

# 海面船目标红外图像的计算机模拟

沈国土 杨宝成 蔡继光

(华东师范大学光谱学与波谱学教育部重点实验室, 华东师范大学物理系, 上海, 200062)

高景 朱文勇 夏樟根

(上海交通大学应用物理系, 上海, 200030)

赵凤生

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽, 合肥, 230031)

**摘要** 在海面船目标独立红外图像理论模拟研究的基础上, 探索了船目标与海天背景合成的红外图像计算机模拟原理和方法. 理论模拟采用将大气海面组成的背景与船目标分离成像, 然后进行图像合成技术方案. 讨论了相关的原理和计算方法, 用编制的计算和显示软件对典型实例进行了计算.

**关键词** 海面船目标, 红外图像, 计算机模拟.

## COMPUTERIZED SIMULATION OF INFRARED IMAGES OF SHIP TARGETS ON THE SEA

SHEN Guo-Tu YANG Bao-Cheng CAI Ji-Guang

(Key Laboratory of Education Ministry for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy,  
East China Normal University; Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

GAO Jing ZHU Wen-Yong XIA Zhang-Geng

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

ZHAO Feng-Sheng

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** Based on the simulation of infrared images of ships without any background, the principles and methods of computerized simulation of infrared images of ships in the ocean and atmosphere background were explored. The simulation is as follows: first, the ship target and the background, which consists of the atmosphere and sea surface, were treated separately to obtain their independent infrared images; then the two images were combined into one image of the ship in the background. A series of typical infrared images were computed by using the authors' calculating and displaying softwares

**Key words** ship targets on the sea, infrared images, computerized simulation

### 引言

利用在  $3\sim 5\mu\text{m}$  和  $8\sim 12\mu\text{m}$  波段的红外图像对海面船目标进行探测和识别是一种非常有效的手段. 在军事和国民经济中都有广阔的应用前景. 研究海面船目标的红外成像特性需要对各种船目标在不同背景下的红外图像建立理论模型, 理论建模可以通过实测途径获取船目标在海天背景中的热像数据, 再运用统计和归纳, 总结出适合于某一海域的模型. 实践表明, 这一途径通常需要化费大量的人力和财力, 且得到的模型可能仅限于某些特定的区域和条件. 目前,

通过理论分析和计算机模拟, 并与少量较容易获得的实验数据和气象数据相结合已成为海面船目标红外图像的主要理论建模方法. 而对真实船只的红外图像进行实测则作为对理论模型进行验证和指导的手段.

用理论分析和计算机模拟方法进行理论建模时, 首先需要研究船目标在给定环境条件下的温度场和红外辐射场模型. 这一研究在过去的几年中有了很大的进展, 已经对某些特定的船只获得了很有意义的模拟结果<sup>[1-3]</sup>.

本文在上述工作基础上, 对船目标和海天背景合成红外图像的理论模型和计算方法进行了研究. 在计

算合成红外图像时,采用了如下的技术方案:将海天背景与船目标分离,在统一的坐标系中分别计算它们“独立”的红外图像,再把两者“拼合”成一幅图像,然后对合成后的图像作必要的修正,根据这一思想建立了相应的计算机软件模拟和图像显示软件.作为计算实例,还按仿真中红外探测器的探测特性计算了某船在某海域的系列红外图像.

## 1 合成红外图像理论模拟的方法和原理

计算船目标与海天背景合成的红外图像的理想方法是把船只、海面和大气背景作为一个整体进行计算.但由于大气背景是一个没有确定几何外形的“物体”,所以在成像计算时与船目标的计算方法是不同的.鉴于这一差异,我们采用了较适合计算机模拟性能的计算方案,该方案将海天背景和船目标分别成像,再进行图像合成.这不仅解决了上述困难,而且符合软件模块化的特点,有利于多单位进行协作开发.

### 1.1 技术方案

分析由船目标和海面大气组成的红外场景,可以看出:海面与大气的温度场和红外辐射场基本上只与当时的气象条件有关,船目标的存在,除了在海面大气的红外图像中遮挡住一部分成像区域和对船体边缘的背景图像略有贡献外,基本上没有其他影响.但是,大气和海面温度场分布及辐射场分布对船目标的温度场和红外辐射场却有极大的影响,这意味着,在计算船目标的温度场和红外辐射场时,必须以相应的海面和大气温度场和辐射场作为边界条件.

基于上述物理特征,可以在理论建模中采用如下步骤:(1)要计算一个船目标在某一特定的海域中的红外图像时,首先根据当时当地的气象参数计算大气的辐射场和海面的辐射场,同时计算出大气传输相关参数和影响船目标温度场及红外辐射场的其它参数.(2)把步骤(1)的计算结果作为环境条件,计算船目标的温度场和红外辐射场的分布.(3)根据探测器的位置和状态,分别用步骤(1)和步骤(2)的计算结果计算没有船目标时的海面大气红外图像和没有背景的船目标在探测器成像平面上形成的红外图像,然后,把船目标的图像“嵌入”到海面大气的红外图像中.(4)如果要使模拟图像更为准确,可以对上述图像进一步修正.

### 1.2 大气和海面辐射场的计算

大气中同时存在气溶胶散射、分子吸收和热辐射过程,而海面的温度场和辐射场与大气的辐射场有较密切的关系,所以我们将 LOWTRAN-7 中计算

分子吸收的 K-分布方法,用于计算散射大气辐射传输的离散纵标法与 Cox-Munk 海面模型相结合,对大气中散射、分子吸收和热辐射过程同时存在条件下的大气和海面辐射场进行计算.在大气辐射传输的计算中对每个相关波段的积分采用梯形积分公式,每个波段均分为 10 个间隔,每个等分点上的辐射强度由下式表示:

$$I(\mu, \phi) = \sum_{i=1}^3 f(k_i) I_i(\mu, \phi). \quad (1)$$

式中  $f(k_i)$  为取自 LOWTRAN-7 中的 K-分布函数,  $\mu$  是天顶角的余弦,  $\phi$  是方位角,  $I_i(\mu, \phi)$  是与吸收系数  $k_i$  对应的辐射强度,可以通过求解如下辐射传输方程得到:

$$\begin{aligned} \mu \frac{dI_i(\mu, \phi)}{d\tau_k} = & -I(\mu, \phi) + \\ & \frac{\bar{\omega}_k}{4\pi} \int_{\Omega} p(\mu, \phi; \mu', \phi') I_i(\mu', \phi') d\Omega + \\ & \frac{\bar{\omega}_k}{4\pi} p(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0) \pi F e^{-\tau_k \mu_0} + \\ & (1 - \bar{\omega}_k) B(\tau_k). \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $B(\tau_k)$  是普朗克函数(为书写方便省去了  $k_i$  中  $i$  下标);  $\pi F$  是太阳入射在大气层顶的辐射强度;  $\tau_k$  是大气光学厚度,可以表达为气溶胶光学厚度  $\tau_p$ 、分子散射光学厚度  $\tau_m$  和分子吸收光学厚度  $\tau_{ak}$  之和,  $\bar{\omega}$  是单次散射反照率,  $\bar{\omega}_p$  是气溶胶单次散射反照率,  $p(\mu, \phi; \mu', \phi')$  为散射相函数,可以表达为

$$p(\mu, \phi; \mu', \phi') = \frac{p_p(\mu, \phi; \mu', \phi') \tau_p \bar{\omega}_p P_m(\mu, \phi; \mu', \phi')}{\tau_p \bar{\omega}_p + \tau_m}. \quad (3)$$

采用离散纵标法求解方程(2),解该方程时需要作出下边界条件的海水表面反射特性,在计算海面红外图像时也需要建立海面的反射和发射特性模型.我们在计算中用统计方法考虑了海面波动造成的方向反射率变化.对我们的理论计算来说,采用 Cox-Munk 的海面面元法线方向分布模型<sup>[4,5]</sup>是可以满足要求的,按该模型经统计平均后可得到海面反射率随方向变化的分布函数为<sup>[6]</sup>:

$$\begin{aligned} \rho(\bar{n}_i, \bar{n}_f) = & \frac{1}{2} (\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}) \\ & \frac{1 + \cos\theta_f \cos\theta_i + \sin\theta_f \sin\theta_i \cos(\varphi_f - \varphi_i)}{(\cos\theta_i + \cos\theta_f)^3} \\ & \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{s_x^2(\theta_f, \varphi_f, \bar{n}_i) + s_y^2(\theta_f, \varphi_f, \bar{n}_i)}{\sigma^2}\right]. \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\rho_{\perp}$  和  $\rho_{\parallel}$  分别是偏振方向垂直和平行于入射平面的光在镜面反射情况下的反射率,入射方向用单

位矢量  $\vec{n}_i = (\sin\theta_i, \cos\varphi_i, \sin\theta_i, \cos\varphi_i, \cos\theta_i)$  表示、反射方向用单位矢量  $\vec{n}_j = (\sin\theta_j, \cos\varphi_j, \sin\theta_j, \cos\varphi_j, \cos\theta_j)$  表示。

在大气和海面红外辐射场的计算中需要某些大气参数,如温湿廓线、气溶胶参数、云参数和海洋温度等取自实地观测资料或卫星反演数据。在没有观测资料的情况下,采用 LOWTRAN-7 中相应的大气参数模式。

**1.3 船目标的温度场和红外辐射场<sup>[3]</sup>**

计算船目标的温度场和红外辐射场时,首先需要建立船的几何模型。对多数船只的红外辐射场计算来说,可以用薄壳结构的几何模型描述船的几何外形,经面元分割后,可以把一个船目标用一组面元表示。对每个面元可以根据热传递关系建立能量平衡方程,把大气和海面辐射的计算结果作为前述方程组的边界条件,可以求解各面元的表面温度,即船目标的表面温度场。用得到的表面温度场以及太阳和大气海面背景在指定波段的辐射能流值,可进一步计算出各个面元在该波段的辐射能流。

**1.4 大气传输过程对船目标红外成像的影响**

在大气和海面的红外辐射理论模拟中,传输衰减已经计算在内,所以可以直接获得红外图像。但船目标红外辐射场的计算中未计入从目标到探测器之间的大气衰减和大气辐射的影响,所以在成像计算时,须根据探测器的高度及它与船目标间的距离,修正船目标图像的大气衰减和大气辐射。

**2 红外成像的计算机算法**

用计算机实现上述理论模型时,可以分成 3 大模块:(1)大气传输和海面辐射的计算模块,(2)船目

标温度场和红外辐射场的计算模块,(3)图像合成模块。大气传输和海面辐射模块的计算结果不仅为船目标模块提供环境参数,而且还为背景的红外图像提供大气和海面在某一特定位置的红外辐射能流值。而船目标计算模块则提供了它的三维红外辐射场计算结果。图像合成模块根据探测器与船目标的相对位置,先分别计算出大气海面背景红外辐射的图像和船目标的红外图像,然后把这两幅图像合为一幅,并根据成像过程的物理特性进行适当的修正,从而得到船目标与海天背景合成的红外图像。

**2.1 几何成像的算法**

可以采用几何投影的方法确定像平面上各个像素对应的背景或船目标的面元,同时可以很方便地确定海天线在像平面中的位置,这样就很容易计算大气和海面其它部分的图像。因为大气海面计算模块的图像数据结果是按在某个方向上的辐射能流的形式输出的,所以根据海天线的位置,计算出像平面上各个像素对应的成像天顶角和方位角,即可直接获取它的图像数据。

在已有的船目标计算模块中,可以输出船的三维红外辐射场<sup>[3]</sup>,并且可以按任意方向给出它的图像。在计算它与海天背景合成的红外图像时,只要让已有的程序按正确的位置和大小画出船的图像,然后把成像的数据根据传输特性进行修正,即可得到船目标的正确图像。

**2.2 图像的合成算法**

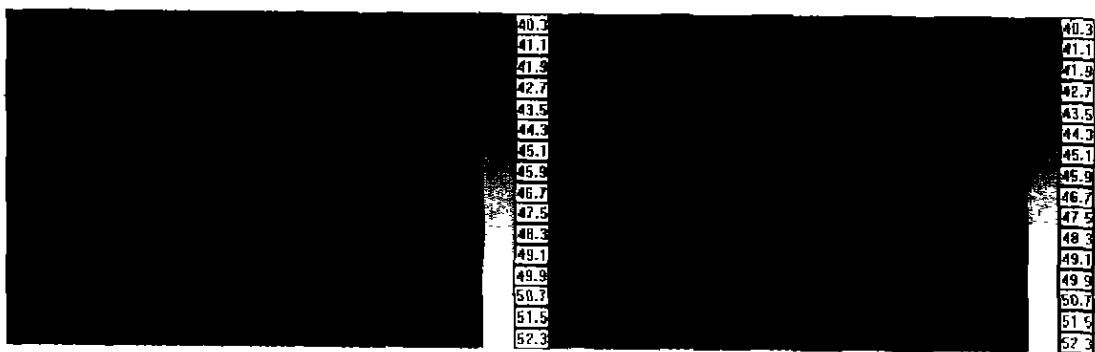
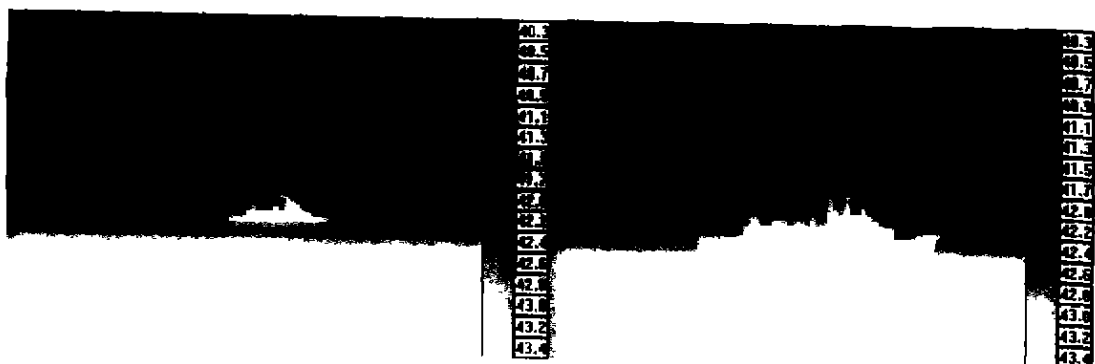
将两幅图像合成为一幅图像,在计算机程序中就是把两个格式相同的图像数据文件合并为一个文件。在生成船目标的图像文件时,采用了把非船体图像的矩阵元素都置为 0 的方法。在把两个图像文件



图 1 某船目标与海天背景在 8~12μm 波段红外图像的合成过程  
(a)大气和海面红外辐射的独立图像 (b)船目标在该环境中红外辐射场的独立图像 (c)合成后的红外图像

Fig. 1 The combining process of the infrared images of a ship and the sea and atmosphere backgrounds in 8~12μm wavelength region

(a) the infrared image of the atmosphere and the sea without target (b) the independent infrared image of the ship in the environment (c) the combined infrared image of the ship and the background

图2 海面目标船正午8~12 $\mu\text{m}$ 波段模拟红外图像Fig.2 Simulated infrared images in 8~12 $\mu\text{m}$  wavelength region of a ship in the sea at noon图3 图2中目标船午夜8~12 $\mu\text{m}$ 波段模拟红外图像Fig.3 Simulated infrared images of the ship in the sea at midnight in 8~12 $\mu\text{m}$  wavelength region

合并时,把两个文件的对应元素进行合并,对某一个图像矩阵元,若船目标的该元素数据不为0,则合并后的该元素就为该数据,否则就为背景文件中该元素的数据.图1是合成计算过程的具体例子.

### 3 模拟图像及讨论

我们用根据上述方案编制的软件对某船目标在海上的红外图像进行了理论模拟,计算采用某一海域8月份大气参数作为外界条件,图象参数是根据特定的用户要求确定的,可以根据需要改变.图2和3分别是针对正午和半夜的情况计算的8~12 $\mu\text{m}$ 波段的对应于不同距离的红外图像.每组选取了两幅,分别对应于探测器和船目标间距离为15.5和6.5km的情况.图2模拟的是探测器从船目标正前方偏45°向船推进时得到的系列图像,而图3是从船目标后方偏45°向船推进时得到的系列图像.

计算得到的图像用256级灰度级表示探测器像平面上接收到的辐射量,色标上的数值表示的是辐射通量( $\text{W}/\text{m}^2\text{S}_\lambda$ ),显示图像时采用相对关系,即对某一幅红外图像,可以根据图像中的最大通量和最

小通量确定它们与灰度间的对应关系.当对探测器的一个完整轨道计算系列的图像时,可以使所有的图像采用统一的色标,这与实际热像仪的功能是一致的.仔细分析这两组图像,可以发现,尽管对应于午夜船目标红外图像显得比较清晰,但实际上它与背景的对比度要比白天小.

从图像中可以看出,随着距离的接近,船体的热像不仅在几何结构上越来越清楚,而且在温度的对比上也有所提高,这是因为在计算中我们已经计入大气衰减和程辐射的影响,其中,大气衰减的作用更为主要.如果气候条件较差,则大气衰减对热像的影响将更大,这一理论计算结果是与实际热像规律是一致的.

值得一提的是,上述的模拟图像还不是经探测器成像后输出的图像,因为本文并未计入探测器对信号的响应和光电转换等过程,所以可以把上述图像视为到达探测器屏上的信号.在仿真研究中,可对具体的探测器用它的模拟响应曲线对上述图像进行探测器修正,以得到输出端的图像信号.

#### 4 结论

对船目标与海天背景合成的红外辐射成像的理论模拟原理和计算方法进行了研究,并据此建立了相应的计算机软件,计算了一些典型情况下船目标在海天背景中的红外图像.这一成果对舰船红外探测的仿真研究具有重要意义,并可以为目标识别、红外隐身等领域提供研究的工具.得到的理论模型还需要与实验测量进行比较并根据结果进行修正,这项工作尚在进行中.

#### REFERENCES

- [1] ZHU Wen-Yong, GAO Jing, ZHOU Gang-Hui, *et al.* The simulation of infrared imaging of the ship, *J. Infrared Millim. Waves* (朱文勇, 高景, 周刚慧, 等. 舰船红外成像模拟. 红外与毫米波学报), 1998, 17(2): 129—133
- [2] YANG Bao-Cheng, SHEN Guo-Tu, HONG Zong-Qing, *et al.* Geometric modeling in infrared image simulation of targets on the sea. *Journal of East China Normal University (Natural Science)* (杨宝成, 沈国土, 洪镇青, 等. 海面目标热像理论模拟中的几何构型问题. 华东师范大学学报(自然科学版)), 2001, 1: 61—66
- [3] YANG Bao-Cheng, SHEN Guo-Tu, Mao Hong-Xia, *et al.* The theoretical simulation and computer software of infrared radiation fields of targets on the sea. *Chinese Journal of Computational Physics* (杨宝成, 沈国土, 毛宏霞, 等. 海面目标红外辐射场的理论模拟方法和计算机软件. 计算物理), 2001, 18(2): 133—138
- [4] Cox C, W Munk. Statistics of the sea surface derived from sun glitter. *J. Mar Res.*, 1954, a(43): 198—227
- [5] Cox C, W Munk. Measurement of the Roughness of the Sea Surface Photographs to the Sun's Glitter. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1954, 44: 838—850
- [6] MAO Hong-Xia, YANG Bao-Cheng, SHEN Guo-Tu, *et al.* The study of the reflection feature of the sea. *Journal of East China Normal University (Natural Science)* (毛宏霞, 杨宝成, 沈国土, 等. 海面反射特性的研究. 华东师范大学学报(自然科学版)), 2000, 3: 56—61