

文章编号 1004-924X(2012)07-1626-10

## 基于大气透过率比例校正的目标辐射测量

杨词银<sup>1\*</sup>, 张建萍<sup>1</sup>, 曹立华<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 大气透过率是影响目标辐射测量精度的重要因素, 而常规通过 MODTRAN 等模式计算软件, 由大气参数计算大气透过率的误差一般在 15% 以上, 极大地限制了目标辐射测量精度。为此, 本文提出利用某一距离的实测大气透过率和模式计算大气透过率之比得到大气透过率校正系数来对其它距离的模式计算大气透过率进行比例校正。实验显示, 校正后大气透过率的精度优于 8.1%, 大大提高了目标辐射测量精度。利用中波红外相机和面源黑体开展了目标辐射特性测量实验, 结果表明, 采用 MODTRAN 计算大气透过率的辐射测量方法得到的目标辐射反演精度约为 20%, 而采用本文方法对大气透过率校正后可将反演精度提高到 10% 以内。

**关键词:** 辐射测量; 大气透过率; 面源黑体; 比例校正; 辐射反演

**中图分类号:** TP732.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122007.1626

## Infrared radiation measurement based on proportional corrected atmospheric transmittance

YANG Ci-yin\*, ZHANG Jian-ping, CAO Li-hua

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: yangciyin@sina.com*

**Abstract:** Atmospheric transmittance is an important factor affecting the radiation measurement precision. Generally, the error of conventional atmospheric transmittance calculated from atmosphere parameters by using a atmosphere model calculation software such as MODTRAN is above 15%, which limits the target radiation measurement precision greatly. Therefore, a new radiation measurement method was proposed, by which the ratio between the really-measured atmospheric transmittance and the calculated one for a distance was taken to obtain an atmospheric transmittance correction coefficient. Then, the correction coefficient was used to correct atmospheric transmittances of other measurement distances. Experiments show that the precision of the corrected atmospheric transmittance is better than 8.1%, which improves the target radiation measurement precision greatly. A radiation measurement experiment was performed by using a midwave infrared camera and a blackbody, and the

收稿日期: 2012-01-28; 修订日期: 2012-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 61007009)

results show that the radiation inversion precision obtained by the conventional method is about 20% and the precision obtained by the proposed method using the corrected atmospheric transmittance has been better than 10%.

**Key words:** radiation measurement; atmospheric transmittance; blackbody; proportional correction; radiation inversion

## 1 引言

目标红外辐射测量是获取目标特征、进行目标识别的重要手段之一,它可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,同时可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<sup>[1-3]</sup>。

在大气中测量目标的红外辐射特性时,大气分子和气溶胶将对目标辐射产生吸收和散射作用,同时大气自身辐射也将叠加到目标辐射上。因此,为得到目标自身辐射信号,需要获得红外测量设备与目标之间的大气透过率和大气程辐射,以便对目标测量数据进行大气修正<sup>[4]</sup>。

大气透过率测量一般可分为间接模式计算方法和直接实测方法。模式计算方法是通过对MODTRAN等大气辐射传输计算软件,利用典型大气模式由地面能见度、大气温湿压等大气参数来计算某一段距离的大气透过率。例如,魏合理等对目标红外辐射的大气衰减模型进行了分析,讨论了大气透过率模式计算方法和精度<sup>[5]</sup>。陈秀红等利用自主研发的CART大气辐射计算软件由大气温湿压、能见度、距离等参数计算大气透过率<sup>[6]</sup>。董仁杰等对MONTRAN模型内嵌的6种大气模式的主要特性差异进行了分析,并分析了主要参数如水汽、气温等对热红外波段大气透过率和程辐射计算的影响<sup>[7]</sup>。由于某些大气参数如气溶胶消光系数、水汽含量的测量精度不高,并且用典型大气模式难以完整描述大气状况,模式计算大气透过率误差一般在15%以上,气象条件比较恶劣的情况下甚至超过30%<sup>[5]</sup>,难以满足高精度目标红外辐射测量要求。

直接实测大气透过率法是利用红外测量设备对某一距离的参考红外辐射源如标准黑体进行测量,根据黑体测量值、黑体辐亮度以及红外设备辐射响应度来得到这段距离的实测大气透过率。如宫伏安等为实现对舰船等目标的红外特性测量,

设计了海面水平大气透过率测量系统,用于对目标测量数据提供大气修正<sup>[8]</sup>。吴荣华等利用自主研发的激光后向散射遥感式测试仪实测1 060 nm波长激光的大气透过率,并同步反演计算了临近波长的大气透过率<sup>[9]</sup>。詹杰等利用整层大气透过率测量仪测量可见到近红外波段的整层大气透过率<sup>[10]</sup>。杨词银等利用位于目标附近的面源黑体测量红外设备与目标之间的大气透过率,由此提高目标辐射测量精度<sup>[11]</sup>。李云红等利用目标附近的标准黑体对红外热像仪进行大气透过率二次修正<sup>[1]</sup>。实测大气透过率精度通常可达到10%以内,大大优于模式计算方法<sup>[11]</sup>。但是实测大气透过率只适用于对固定距离静止目标进行红外特性测量的情况,而且当目标较远时需要较大的面源黑体,在工程上难以实现。

本文提出一种基于大气透过率比例校正的目标辐射测量方法,利用某一距离的实测大气透过率和模式计算大气透过率之比,得到大气透过率校正系数,借此对其它距离的模式计算大气透过率进行校正,由此提高大气透过率精度和目标辐射反演精度。

## 2 目标红外辐射测量模型

### 2.1 测量模型

红外测量设备对目标进行测量时,在设备线性响应范围内目标辐射测量模型为:

$$G_t = \alpha[\tau_a L_t + L_a] + G_0, \quad (1)$$

式(1)中, $G_t$ 为红外测量设备的输出值, $\alpha$ 为红外测量设备的辐亮度响应度, $L_t$ 为被测目标辐亮度, $\tau_a$ 、 $L_a$ 分别为目标与红外测量设备之间的大气透过率和大气程辐射。 $G_0$ 是由红外设备自身光机结构热辐射、背景辐射以及探测器暗电流等引起的偏移值。

由式(1)可反演得到目标辐亮度

$$L_t = \left[ \frac{G_t - G_0}{\alpha} - L_a \right] / \tau_a, \quad (2)$$

式(2)中,红外测量设备辐亮度响应度  $\alpha$  和偏移值  $G_0$  可通过对设备进行辐射定标获得。

## 2.2 辐射反演精度分析

由式(2)可知,目标辐亮度  $L_t$  的反演精度取决于  $G_t$ 、 $G_0$ 、 $\alpha_t$ 、 $\tau_a$ 、 $L_a$  的不确定度,分析如下:

1) 在当前红外成像技术水平下,红外设备输出值  $G_t$  的不确定度一般优于 1%;

2) 在定标环境保持稳定情况下,红外设备辐亮度响应度  $\alpha$ 、定标偏移值  $G_0$  的不确定度可控制在 6% 以内<sup>[11]</sup>,两者作为整体误差来考虑;

3) 一般采用模式计算方法计算大气透过率  $\tau_a$  和程辐射  $L_a$ ,  $\tau_a$ 、 $L_a$  的不确定度取决于气象条件、大气参数测量精度、大气辐射传输计算软件计算精度等。在当前技术水平下,气象条件较好时,  $\tau_a$ 、 $L_a$  的不确定度约为 15%<sup>[5]</sup>。

根据以上分析,目标辐亮度反演精度约为 22%,其中最大影响因素是大气透过率和程辐射测量误差。利用实测大气透过率可提高目标辐射反演精度,然而实测大气透过率只适合固定距离静止目标的辐射测量情况。

为此,本文提出一种基于大气透过率比例校正的目标辐射测量方法,利用大气透过率校正系数对不同距离的模式计算大气透过率进行校正,由此提高辐射反演精度。

## 3 基于大气透过率比例校正的辐射测量方法

### 3.1 基本原理

该方法基本原理如图 1 所示,过程如下:

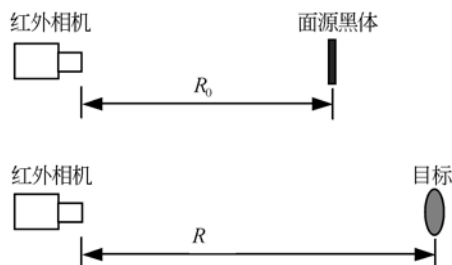


图 1 基于大气透过率比例校正的辐射测量方法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of radiation measurement method based on atmospheric transmittance proportional correction

第一步,利用红外测量设备如红外相机对距离  $R_0$  的面源黑体进行测量,由此得到距离  $R_0$  的实测大气透过率  $\tau_{R_0}$ 。同时,利用大气辐射传输计算软件如 MODTRAN 由大气温湿压等参数计算距离  $R_0$  的大气透过率  $\tau_{R_0}'$ ,称之为理论大气透过率。由此,得到大气透过率校正系数  $C_\tau = \tau_{R_0} / \tau_{R_0}'$ 。

第二步,对距离  $R$  的目标进行测量时,先用 MODTRAN 软件计算距离  $R$  的理论大气透过率  $\tau_R'$ ,再乘以校正系数  $C_\tau$ ,得到校正后大气透过率  $\tau_R^* = \tau_R' \times C_\tau$ 。最后,利用校正后大气透过率  $\tau_R^*$  对目标测量值进行修正和辐射反演。

### 3.2 大气透过率比例校正模型

当利用红外相机对距离  $R_0$  的黑体测量时,将黑体分别设置在低工作温度  $T_L$ 、高工作温度  $T_H$  下。根据式(1),红外相机对黑体测量分别得到输出值  $G_L$ 、 $G_H$

$$G_L = \alpha \cdot [\tau_{R_0} L_L + L_{R_0}] + G_0, \quad (3)$$

$$G_H = \alpha \cdot [\tau_{R_0} L_H + L_{R_0}] + G_0, \quad (4)$$

其中: $\alpha$ 、 $G_0$  分别为红外相机的辐亮度响应度和定标偏移值, $L_L$ 、 $L_H$  分别为低温  $T_L$ 、高温  $T_H$  下的黑体辐亮度, $\tau_{R_0}$ 、 $L_{R_0}$  分别为红外相机与黑体之间的大气透过率和程辐射。

由式(3)、(4)可解得实测大气透过率  $\tau_{R_0}$

$$\tau_{R_0} = \frac{G_H - G_L}{\alpha(L_H - L_L)}. \quad (5)$$

然后,根据地面能见度、气温、气压、相对湿度等大气参数,利用 MODTRAN 软件计算距离  $R_0$  的理论大气透过率  $\tau_{R_0}'$ 。由此,可得大气透过率校正系数

$$C_\tau = \tau_{R_0} / \tau_{R_0}'. \quad (6)$$

当对距离为  $R$  的目标测量时,先用 MODTRAN 软件计算距离  $R$  的理论大气透过率  $\tau_R'$ ,再乘以校正系数  $C_\tau$ ,得到校正后大气透过率

$$\tau_R^* = \tau_R' \times C_\tau = \frac{\tau_R'}{\tau_{R_0}'} \times \tau_{R_0}. \quad (7)$$

### 3.3 大气透过率校正精度

根据式(5),实测大气透过率  $\tau_{R_0}$  的精度取决于  $\alpha$ 、 $G_L$ 、 $G_H$ 、 $L_L$ 、 $L_H$  的不确定度,分析如下:

1) 同 1.2 节,红外相机辐亮度响应度  $\alpha$  的不确定度小于 6%;

2) 在当前黑体制造技术水平下,黑体辐亮度  $L_L$ 、 $L_H$  的不确定度一般可在 2% 以内;

3)在当前红外成像技术水平下,红外相机输出值  $G_L$ 、 $G_H$ 的不确定度优于 1%;

综上,实测大气透过率  $\tau_{R_0}$  的精度约为 6.8%。

根据式(7),校正后大气透过率  $\tau_R^*$  的精度取决于  $\tau_{R_0}$ 、 $\tau_R'/\tau_{R_0}'$  的不确定度,分析如下:

1)实测大气透过率  $\tau_{R_0}$  的不确定度为 6.8%;

2)  $\tau_R'/\tau_{R_0}'$  是距离  $R$  和  $R_0$  的理论大气透过率之比,其不确定度取决于距离  $R$ 、 $R_0$  的测量精度以及 MODTRAN 软件的计算精度。目前测距精度一般可达到 1%以内,MODTRAN 软件目前的计算精度为 3%。综合分析,  $\tau_R'/\tau_{R_0}'$  的不确定度约为 4.5%。

综上分析,校正后大气透过率  $\tau_{R_0}^*$  的精度为

$$\sigma = \sqrt{(6.8)^2 + (4.5)^2} / 100 = 8.1\% \quad (8)$$

因此,校正后大气透过率的精度高于 MODTRAN 计算的大气透过率。

### 3.4 目标辐射反演模型和精度

红外相机对距离为  $R$  的目标测量时,采用校正后大气透过率  $\tau_R^*$  对目标测量值进行辐射反演,根据式(2)、(7)得目标辐亮度为

$$L_t = \left[ \frac{G_t - G_0}{\alpha} - L_R \right] / \tau_R^* \quad (9)$$

$L_t$  的反演精度取决于  $G_t$ 、 $G_0$ 、 $\alpha$ 、 $\tau_R^*$ 、 $L_R$  的不确定度。根据 1.2 节、2.3 节分析,红外相机输出值  $G_t$  的不确定度优于 1%,红外相机辐亮度响应度  $\alpha$  和定标偏移值  $G_0$  作为整体其不确定度在 6%以内,MODTRAN 计算大气程辐射  $L_R$  的不确定度为 15%,校正后大气透过率  $\tau_R^*$  的不确定度为 8.1%。

综上分析,本文方法的目标辐亮度  $L_t$  反演精度为 18.1%,优于传统的采用 MODTRAN 计算大气透过率的辐射测量方法。

## 4 辐射测量实验

### 4.1 实验一

为了验证本文方法的有效性,利用武汉高德公司的中波红外相机进行了目标红外辐射测量实验。相机参数如下:工作波段 3.7~4.8  $\mu\text{m}$ ,输出位数 14 位,光学口径  $\Phi 200 \text{ mm}$ ,焦距 400 mm。首先,对红外相机进行辐射定标。

#### 4.1.1 红外相机定标

采用美国 ISDC 公司的 IR150 面源黑体对该

红外相机进行辐射定标。IR150 黑体主要参数如下:辐射面积 300 mm×300 mm,温度 25~500  $^{\circ}\text{C}$ ,发射率  $\epsilon=0.97$ 。

辐射定标模型为

$$G = \alpha \cdot L + G_0 \quad (10)$$

式中: $L$  为黑体在相机工作波段内的辐亮度, $G$  为红外相机对黑体的测量输出值, $\alpha$  为待标定的相机辐亮度响应度, $G_0$  是由相机自身光机结构热辐射、散射背景辐射以及探测器暗电流引起的偏移值。

黑体辐亮度  $L$  可根据黑体温度由普朗克公式计算得到

$$L = \frac{\epsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda \quad (11)$$

其中: $\lambda_1 \sim \lambda_2$  为相机工作波段, $\epsilon$  为黑体发射率, $T$  为黑体工作温度(K), $C_1 = 3.741\ 774\ 9 \times 10^8 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4)$ , $C_2 = 1.438\ 769 \times 10^4 \text{ (}\mu\text{m}^4 \cdot \text{K)}$ 。

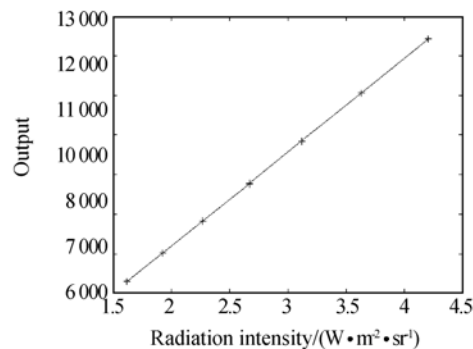


图 2 中波红外相机辐射定标结果

Fig. 2 Calibration result of midwave IR camera

图 2 给出了该相机在 2.5 ms 积分时间下的定标结果。对图 2 数据进行最小二乘线性拟合,得到该中波红外相机辐亮度响应关系为

$$G = 2\ 378 \times L + 2\ 427 \quad (12)$$

#### 4.1.2 大气透过率测量和校正系数计算

2011 年 8 月 23 日,在长春新城水库大坝上开展了目标红外辐射特性测量实验。首先,根据 2.1 节原理,将 ISDC IR150 面源黑体作为红外参考辐射源放在距离中波红外相机 203 m 处进行测量,以获得实测大气透过率。图 3 为实验现场装置图,图 4 为 IR150 黑体的中波红外测量图像。

中波红外相机积分时间设为 2.5 ms。黑体温度分别设置在低温 45 $^{\circ}\text{C}$ 、高温 60 $^{\circ}\text{C}$  下,对应黑



图 3 大气透过率测量实验装置图

Fig. 3 Equipment drawing of atmospheric transmittance measurement experiment



图 4 203 m 远处黑体的中波红外图像

Fig. 4 Image of blackbody at a distance of 203 m

体辐亮度分别为  $L_L$ 、 $L_H$ ，红外相机对黑体测量得到相应输出值为  $G_L$ 、 $G_H$ 。表 1 给出了测量结果，黑体发射率为 0.97。

表 1 203 m 远处黑体的中波红外测量结果

Tab. 1 Measurement value of blackbody at 203 m

黑体温度/°C	黑体辐亮度/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )	相机测量值/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )
45	2.274	6.867
60	3.633	8.953

根据式(5)，由表 1 数据和 3.1.1 节相机定标结果，得到 203 m 的实测大气透过率为

$$\tau_{R_0} = \frac{G_H - G_L}{\alpha(L_H - L_L)} = \frac{8.953 - 6.867}{2.378 \times (3.633 - 2.274)} = 0.645. \quad (13)$$

实验期间，用温湿度仪测得气温为 27°C、相对湿度为 60%，用能见度仪测得能见度为 13 km，长春海拔为 216 m。根据以上大气参数，利用 MODTRAN 软件计算 203 m 远处的理论大气

透过率为  $\tau_{R_0}' = 0.742$ 。

由此，计算得到大气透过率校正系数

$$C_\tau = \tau_{R_0} / \tau_{R_0}' = 0.645 / 0.742 = 0.87. \quad (14)$$

#### 4.1.3 目标辐射测量及反演

在获得大气透过率校正系数后，将 IR150 黑体作为被测目标放在不同距离处进行测量，测量距离设为 408、615、820 m。图 5、图 6 分别给出了中波红外相机对 408、615 m 远处黑体的测量图像。



图 5 408 m 远处黑体的中波红外图像

Fig. 5 Image of blackbody at a distance of 408 m



图 6 615 m 远处黑体的中波红外图像

Fig. 6 Image of blackbody at a distance of 615 m

要由目标测量图像反演得到目标辐射值，需要先获得红外相机与被测目标之间的大气透过率和程辐射。首先，根据 3.1.2 节大气参数，利用 MODTRAN 软件计算各测量距离下的理论大气透过率  $\tau_R'$  和程辐射  $L_R'$ ，如表 2 所示。然后，利用大气透过率校正系数  $C_\tau$  对  $\tau_R'$  进行校正，得到校正后大气透过率  $\tau_R^*$ ：

$$\begin{cases} \tau_{408}^* = \tau_{408}' \times C_\tau = 0.692 \times 0.87 = 0.6 \\ \tau_{615}^* = \tau_{615}' \times C_\tau = 0.656 \times 0.87 = 0.57 \\ \tau_{820}^* = \tau_{820}' \times C_\tau = 0.627 \times 0.87 = 0.545 \end{cases}, \quad (15)$$

其中：下标 408、615、820 分别表示 408、615、820 m 对应的大气透过率。最后，对目标测量图像进行大气修正和辐射反演。

表 2 各测量距离下的 MODTRAN 计算大气透过率和校正后大气透过率  
Tab.2 MODTRAN and corrected atmospheric transmittances at different distances

测量距离 /m	MODTRAN 计算 程辐射 $L_R'/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$	MODTRAN 计算 大气透过率 $\tau_R'$	大气透过率 校正系数 $C_r$	校正后的 大气透过率 $\tau_R^*$
408	0.467	0.692	0.87	0.60
615	0.528	0.656	0.87	0.57
820	0.576	0.627	0.87	0.545

4.1.3.1 基于 MODTRAN 计算大气透过率的目标辐射反演

根据式(2),利用红外相机辐亮度响应度  $\alpha$ 、定标偏移值  $G_0$ 、MODTRAN 计算的大气透过率

$\tau_R'$ 和程辐射  $L_R'$ ,由黑体目标测量值  $G_t$ 反演计算目标辐亮度  $L_t$ 。表 3 给出了基于 MODTRAN 大气透过率的目标辐射反演结果。

表 3 基于 MODTRAN 大气透过率的目标辐射反演结果

Tab.3 Target radiation inversion results based on MODTRAN atmospheric transmittance

目标距离 (m)	MODTRAN 计算 大气透过率 $\tau_R'$	目标温度 / $^{\circ}C$	目标 测量值	目标辐亮度/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )	反演辐亮度/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )	反演误差 /( $\%$ )
408	0.692	40	6 394	1.926	1.735	9.9
		50	7 412	2.671	2.353	11.9
		60	8 708	3.633	3.140	13.6
		65	9 480	4.209	3.609	14.2
		45	6 672	2.274	1.916	15.7
615	0.656	50	7 133	2.671	2.211	17.2
		55	7 654	3.122	2.545	18.5
		60	8 259	3.633	2.933	19.3
		45	6 500	2.274	1.814	20.2
820	0.627	50	7 028	2.671	2.168	18.8
		60	8 080	3.633	2.874	20.9

4.1.3.2 基于校正后大气透过率的目标辐射反演

根据式(9),利用红外相机辐亮度响应度  $\alpha$ 、定标偏移值  $G_0$ 、校正后大气透过率  $\tau_R^*$  和

MODTRAN 计算程辐射  $L_R'$ ,由黑体目标测量值  $G_t$ 反演计算目标辐亮度  $L_t$ 。表 4 给出了基于校正后大气透过率  $\tau_R^*$  的目标辐射反演结果。

表 4 基于校正后大气透过率的目标辐射反演结果

Tab.1 Target radiation inversion results based on corrected atmosphere transmittance

目标距离 /m	MODTRAN 计算 大气透过率 $\tau_R'$	目标温度 / $^{\circ}C$	目标 测量值	目标辐亮度/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )	反演辐亮度/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )	反演误差 /( $\%$ )
408	0.60	40	6 394	1.926	2.001	3.9
		50	7 412	2.671	2.714	1.6
		60	8 708	3.633	3.622	0.3
		65	9 480	4.209	4.163	1.1
		45	6 672	2.274	2.205	3.0
615	0.57	50	7 133	2.671	2.545	4.7
		55	7 654	3.122	2.93	6.1
		60	8 259	3.633	3.376	7.1
		45	6 500	2.274	2.087	8.2
820	0.545	50	7 028	2.671	2.495	6.6
		60	8 080	3.633	3.306	9.0

## 4.2 实验二

2011 年 8 月 28 日,实验小组利用 FLIR 中波红外相机在长春福州街开展了目标辐射测量实验。FLIR 相机参数如下:工作波段  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ ,输出位数 14 位,光学口径  $\Phi 37.5 \text{ mm}$ ,焦距  $75 \text{ mm}$ 。利用 ISDC IR150 面源黑体对该相机进行辐射定标,得到该相机在  $1 \text{ ms}$  积分时间下的辐射亮度响应关系为

$$G=1821 \times L+558. \quad (16)$$

### 4.2.1 大气透过率测量和校正系数计算

首先,将 ISDC IR150 面源黑体作为红外参考辐射源放在距离中波红外相机  $80 \text{ m}$  远的地方进行测量,以获得实测大气透过率。图 7 为实验现场装置图,图 8 为 FLIR 相机对 IR150 黑体的测量图像。

中波红外相机积分时间设为  $1 \text{ ms}$ 。黑体温度分别设置在低温  $50^\circ\text{C}$ 、高温  $60^\circ\text{C}$  下,对应黑体辐射亮度分别为  $2.671$ 、 $3.633 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,红外相机对黑体测量得到相应输出值分别为  $5182$ 、 $6498$ 。

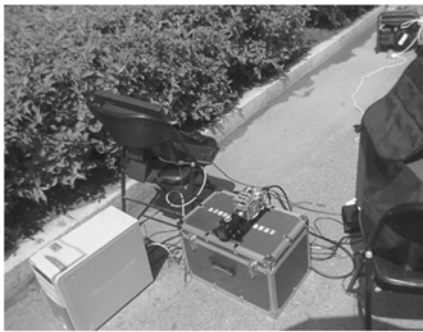


图 7 福州街目标辐射测量实验装置图

Fig. 7 Equipment drawing of radiation measurement experiment at FUZHOU



图 8  $80 \text{ m}$  远处黑体的中波红外图像

Fig. 8 Image of blackbody at a distance of  $80 \text{ m}$

根据式(5),得到  $75 \text{ m}$  处的实测大气透过率为

$$\tau_{R_0} = \frac{G_H - G_L}{\sigma(L_H - L_L)} = \frac{6498 - 5182}{1821 \times (3.633 - 2.671)} = 0.751. \quad (17)$$

实验期间,用温湿度仪测得气温为  $30^\circ\text{C}$ 、相对湿度为  $40\%$ ,用能见度仪测得能见度为  $14 \text{ km}$ ,长春海拔为  $216 \text{ m}$ 。根据以上大气参数,利用 MODTRAN 软件计算  $75 \text{ m}$  的理论大气透过率为  $\tau_{R_0}' = 0.794$ 。

由此,计算得到大气透过率校正系数

$$C_\tau = \tau_{R_0} / \tau_{R_0}' = 0.751 / 0.794 = 0.946. \quad (18)$$

### 4.2.2 目标辐射测量及反演

在获得大气透过率校正系数后,将 IR150 黑体作为被测目标放在不同距离处进行测量,测量距离设为  $154$ 、 $222$ 、 $309 \text{ m}$ 。

根据 3.2.1 节大气参数,利用 MODTRAN 软件计算各测量距离下的理论大气透过率  $\tau_R'$  和程辐射  $L_R'$ ,并利用大气透过率校正系数  $C_\tau$  对理论大气透过率  $\tau_R'$  进行校正,得到校正后大气透过率  $\tau_R^*$ ,结果见表 5。

表 5 各测量距离下的 MODTRAN 计算大气透过率和校正后大气透过率

Tab. 5 MODTRAN and corrected atmospheric transmittances at different distances

测量距离 /m	MODTRAN 计算程辐射 $L_R' / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	MODTRAN 计算大气透过率 $\tau_R'$	大气透过率校正系数 $C_\tau$	校正后的大气透过率 $\tau_R^*$
154	0.385	0.762	0.946	0.72
222	0.425	0.741	0.946	0.70
309	0.467	0.719	0.946	0.68

然后,利用理论计算和校正的大气透过率对

目标测量值进行辐射反演。

4.2.2.1 基于 MODTRAN 计算大气透过率的目标辐射反演

表 6 给出了 FLIR 中波红外相机对不同距

离、不同温度黑体的测量值,以及基于 MODTRAN 计算大气透过率和 MODTRAN 计算程辐射的目标辐射反演结果。

表 6 基于 MODTRAN 大气透过率的目标辐射反演结果

Tab. 6 Target radiation inversion results based on MODTRAN atmospheric transmittance

目标距离 /m	MODTRAN 计算大气透过率 $\tau_R'$	目标温度 /°C	目标测量值	目标辐亮度/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )	反演辐亮度/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )	反演误差 /(% )
154	0.762	45	4 300	2.274	2.195	3.5
		50	4 854	2.671	2.594	2.9
		60	6 111	3.633	3.500	3.7
		65	6 900	4.209	4.068	3.3
222	0.741	45	4 146	2.274	2.084	8.4
		50	4 627	2.671	2.442	8.6
		60	5 779	3.633	3.299	9.2
		65	6 480	4.209	3.820	9.2
309	0.719	45	3 959	2.274	1.944	14.5
		50	4 421	2.671	2.298	14.0
		60	5 554	3.633	3.164	12.9
		65	6 262	4.209	3.705	12.0

表 7 基于校正后大气透过率的目标辐射反演结果

Tab. 7 Target radiation inversion results based on corrected atmosphere transmittance

目标距离 /m	MODTRAN 计算大气透过率 $\tau_R'$	目标温度 /°C	目标测量值	目标辐亮度/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )	反演辐亮度/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )	反演误差 /(% )
154	0.76	45	4 300	2.274	2.319	2
		50	4 854	2.671	2.741	2.6
		60	6 111	3.633	3.70	1.9
		65	6 900	4.209	4.30	2.2
222	0.7	45	4 146	2.274	2.207	2.9
		50	4 627	2.671	2.585	3.2
		60	5 779	3.633	3.488	4
		65	6 480	4.209	4.038	4.1
309	0.68	45	3 959	2.274	2.06	9.4
		50	4 421	2.671	2.432	8.9
		60	5 554	3.633	3.348	7.8
		65	6 262	4.209	3.920	6.8

4.2.2.2 基于校正后大气透过率的目标辐射反演

表 7 给出了基于校正后大气透过率  $\tau_R^*$  和 MODTRAN 计算程辐射的目标辐射反演结果。

对比表 3 与表 4 以及表 6 与表 7 结果可见,与传统的基于 MODTRAN 大气透过率的辐射反演方法相比,利用校正后大气透过率进行目标辐射反演可大大提高反演精度,将其精度从 20%左

右提高到 10%以内。另外,反演误差随距离增加而加大。

5 结 论

在目标红外辐射特性测量中,大气透过率是决定辐射测量精度的重要因素。常规方法是通过大气模式计算软件如 MODTRAN 由大气参数来

计算大气透过率,大气透过率误差一般在 15% 以上。本文提出通过大气透过率校正系数对模式计算的大气透过率进行比例校正来提高大气透过率精度,由此提高目标辐射测量精度。

利用高德中波红外相机、FLIR 中波红外相机和 ISDC IR150 黑体开展的目标辐射特性测量实验结果表明,在相同条件下,与采用 MODT-RAN 大气透过率的目标辐射测量方法相比,本文方法可将目标辐射测量精度从 20% 左右提高到 10% 以内。

目前实验室具有的最大面源黑体尺寸为 300 mm×300 mm,中波红外相机的单元探测器

瞬时视场最小为 0.075 mrad×0.075 mrad,为实现对面目标辐亮度的精确测量,目标需要在红外相机靶面上成 5×5 个以上像元,因而目前开展的辐射测量实验可达到的最远测量距离在 800 m 左右,无法开展 1 km 以上的远距离辐射测量实验。

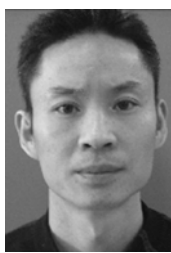
今后将引进更大尺寸的面源黑体以及更小瞬时视场的红外相机,开展远距离目标辐射测量实验研究,检验本文方法在远距离辐射测量时的改进效果。在此基础上,进一步开展大气透过率校正系数随距离而变的辐射测量方法的研究工作。

#### 参考文献:

- [1] 李云红,张龙,王延年. 红外热像仪外场测温的大气透过率二次标定[J]. 光学精密工程,2010,18(10): 2143-2149.  
LI Y H, ZHANG L, WANG Y N. Second calibration of atmospheric transmission coefficients on temperature measurement of infrared thermal imager in fields[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2143-2149. (in Chinese)
- [2] 张光明,孙胜利,张伟,等. 导弹助推段天基红外探测的像面照度模型及其应用[J]. 红外与毫米波学报,2007,26(6): 425-428.  
ZHANG G M, SUN SH L, ZHANG W, *et al.*. Model and application of image plane illumination for the space-based infrared detecting of boost-phase missile [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, 26(6): 425-428. (in Chinese)
- [3] 吴瑕,周焰,崔建,等. 导弹防御系统中红外光电识别技术分析[J]. 红外与激光工程,2009,38(5): 759-766.  
WU X, ZHOU Y, CUI J, *et al.*. Analyses on infrared optoelectric recognition technology in missile defense system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 759-766. (in Chinese)
- [4] 韩玉阁,宣益民. 大气传输特性对目标与背景红外辐射特性的影响[J]. 应用光学,2002,23(6): 8-11.  
HAN Y G, XUAN Y M. Effect of atmosphere transmission on IR radiation feature of target and background[J]. *Applied Optics*, 2002, 23(6): 8-11. (in Chinese)
- [5] 魏合理,陈秀红,詹杰,等. 红外辐射测量的大气修正[J]. 大气与环境光学学报,2007,2(6): 472-478.  
WEI H L, CHEN X H, ZHAN J, *et al.*. Atmospheric correction in the measurement of infrared radiance [J]. *Journal of Atmosphere and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 472-478. (in Chinese)
- [6] 陈秀红,魏合理,吕炜煜,等. CART 软件计算的红外大气透过率和实测值比较[J]. 激光与红外,2009,39(4): 403-406.  
CHEN X H, WEI H L, LU W Y, *et al.*. Comparison of infrared atmospheric transmittance calculated by CART software with measured values[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(4): 403-406. (in Chinese)
- [7] 董仁杰,李铜基,陈清莲,等. 热红外波段大气透过率和程辐射的估算方法[J]. 海洋技术,2006,25(2): 78-83.  
DONG R J, LI T J, CHEN Q L, *et al.*. Methods for calculation of atmospheric transmittance and radiance in thermal infrared band[J]. *Ocean Technology*, 2006, 25(2): 78-83. (in Chinese)
- [8] 宫伏安,吴涛. 海面大气红外透射率测量系统分析[J]. 红外,2009,30(6):23-27.  
GONG F A, WU T. Analysis of measurement system of atmospheric infrared transmittance at sea[J]. *Infrared*, 2009, 30(6):23-27. (in Chinese)
- [9] 吴荣华,王江安,任席闯,等. 空中目标红外辐射多波长大气透过率实时反演算法[J]. 强激光与粒子束,2009,21(11):1650-1654.  
WU R H, WANG J A, REN X CH, *et al.*. Real time inversion algorithm of multi-wavelength atmospheric transmittance for aerial target infrared radiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1650-1654. (in Chinese)

- [10] 詹杰,郭瑞鹏,饶瑞中. 可见到近红外波段整层大气透过率的测量[J]. 大气与环境光学学报,2006, 1(3): 179-183.  
ZHAN J, GUO R P, RAO R ZH. Measurement of atmospheric transmittance in the visible and near-infrared[J]. *Journal of Atmosphere and Environmental Optics*, 2006, 1(3): 179-183. (in Chinese)
- [11] 杨词银,张建萍,曹立华. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法[J]. 红外与毫米波学报,2011, 30(3): 284-288.  
YANG C Y, ZHANG J P, CAO L H. Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2011, 30(3): 284-288. (in Chinese)

#### 作者简介:



杨词银(1975—),男,江西九江人,博士,副研究员,1997年于长春光学精密机械学院获学士学位,2000年、2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获硕士、博士学位,主要从事目标红外特性测量、辐射定标等方面的研究。E-mail: yangciyin@sina.com



曹立华(1971—),男,吉林磐石人,博士生,研究员,1994年于西安交通大学获学士学位,现为长春光机所光电对抗部副主任,主要从事光电系统总体设计、目标红外特性测量等方面的研究。E-mail: cao0983@sina.com



张建萍(1974—),女,黑龙江佳木斯人,副研究员,1998年于长春光学精密机械学院获学士学位,主要从事光学系统设计等方面的研究。E-mail: zhjpycy@163.com

#### ● 下期预告

## 分布反馈式光纤激光水听器封装结构的设计

谭波,黄俊斌

(海军工程大学 兵器工程系,湖北 武汉 430033)

为了解决分布反馈式(DFB)光纤激光器用于水声探测时存在的频响曲线起伏较大的问题,设计了一种开孔套管式封装结构。通过该结构的封装,DFB光纤激光器张紧后被聚氨酯固定于开孔套筒的中心轴线上,通过开孔套管的保护作用以及施加于光纤激光器两端的拉力,有效抑制了水声探测过程中频响曲线的起伏。利用有限元软件 ANSYS 对封装结构的动态特性进行了数值仿真计算。在分析基础上加工制作了基于该结构封装的 DFB 光纤激光水听器原型样品,并利用振动液柱法进行了测试。试验结果表明,DFB 光纤激光水听器在 20~800 Hz 的声压灵敏度达到-131 dB 左右,灵敏度起伏不高于±1.5 dB。通过该封装结构的保护及聚氨酯的张紧作用,有效抑制了频响曲线的起伏,改善了 DFB 光纤激光水听器水声探测性能。