

海上目标红外辐射特性测量数据处理系统设计

张卫国 张则剑 贾娜

(91550 部队 42 分队 辽宁 大连 116023)

摘要: 针对海上动态目标红外辐射测量精度评估问题,分析了影响红外辐射测量误差的主要因素,重点研究了针对试验海域系统外场定标方法、大气辐射传输修正方法、背景杂散辐射模型,提出了海上动态目标红外辐射测量数据分析处理系统的设计方法,为海上飞行目标红外辐射特性测量系统建设有一定的指导意义。

关键词: 红外辐射定标; 大气辐射修正; 背景杂散辐射; 数据分析处理

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.07.011

Design of data processing system for sea-target infrared radiation characteristic measurement

ZHANG Wei-guo ZHANG Ze-jian JIA Na

(Unit 91550 of PLA ,Dalian 116023 ,China)

Abstract: Aiming at the measurement accuracy evaluation of marine dynamic target infrared radiation ,the main factors that affect the infrared radiation measurement error were analyzed ,sea system calibration method ,the correction method of atmospheric radiation transfer and background infrared radiation model were studied in detail. A design method on data analysis and processing system of infrared radiation measurement for marine dynamic target was proposed. It has a certain guiding significance for the measurement system of infrared radiation characteristics for maritime flight target.

Key words: calibration infrared radiation; the correction of atmospheric radiation; background infrared radiation; data analysis and processing

1 引言

目标红外辐射特性测量为目标识别提供目标辐射亮度、辐射温度及辐射强度等重要特征信息,同时为目标探测与识别设备的波段优化设计和探测能力分析提供依据,为此国内外对目标红外辐射特性测量技术的研究高度重视,研究工作主要有仿真计算和现场试验两种手段,国外在目标红外辐射特性研究中进行得较早。在仿真计算方面^[1],欧美国家在空中目标红外辐射特性的研究上已有了较完整的模拟软件;在现场试验方面,美国、欧洲等国装备了多

台大口径地基红外望远镜用于空间目标的红外辐射特性测量,在获得目标形体特征的同时,还可得到目标的温度分布图和测量精度优于10%的辐射强度分布图。国外目标红外辐射特性测量以及大气传输修正模型建立上已经达到了较高的水平。国内已开展红外辐射特性相关研究,配置了多台红外辐射特性测量设备,这些红外辐射特性测量设备多布站在内陆地区,采集了大量的内陆地区气象参数并进行了相应的红外辐射特性测量试验,取得了一定的技术积累^[2],但是海洋气候条件下的目标红外辐射特

作者简介:张卫国(1968-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向靶场光电测量技术应用。E-mail: zwg222@126.com
收稿日期:2017-11-20; 修订日期:2017-12-15

性测量相关研究开展得较少,鉴于后续对红外目标特性测量的需求,因此开展海洋环境下红外辐射特性测量研究十分必要。

海域环境对目标红外辐射特性测量的影响更为突出^[3],主要影响因素有:红外辐射测量系统热稳定性、大气辐射传输特性、海域背景的杂散辐射等,因此研究测量数据分析处理方法,设计海上动态目标红外辐射数据分析处理系统显得尤为重要。本文在国内红外辐射定标方法、试验海域大气辐射传输修正方法、试验海域背景杂散辐射研究的基础上,提出并设计了海上动态目标红外辐射数据分析处理系统,用于完成海上目标红外辐射测量数据的综合分析处理,为海上飞行目标红外辐射特性测量系统建设提供关键的技术支持,为后续红外辐射特性测量体系建设奠定基础。

2 系统总体设计

2.1 系统功能

- (1) 数据预处理功能;
- (2) 红外测量系统的辐射定标数据处理功能;
- (3) 海域大气环境光学参数数据处理功能;
- (4) 红外辐射特性数据分析处理功能;
- (5) 红外辐射特性数据处理结果回放与输出功能;
- (6) 系统管理功能。

2.2 系统组成

系统组成包括数据预处理分系统、红外辐射定标数据处理分系统、红外辐射大气传输数据修正分系统、试验海域背景杂散辐射修正分系统、红外辐射特性数据处理分系统及系统管理模块,如图1所示。

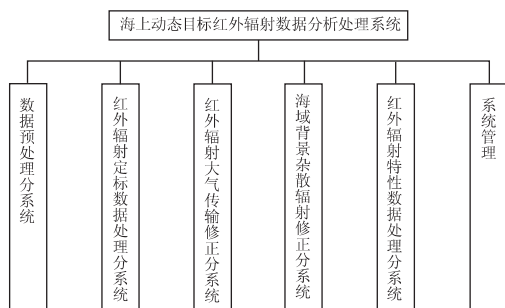


图1 系统组成结构框图

Fig. 1 System comprises diagram

(1) 数据预处理分系统

该分系统用于完成外部数据的格式化及预先检

查等工作,主要包括图像命名、目标弹道的格式、辐射定标文件的命名、大气光学测量数据的整理等。

(2) 红外辐射定标数据处理分系统

该分系统用于处理红外探测器外场试验环境条件下的辐射定标数据,以确定红外探测器的辐射响应度及系统内部自身的热辐射。

(3) 试验海域红外辐射大气传输修正分系统

试验海域红外辐射大气传输修正模块用于处理试验海域的大气环境参数,构建大气辐射模式,进而获取弹道路径上的大气透过率和大气程辐射。

(4) 试验海域背景杂散辐射修正分系统

试验海域背景杂散辐射修正模块用于处理试验海域海洋环境参数和海面物性参数,构建多尺度海面几何模型,进而获取海面自身红外辐射及海面对阳光、大气辐射的散射。

(5) 红外辐射特性数据处理分系统

该分系统用于对目标红外图像进行处理,获取目标图像灰度,通过反演计算,结合大气传输修正和海面杂散辐射修正,获得目标的温度、辐射强度及辐射亮度等红外辐射特性。

(6) 系统管理

软件系统的运行配置管理由系统管理模块实现,负责用户管理、权限管理、日志管理、系统参数管理等功能。

2.3 系统工作原理

目标红外辐射特性测量在红外系统辐射定标和大气环境光学参数修正的基础上,利用红外测量系统获得的目标红外图像,通过辐射反演算法计算出目标温度、强度和亮度等辐射特性数值。具体实施步骤如下:

任务前,利用红外辐射定标分系统对红外跟踪测量系统进行黑体辐射定标,获得黑体的辐亮度与红外图像灰度值之间的线性关系即红外系统的辐射响应度以及红外系统内部的杂散辐射大小。

任务时,红外跟踪测量系统捕获跟踪目标并记录图像,完成测量任务段落,同时利用大气环境光学特性测量分系统实时测得试验海域的大气环境光学参数。

任务后,再次利用红外辐射定标分系统对红外跟踪测量系统进行定标,记录数据。事后对所获得大气数据和定标数据进行分析处理,再通过对红外

图像反演计算获得目标的红外辐射亮度、强度和温度等辐射特性。系统流程图如图2所示。

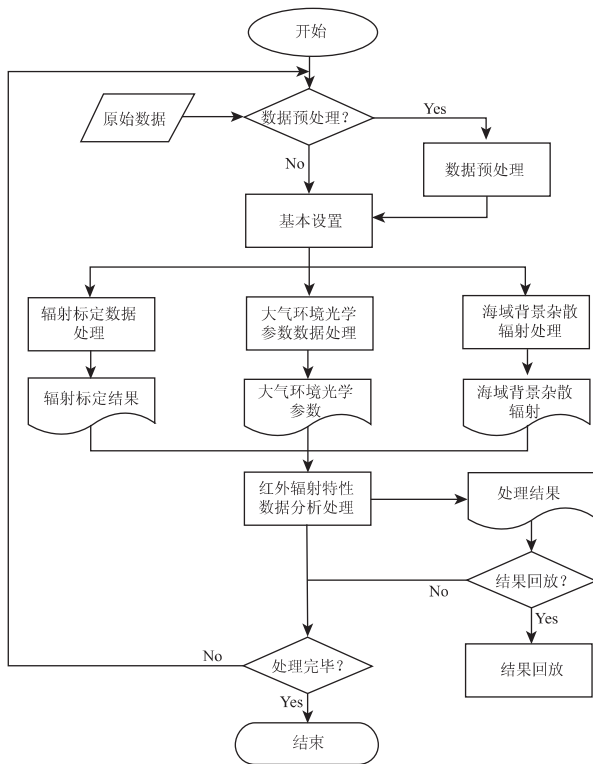


图2 系统流程图

Fig.2 System flowchart

3 分系统设计

3.1 数据预处理分系统设计

由于系统外部输入数据来源不一,数据定义、格式规范并不统一,数据预处理分系统主要实现外部输入数据的规范化,形成可供系统使用的统一数据源。

数据预处理系统用于以下数据的规范化:

(1) 红外图像: 主要提供红外图像命名格式的规范化,以便于系统数据处理过程中的图像检索。

(2) 目标弹道: 数据处理过程中,涉及到的目标弹道参数主要包括目标的位置参数和姿态参数,其中位置参数来自外弹道处理结果,而姿态参数来自内弹道处理结果,这两个结果分别来自不同的文件,为方便使用,需要进行数据格式和量纲的转换,形成统一的目标弹道文件。

(3) 辐射定标数据: 主要针对不同装备定标时采用的结果文件命名格式的差异,对辐射定标结果文件进行统一的规范命名,同时预先检查定标数据的合理性,对不符合定标要求的数据进行剔除。

3.2 辐射定标数据处理分系统设计

辐射定标数据处理分系统负责红外测量系统自身杂散辐射计算、辐射定标相关参数的计算、定标结果数据的分析处理等。主要功能包括:

- (1) 红外相机温度亮度对应关系计算;
- (2) 红外图像各波段饱和点计算;
- (3) 红外系统辐射线性响应区间计算;
- (4) 红外图像非均匀校正计算;
- (5) 红外系统自身杂散辐射量计算;
- (6) 为其他分系统提供定标结果接口。

3.3 红外辐射大气传输修正分系统设计

红外辐射大气传输修正分系统负责试验海域大气环境光学测量数据的分析处理,并按统一结果格式为其他分系统提供大气环境光学特性数据服务。主要功能包括:

(1) 大气模式构建,主要实现逐月平均的气溶胶消光系数路径分布、当地逐月平均的气溶胶荣格指数、试验海域分时段的能见度、试验海域分时段的平均温度、湿度、气压、风速、风向参数、分时段水汽总量和气溶胶光学厚度等大气参数的计算。

(2) 大气透过率计算,实现海面大气水平非均匀分布情况下海上目标红外辐射的大气透过率计算。

(3) 大气程辐射计算,主要实现大气对太阳辐射的单次散射、大气对热辐射和太阳辐射的多次散射及大气自身热辐射计算。

(4) 为其他分系统提供环境光学结果接口。

3.4 海面杂散辐射修正分系统设计

海面杂散辐射修正分系统负责试验海域海面杂散辐射测量数据的分析处理,并按统一结果格式为其他分系统提供海面杂散辐射结果数据服务。主要功能包括:

(1) 海面杂散辐射计算,主要实现海面自身热辐射、海面对天空背景辐射的散射、海面对太阳辐射的散射和海面上空大气路径辐射计算;

(2) 为其他分系统提供环境光学结果接口。

3.5 红外辐射特性数据处理分系统设计

该分系统负责对目标及背景环境的红外辐射特性数据进行综合分析计算、结果的输出与回放等,由基本设置模块、信息显示模块、数据处理模块、结果回放模块等构成。主要功能包括:

(1) 基本设置功能,主要对数据处理所需的试验信息、装备信息、目标信息、定标信息、大气环境信息、海面杂散辐射信息及结果输出信息等进行初始设置。

(2) 信息显示功能,主要根据基本设置,显示数据处理时需要用到的各类信息,主要包含红外测量装备详细信息、目标详细信息、定标相关信息、大气环境信息及海面杂散辐射信息等。

(3) 数据处理功能,主要根据用户选择的处理模式、目标提取方式,实现红外图像的红外辐射特性处理,并实时显示当前图像的结果信息及所有已处理图像的结果列表信息。

(4) 处理结果包括图像时间、帧频、焦距、目标位置、目标灰度信息、背景信息及红外特性等。

①数据回放功能,主要实现处理结果的回放与进度控制,以使用户可以方便的查看数据目录中的任意图像信息。

②结果输出功能,主要实现数据处理结果的输出和保存。

3.6 分系统间的数据流程

各分系统之间数据流程如图3所示。

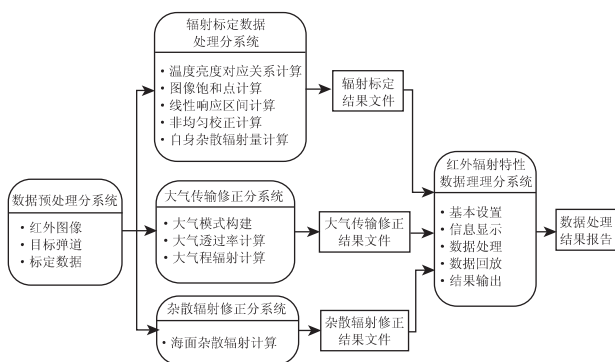


图3 分系统之间数据流程

Fig.3 Subsystem dataflow

4 关键技术

4.1 海域红外辐射定标技术

首先基于现有的研究基础,确定辐射定标的方法,其次采用内、外定标相结合的方法,制定内、外定标实验方案,在实验室与外场(海域)条件下选择典型环境条件进行实验,积累定标数据;最后,通过分析系统定标精度的影响因素,构建定标误差修正的数学模型并验证。

红外系统辐射定标按工作环境分为:实验室定标及外场定标两种方式。其中实验室定标是在实验

室稳定环境下进行,定标数据重复稳定性好。外场定标是指在外场环境下,目标图像采集前或采集后进行的辐射定标,外场定标数据包含了外场环境影响,操作过程复杂。定标的方法分内定标、外定标以及内外相结合的定标。外定标部分主要由高精度面源黑体(常温~150℃)、支撑机构(具有升降、平移及锁紧功能)以及配套设备组成;内定标部分由高温腔型黑体(常温~1200℃)、切换反射镜以及配套设备组成,通过移入和移出切换反射镜实现高温腔型黑体的辐射能引出及引入红外光学系统,实现红外系统工作状态和定标状态的切换。在温度重合段(常温~150℃),利用内定标和外定标数据计算得到主、次镜透过率和辐射常数,再利用所得主、次镜透过率和辐射常数对内定标的数据进行修正,使用修正后的定标数据实现全系统、全动态范围内的辐射定标。

外定标的数学模型为:

$$DN = t \cdot (G_w \cdot \varepsilon_{bs} \cdot L_b + h_w^{out}) + h_w^{in} \quad (1)$$

式中 DN 为探测器像元灰度值; t 为相机的积分时间; G_w 为外定标时像元对黑体辐射亮度响应率; ε_{bs} 为面源黑体的发射率,这里取0.97; L_b 为辐射亮度,可以根据普朗克公式计算得到; h_w^{out} 为外定标系统内部杂散辐射引起的灰度响应; h_w^{in} 为探测器暗电流引起的灰度响应。

根据外定标数据中积分时间与像元灰度值之间的关系曲线可以获得外定标模型中的3个未知参数 G_w 、 h_w^{out} 和 h_w^{in} 。

内定标的数学模型为:

$$DN = t \cdot (G_n \cdot \varepsilon_{bc} \cdot L_b + h_n^{out}) + h_n^{in} \quad (2)$$

式中 DN 为探测器像元灰度值; t 为相机的积分时间; G_n 为内定标时像元对黑体辐射亮度响应率; ε_{bc} 为高温腔型黑体的发射率,这里取0.99; L_b 为辐射亮度,可以根据普朗克公式计算得到; h_n^{out} 为内定标系统内部杂散辐射引起的灰度响应; h_n^{in} 为探测器暗电流引起的灰度响应。

定标实验分为实验室定标与外场定标,获取不同环境条件下的实验数据,为定标精度分析和定标模型修正奠定基础。其中实验室定标将红外系统和黑体都放入高、低温箱内,黑体放置在红外系统前,充满红外系统的视场,设置高、低温箱的温度范围0~50℃,以5℃为间隔,在不同环境温

度下对红外系统进行辐射定标。同时使用温度传感器(温度精度为0.1℃)监测高、低温箱内的环境温度,由于高、低温箱存在温控误差,以温度传感器显示的温度值为高、低温箱内部温度基准值。室外定标选择不同季节典型外场使用环境条件,用标准面源黑体进行大量定标实验,记录实验数据,同时记录环境参数(温度、湿度、气压、风向、风速、太阳高角)。

对应于某红外系统,采用不同积分时间、不同的衰减片,选择一定的温度区间,在不同环境温度下进行定标实验,对试验数据,按照相同条件进行归类,并作数学拟合处理,得到定标精度修正模型。设系统自身杂散辐射为 $R_z(T_i)$,室内定标实验数据 $DN_{ni}(T_i)$,外场定标实验等数据 $DN_{wi}(T_i)$,其中 T_i 是环境温度,修正量是三个量的综合值,表达式如下:

$$\Delta = RZ(T_i) + DN_{ni}(T_i) + DN_{wi}(T_i) \quad (3)$$

4.2 海域红外辐射传输修正模型

通过在试验海域布设两套大气辐射传输测量系统,采集大气光学参数,以建立试验海域的大气模式提供实测海面大气数据(温度、湿度、气压、能见度、气溶胶荣格指数、消光系数路径分布),基于中科院安徽光机所研制的通用大气辐射传输软件(CART)^[4]进行修正,得到观测路径上模型大气透过率计算模型,并通过海域的实验进行验证。

(1) 大气模式构建

利用Mie散射激光雷达获取气溶胶消光系数的路径分布,根据大量实测数据,统计得到逐月平均的气溶胶消光系数路径分布曲线;利用粒子计数器实时测量当地气溶胶谱分布的荣格指数,统计得到当地逐月平均的气溶胶荣格指数;利用水平能见度仪实时测量当地能见度,统计得到当地的分时段能见度;)利用全自动气象站实时测量当地的地面气象参数,统计得到当地分时段平均温度、湿度、气压、风速和风向参数;)利用太阳辐射计测量整层大气的气溶胶光学厚度和水汽总量,统计得到分时段的水汽总量和气溶胶光学厚度。

(2) 大气透过率计算^[5]

单色大气透过率的计算包括大气分子吸收、分子连续吸收和辐射、气溶胶衰减^[6]的计算三部分。该模型的关键为大气分子吸收模型和气溶胶消光模

型的建立。

大气总的透过率为各部分透过率的乘积,即:

$$T = \sum_{j=1}^7 T_{mole_j} \times T_{cont} \times T_{sre} \quad (4)$$

给定光谱响应函数 $f(v)$,则波段范围 $V_1 \sim V_2$ 的平均大气透过率为:

$$\bar{T} = \frac{\int_{V_1}^{V_2} T \cdot f(V) \cdot d\Delta v}{\int_{V_1}^{V_2} f(V) \cdot d\Delta v} \quad (5)$$

4.3 海域红外杂散辐射修正模型

海面对太阳散射大小与太阳对海面的辐射相关,海面对天空的散射大小与天空对海面的辐射有关,海面自身辐射可以通过黑体辐射理论进行计算。海面上空路径辐射以及所有散射辐射在海面上空路径的衰减都可以通过上面的辐射传输特性软件计算。通过建立基于面元结构的海面模型,以及在其上设置的探测器与太阳、天空背景相对位置关系,便可算出探测器接收到的海面红外辐亮度^[7]。

海面在探测器上产生的光谱辐射总量 $N_{t(\lambda)}$ 可以表示成如下形式:

$$N_{t(\lambda)} = \tau(\lambda) \varepsilon(\lambda) N_{bb}(\lambda, T_{sea}) + \tau(\lambda) \rho(\lambda) N_{sky}(\lambda) + \tau(\lambda) \rho(\lambda) N_{sun}(\lambda) + N_A(\lambda) \quad (7)$$

式中, $\tau(\lambda)$ 是海面与探测器间的大气光谱透过率; $\varepsilon(\lambda)$ 是海面的光谱发射率; $N_{bb}(\lambda, T_{sea})$ 是海面温度为 T_{sea} 的黑体光谱辐射; $\rho(\lambda)$ 是海面的光谱反射率; $N_{sky}(\lambda)$ 是天空的光谱辐射; $N_{sun}(\lambda)$ 是太阳的光谱辐射; $N_A(\lambda)$ 是探测器和海面之间的大气路径光谱辐射。

光谱段的平均值可以替代方程中的所有光谱项,故得到方程:

$$\bar{N}_t = \bar{\tau} \bar{\varepsilon} \bar{N}_{bb}(T_{sea}) + \bar{\tau} \bar{\rho} \bar{N}_{sky} + \bar{\tau} \bar{\rho} \bar{N}_{sun} + \bar{N}_A \bar{\varepsilon} + \bar{\rho} = 1 \quad (8)$$

其中,大气路径光谱辐射由辐射传输特性软件计算。

海面自身辐射的计算,是由海面发射率 ε 乘以黑体辐射 $\bar{N}_{bb}(T_{sea})$ 值得到的,在这里将海面当作黑体处理,其计算公式如下:

$$N_{sea} = \varepsilon(\omega) \bar{N}_{bb}(T_{sea}) \quad (9)$$

其中 $\varepsilon(\omega) = \varepsilon(\phi_e, \theta_e)$,黑体辐射 $\bar{N}_{bb}(T_{sea})$ 采用普朗克黑体辐射定律计算,将普朗克定律对 (λ_1, λ_2) μm 波段积分即可得到黑体辐射 $\bar{N}_{bb}(T_{sea})$:

$$\bar{N}_{bb}(T_{sea}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_b(\lambda, T_{sea}) d\lambda \quad (10)$$

计算探测器接收到的海面反射的太阳辐射亮度^[8]:

$$N_{sun} = \bar{\rho} \bar{N}_{sun} \quad (11)$$

其中 $\bar{\rho} = \bar{\rho}(\vec{n}_i, \vec{n}_r)$ 。而要计算海面对太阳辐射的反射,就要判断小波面是否反射了太阳直射辐射,首先计算太阳与小波面中心之间的单位矢量 r_1 ,然后根据反射定律计算 r_1 的反射线矢量 r_2 ,计算探测器与小波面中心的单位矢量 r_3 , r_2 和 r_3 相等,就说明小波面反射了太阳直射辐射。为了简化计算过程,这里采用另一种方法,设探测器的坐标为 (x, y, z) ,每个像素可见小波面的中心坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,小波面的法向矢量为 $(-s_x, -s_y, 1)$,计算出小波面中心坐标到探测器的单位矢量(小波面中心指向探测器)。

假设太阳的天顶角为 h_0 ,太阳方位角为 A_0 。根据反射线的天顶角和方位角以及太阳的天顶角和方位角就可以计算出小波面反射太阳辐射,计算探测器上接收的阳光反射亮度可以用公式:

$$\bar{N}_{sun} = N'_{sun} p(S_{xref}, S_{yref}) / \pi$$

$$p(S_{xref}, S_{yref}) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{(h_0 - S_{xref})^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(A_0 - S_{yref})^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

$$\sigma_x^2 = 0.003 + 0.00192 U$$

$$\sigma_y^2 = 0.00136 U \quad (12)$$

其中 N'_{sun} 为太阳在海面处的辐照度(由 Modtran 软件计算); $p(S_{xref}, S_{yref})$ 表示能反射太阳的斜率出现的概率, σ^2 是海面坡度概率分布的方差,描述了海面的粗糙程度,它和海面上的风速 U 具有一定联系,在风速低于 14 m/s 的前提下, σ^2 与风速之间表现出线性关系,其中的风速指海面上方 12.5 m 处的风速。

海面反射天空辐射计算:天空背景辐射不同于太阳直射辐射,海面某处接受到的天空背景辐射来自整个半球空间。海面对天空背景辐射的反射计算时,需要对入射的天顶角和反射角进行积分,得到海面对整个半球天空背景辐射的反射值,即:

$$N_{sky} = \bar{\rho} \bar{N}_{sky}$$

$$\bar{N}_{sky} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_{sky}(\theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (13)$$

其中, $L_{sky}(\theta, \phi)$ 为某方向上观察到的天空背景辐

亮度(由 Modtran 软件计算); θ 为观察天顶角; ϕ 为观察方位角; \bar{N}_{sky} 为海面对天空背景辐射的反射辐射亮度。

在计算出海面背景的各部分红外辐射后,即可建立海面背景红外杂散辐射模型。

5 实验结果与分析

实验分两部分内容,系统外场标校修正模型验证实验和大气辐射传输衰减模型验证实验。其中系统外场标校修正模型验证实验选择春季、夏季和冬季三个季节,实验日选择早、中、傍晚三时间段进行实验,采用中波热像仪与常温黑体(25 ~ 100 °C),实验地点在大连旅顺海域,实验结果显示:在通常的气象条件下,通过修正后海域环境下定标精度能满足 10% 要求。大气辐射传输衰减模型验证实验,基于大连旅顺海域一年气象水文数据和太阳辐射计、激光雷达采集数据建立某局部海域的大气模式,如图 4 给出实验海域 5 月份 10 年气象平均统计值,实验装置为中波红外热像仪和中温黑体(50 ~ 400 °C),实验装置图如图 5 所示。距离 8 km,利用 CART 软件进行计算透过率与实测值进行比较显示:在通常的气象条件下,CART 软件进行计算结果更接近实测值。目前未完成海上杂散辐射模型验证实验。

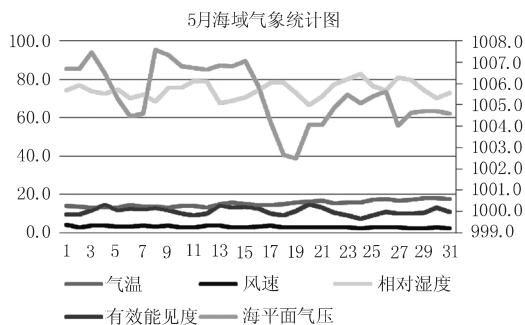


图4 5月海域气象统计图

Fig. 4 Sea Meteorological Statistics of a month



图5 大气辐射传输模型验证实验装置图

Fig. 5 Equipment drawing of radiation transfer experiment

6 结 论

基于红外辐射特性测量系统的外场标校修正和大气辐射传输衰减两个模型,以及海上杂散辐射仿真计算^[8-9],设计了海上动态目标红外辐射测量数据分析处理系统,经仿真研究验证系统功能可实现,可提高海上动态目标红外辐射测量精度,为后续的工程实践奠定了基础。

参考文献:

- [1] XING Qianglin ,TAN Qian ,TANG Jia. Overview of optical signature measurement systems of USA [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology ,2007 ,26(1) : 7 - 12. (in Chinese)
邢强林 ,谭谦 ,唐嘉. 美国光学特性测量技术发展情况及特点. [J]. 飞行器测控学报 ,2007 ,26(1) : 7 - 12.
- [2] LIU Dandan ,HUANG Yinbo ,DAI Congming ,et al. Calculation of upper atmospheric transmittance and radiation in mid-infrared region [J]. Infrared and Laser Engineering , 2013 ,42(9) : 2324 - 2329. (in Chinese)
刘丹丹 ,黄印博 ,戴聪明 ,等. 中红外波段高空大气传输透过率及热辐射计算 [J]. 红外与激光工程 ,2013 ,42(9) : 2324 - 2329.
- [3] ZHANG Weiguo ,LIU Wenpeng ,ZHANG Rui. Research on infrared radiation scattering characteristics in the sea background [J]. Journal of Naval Academy ,2017 ,(4) : 51 - 55. (in Chinese)
张卫国 ,刘文鹏 ,张锐. 海面背景红外杂散辐射模型研究 [J]. 海军大连舰艇学院学报 ,2017 ,(4) : 51 - 55.
- [4] WEI Heli ,CHEN Xiuhong ,RAO Ruizhong. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics ,2007 ,2(6) : 446 - 450. (in Chinese)
魏合理 ,陈秀红 ,饶瑞中. 通用大气辐射传输软件 CART 介绍 [J]. 大气与环境光学学报 ,2007 ,2(6) : 446 - 450.
- [5] Berk A ,Anderson G P ,Achsrya P K ,et al. MODTRAN4 user s manual [M]. Hanscom AFB MA: Air Research Laboratory Space Vehicle Directorate Air Force Material Command ,1997.
- [6] LI Lifang. The study of atmospheric aerosol particles scattering impact on laser propagation in the atmosphere [D]. Taiyuan: North University of China ,2013. (in Chinese)
李丽芳. 大气气溶胶粒子散射对激光大气传输影响的研究 [D]. 太原: 中北大学 ,2013.
- [7] LI Dazhao. Study of Infrared radiation and scattering characteristics of sea surface [D]. Xi'an: Xidian University , 2013. (in Chinese)
李大钊. 海面红外辐射与散射特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学 ,2013.
- [8] CHEN Lu. Infrared radiation characteristics modeling and simulation of sea surface [D]. Xi'an: Xidian University , 2013. (in Chinese)
陈璐. 海面红外辐射特性建模与仿真 [D]. 西安: 西安电子科技大学 ,2013.
- [9] LI Jianxun ,TONG Zhongxiang ,WANG Chaozhe. Calculation and image simulation of aircraft infrared radiation characteristic [J]. Acta Armamentaria ,2012 ,33(11) : 1310 - 1318. (in Chinese)
李建勋 ,童中翔 ,王超哲. 飞机目标红外特性计算与图像仿真 [J]. 兵工学报 ,2012 ,33(11) : 1310 - 1318.