the effectiveness of the infrared flare with a tactic of dispensing in burst [C]//Systems and Control in Aeronautics and Astronautics (ISSCAA), 2010 3rd International Symposium on, IEEE, 2010: 131-136.
- [2] Butters B, Nicholls E, Walmsley R, et al. Infrared decoy and obscurant modelling and simulation for ship protection [C]//SPIE Security+Defence. International Society for Optics and Photonics, 2011: 81870Q-81870Q-16.
- [3] Aytac T, Bekmen O. Development of a target tracking algorithm for imaging infrared seekers[C]//Signal Processing, Communication and Applications Conference, SIU 2008, IEEE 16th, 2008: 1-4.
- [4] Oliveros C S, Aragón L M, Jareno R M. Comparison of the emission of IR decoy flare under controlled laboratory and on-field conditions [C]//SPIE Europe Security + Defence. International Society for Optics and Photonics, 2009: 74830L-74830L-9.
- [5] Gray G J, Aouf N, Richardson M, et al. Countermeasure effectiveness against an intelligent imaging infrared anti-ship missile[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(2): 026401-026401.
- [6] Yang Dongsheng, Mu Dejun, Dai Guanzhong. Kinetic simulation of the characteristics of airborne infrared flares[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2009, 6: 781-785. (in Chinese)  
杨东升, 慕德俊, 戴冠中. 机载红外诱饵运动特性仿真技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2009, 6: 781-785.
- [7] Yang Dongsheng, Dai Guanzhong. Radiation simulation of the characteristics of infrared flares [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 21: 5104-5110. (in Chinese)  
杨东升, 戴冠中. 红外诱饵辐射特性仿真技术研究 [J]. 科学技术与工程, 2011, 21: 5104-5110.
- [8] Tian Xiaofei, Ma Lihua, Hong Hua. Study on jamming characteristic and simulation of surface-type infrared decoy [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(2): 165-169. (in Chinese)  
田晓飞, 马丽华, 洪华. 面源红外诱饵的干扰特性分析及模拟研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(2): 165-169.
- [9] Wang Chaozhe, Tong Zhongiang, Li Lin, et al. Simulation of towed infrared decoy interfering and its operational method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 446-451. (in Chinese)  
王超哲, 童中翔, 李琳, 等. 拖曳式红外诱饵干扰仿真与使用方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 446-451.
- [10] Hu H, Wen D. Simulation investigation of counterwork between anti-radiation missile and active decoy system[M]//Computer Engineering and Networking. New Your: Springer International Publishing, 2014: 437-444.
- [11] Mastin G A, Watterberg P A, Mareda J F. Fourier synthesis of ocean scenes [J]. *Computer Graphics and Applications*, 1987, 7(3): 16-23.
- [12] Karine Caillault, Sandrine Fauqueux, Christophe Bourlier, et al. Multiresolution optical characteristics of rough sea surface

- in the infrared[J]. *Applied Optics*, 2007, 22(46): 5471–5481.
- [13] Wolfe W L, Zissis G J. The Infrared Handbook [M]. Arlington: Office of Naval Research, Department of the Navy, 1978.
- [14] Cox C S, Munk W H. Statistics of the sea surface derived from sun glitter[J]. *J Mar Res*, 1954, 13: 198–227.
- [15] Masuda K, Takashima T, Takayama Y. Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions [J]. *Remote Sensing Environment*, 1988, 24: 313–329.
- [16] Ross V, Dion D, Potvin G. Detailed analytical approach to the gaussian surface bidirectional reflectance distribution function specular component applied to the sea surface[J]. *Journal of Optical Society of America*, 2005, A22: 2442–2453.
- [17] Pu Weihua, Du Zhiming. A new method of testing for the radiation spectrum performance of infrared bait medicaments [J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(3): 399–402. (in Chinese)  
蒲薇华, 杜志明. 红外诱饵剂辐射光谱性能测试的一种新方法[J]. 兵工学报, 2003, 24(3): 399–402.
- [18] Li Shixiang. Optoelectronic Countermeasures Technology[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2000. (in Chinese)  
李世祥. 光电对抗技术 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.
- [19] Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared Physics [M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2004. (in Chinese)  
张建奇, 方小平. 红外物理 [M]. 第2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.
- [20] Guo Bingtao, Wang Xiaorui, Huang Xi, et al. Modeling and simulation of the scattering of targets surface by infrared decoys radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 300–304. (in Chinese)  
郭冰涛, 王晓蕊, 黄曦, 等. 地物环境对红外诱饵弹散射特性建模及仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 300–304.
- [21] Spulber C, Borcan O V. An analytical approach regarding some radiometric problems during the detection on the sea surface with a thermal camera [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 436: 318–325.
- [22] Belcour L, Barla P, Pacanowski R. ALTA: a BRDF analysis library [C]//EGSR Workshop on Material Appearance Modeling. Eurographics, 2014.
- [23] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics[J]. *ACM Transactions on Graphics(TOG)*, 1982, 1(1): 7–24.
- [24] Jason T Ward. Realistic texture in simulated thermal infrared imagery [D]. New York: Rochester Institute of Technology, 2008.
- [25] Xiao Liping, Cao Ju, Gao Xiaoying. Detection for ship targets in complicated background of sea and land[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(6): 6–10. (in Chinese)  
肖利平, 曹炬, 高晓颖. 复杂海地背景下的舰船目标检测[J]. 光电工程, 2007, 34(6): 6–10.
- [26] Li Hong, Zheng Chengyong, Gao Jingli. Weak and small object detection based on wavelet multi-scale analysis and fisher algorithm [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 22(5): 353–356. (in Chinese)  
李红, 郑成勇, 高景丽. 基于小波多尺度分析及 Fisher 分割的红外弱小目标检测术 [J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 353–356.
- [27] Zou Ruibin, Shi Caicheng, Mao Erke. Shearlet-based infrared target detection algorithm on complex sea [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(5): 1103–1108. (in Chinese)  
邹瑞滨, 史彩成, 毛二可. 基于剪切波变换的复杂海面红外目标检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1103–1108.
- [28] Tessendorf J. Simulating ocean water[J]. *Simulating Nature: Realistic and Interactive Techniques*. SIGGRAPH, 2001, 1(2): 5–24.
- [29] Schlick C. A customizable reflectance model for everyday rendering [C]//Fourth Eurographics Workshop on Rendering. 1993: 73–83.