

空中目标红外辐射强度计算通用模型及其应用

贺元兴*, 张浩元, 司文涛, 吴统邦, 程军练

中国人民解放军 95859 部队, 甘肃 酒泉 735018

摘要 提出了一种适用于空中扩展目标和小目标红外辐射强度计算的通用模型, 该模型消除了对环境温度依赖较大的背景偏置的影响, 可有效提升外场复杂多变环境条件下航空目标红外辐射特性测量结果的精度。结合某型航空目标动态红外特性测试数据, 探讨了小目标红外辐射强度的计算问题, 结果表明: 对于中波红外小目标, 大气表观辐射强度对总辐射强度的贡献可以忽略, 可以采用简化模型计算总辐射强度, 但对于长波小目标红外辐射, 简化模型不再适用。对红外小目标和扩展目标的外场动态测试数据分别进行了处理, 并与理论结果作对比验证, 结果验证了模型的正确性。

关键词 测量; 红外辐射强度; 扩展目标; 红外小目标; 计算模型; 精度

中图分类号 O432.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0612007

General Model for Calculating Infrared-Radiation Intensity of Aerial Target and Its Application

He Yuanxing*, Zhang Haoyuan, Si Wentao, Wu Tongbang, Cheng Junlian

95859 Army Unit PLA, Jiuquan, Gansu 735018, China

Abstract A general model for calculating the infrared-radiation intensity of extended aerial targets and small infrared targets is proposed. The model eliminates the influence of background bias, which depends heavily on ambient temperature, and can effectively improve the measurement accuracy of infrared-radiation characteristics of aerial targets in complex and changeable environments. The calculation of small-target infrared radiation intensity is discussed based on the characteristics of dynamic infrared test data of a type of aerial target. The results show that the contribution of the apparently atmospheric radiation intensity to the total radiation intensity is negligible for small medium-wave infrared targets. A simplified model used to calculate total radiation intensity is presented, but it is not applicable for small-target long-wave infrared radiation. The dynamic small-target infrared test data and the extended-target data are processed and compared with theoretical results, and the results verify the correctness of the model.

Key words measurement; infrared radiation intensity; extended target; infrared small target; computation model; accuracy

OCIS codes 040.3060; 120.4800; 120.5630

1 引 言

红外辐射特性是衡量武器装备隐身性能的重要指标, 对其进行精确测量一直是目标特性测试机构追求的目标^[1-8]。目前, 外场主要依托大口径地基红外系统测量空中动态目标的红外辐射特性, 测试过程包括辐射定标、大气参数测量及目标红外图像采集等环节, 测试数据作为基础数据用于目标红外特性事后判读和计算。在开展航空目标红外辐射特性测试时存在以下难点问题: 1) 外场环境状态复杂多

变, 红外测量系统会受到太阳辐照及地表环境温度变化等的影响, 导致红外探测器输出易发生灰度值漂移^[8-9], 红外辐射测量精度往往较难保证。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的余毅等^[10-12]提出通过建立红外探测器“温漂”补偿模型来修正灰度值漂移, 并在实验室内取得了较好的结果, 但补偿模型存在模型相对单一、需要大量实验数据进行校验等问题, 在外场的实际操作性和推广性并不强。2) 航空目标(飞机、导弹等)不同于航天目标, 其飞行高度通常较低, 目标在大口径红外系统探测器像面

收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2019-01-15; 录用日期: 2019-03-14

* E-mail: yuanxing-he@163.com

上形成的扩展目标图像较为常见,如何基于测试数据计算该类型目标的总辐射强度是亟待解决的问题。目前,针对红外小目标辐射强度建模和计算方面的研究报道较多^[2,13-15],对扩展目标主要关注目标的辐亮度分布^[8,16],而对目标总辐射强度测量方面的报道则很少。

本文提出了一种基于背景偏置对消原理的扩展目标辐亮度计算方法,在此基础上,推导出了目标辐射强度计算通用模型,该模型消除了对环境温度依赖较大的背景偏置的影响,可有效提升在外场复杂多变环境条件下开展航空目标红外辐射特性测量和计算的精度。作为模型应用,探讨了红外小目标辐射强度计算问题,给出了相应的简化计算模型;结合外场某型目标动态红外辐射特性测试,对红外小目标和扩展目标两种情况的测试数据分别进行了处理,并与理论结果进行比对。本文所提方法可为各类型航空目标红外辐射特性测试数据的处理提供参考和依据。

2 模型的建立

航空目标的飞行高度通常不超过 10 km,当目标距离测量系统较近时,其在红外探测器上主要形成扩展目标,目标几何形状可辨识。扩展目标的红外特性通常采用辐亮度来描述,其定义为某一方向上单位投影面积的辐射源在单位立体角内发射的功率,可表征辐射源辐射的空间分布。地基红外系统测量目标的红外辐射是基于系统输入亮度与输出灰度值之间的定标方程进行的,在 t 时刻,红外系统采集的目标图像输出灰度值 h_{target} 为

$$h_{\text{target}} = G_t(\tau_{\text{atm}}L_{\text{target}} + L_{\text{path}}) + B_t, \quad (1)$$

式中: L_{target} 为目标的辐亮度; G_t 和 B_t 分别为 t 时刻红外系统的定标增益和背景偏置系数; τ_{atm} 为斜程大气透过率; L_{path} 为红外系统与目标之间的路径大气程辐射。

与此同时,设天空背景辐射为 L_{back} ,则当前帧 t 时刻目标图像的背景灰度值 h_b 可表示为

$$h_b = G_t L_{\text{back}} + B_t. \quad (2)$$

将(1)式与(2)式相减,可消去定标背景偏置项 B_t 。此时,扩展目标的红外辐亮度分布计算式为

$$L_{\text{target}} = \frac{h_{\text{target}} - h_b}{G_t \tau_{\text{atm}}} + \frac{L_{\text{back}} - L_{\text{path}}}{\tau_{\text{atm}}}. \quad (3)$$

由于扩展辐射源在面阵红外探测器上形成的目标图像具有几何轮廓特征,目标覆盖探测器的单个像元将对对应被测量目标沿观测方向的投影面积,因

此,目标图像第 i 像素区域对应的目标辐射强度为

$$I_i = L_{\text{target}} \frac{A_d}{M_s^2}, \quad (4)$$

式中: A_d 为探测器像元的面积; M_s 为红外系统的放大率, $M_s = f/R$, f 为系统的有效焦距, R 为目标相对红外系统的斜距。

不妨设扩展目标覆盖红外探测器的像元数为 M ,则目标总辐射强度可表示为

$$I_{\text{target}} = \sum_{i=1}^M I_i. \quad (5)$$

将(3)~(4)式代入(5)式,经过整理可得

$$I_{\text{target}} = \frac{A_d}{G_t \tau_{\text{atm}} M_s^2} \sum_{i=1}^M (h_{\text{target}} - h_b) + \frac{A_d M}{\tau_{\text{atm}} M_s^2} (L_{\text{back}} - L_{\text{path}}). \quad (6)$$

将目标图像区域划分为目标区域 A 和区域 B,如图 1 所示,目标区域 A 包含整个扩展目标和部分背景,区域内共有 N_1 个像元;区域 B 为区域 A 的扩展区域,包含区域 A,其内含有 N_2 个像元。区域 B 内、区域 A 外的矩形环带区域即为背景区域,含 $N_2 - N_1$ 个像元。

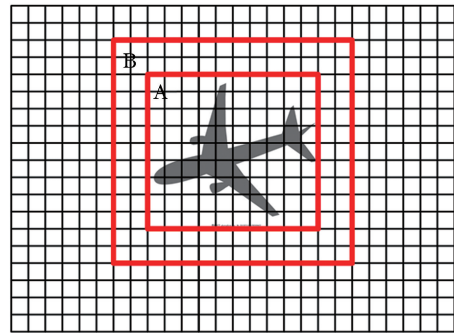


图 1 目标在面阵红外探测器上的成像示意图

Fig. 1 Imaging sketch of target on focal plane array infrared detector

注意到,(6)式等号右边项 $\sum_{i=1}^M (h_{\text{target}} - h_b)$ 可用区域 A 内总灰度值与背景总灰度值的差进行计算,即

$$\sum_{i=1}^M (h_{\text{target}} - h_b) = \sum_{i=1}^{N_1} h_i - N_1 h_b, \quad (7)$$

背景灰度值 h_b 可由背景区域内的图像灰度分布 h_i 计算得到,计算公式为

$$h_b = \frac{\sum_{i=1}^{N_2 - N_1} h_i}{N_2 - N_1}. \quad (8)$$

将(7)式代入(6)式并整理可得到扩展目标的总辐射强度:

$$I_{\text{target}} = \frac{A_d}{G_i \tau_{\text{atm}} M_s^2} \left(\sum_{i=1}^{N_1} h_i - N_1 h_b \right) + \Delta, \quad (9)$$

式中： Δ 为目标斜程路径外的大气表观辐射强度，可表示为

$$\Delta = \frac{A_d M}{\tau_{\text{atm}} M_s^2} (L_{\text{back}} - L_{\text{path}}). \quad (10)$$

至此，得到了针对扩展目标总辐射强度的计算公式，即(9)式，式中各参数可通过动态目标的红外特性测量试验来获取。其中， τ_{atm} 、 L_{path} 和 L_{back} 是利用激光雷达、太阳辐射计和地面气象站等大气测量仪器实时采集的大气数据，事后通过大气传输计算软件(CART)计算得到；对配置制冷型面阵红外探测器的高精度辐射测量系统而言，由于其增益系数 G 对环境状态变化不敏感，故可以通过事前/事后对红外系统开展辐射定标来获取 G 值。由于目标辐射强度计算不涉及对环境温度依赖较强的背景偏置项，故计算结果的可靠性更高，可作为各类动态目标红外辐射强度计算的通用模型。

3 模型应用

3.1 红外小目标辐射强度计算

在目标远距离探测和极限作用距离估算等方面，经常会遇到红外小目标的情况，此时，目标距离红外系统较远，理论上目标对红外系统所成立体角小于探测器单个像元的立体角，但受光学系统衍射及大气随机像差的影响，目标在探测器像面上实际成一个能量弥散的小光斑，光斑覆盖区域^[16]通常不超过 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 。对于红外小目标，不能根据目标在像面上的能量分布来推算所成的像元数 M 。将(10)式中目标斜程路径外的大气表观辐射强度 Δ 改写为

$$\Delta = \frac{A_s}{\tau_{\text{atm}}} (L_{\text{back}} - L_{\text{path}}), \quad (11)$$

式中： A_s 为目标的总投影面积， $A_s = A_d M / M_s^2$ 。

大气表观辐射强度值与目标投影尺寸、斜程路径外的大气辐亮度及大气透过率有关。为了定量分析，对外场某型目标动态红外特性测量试验中采集的大气数据进行处理。图2给出目标相对测量设备的斜距及仰角随时间的变化，可以看出，目标由远及近朝向地面设备方向飞行，设备对目标观测的仰角逐渐增加，由最远处的 14.51° 增至最近处的 29.23° 。

图3~4分别为中波红外和长波红外大气表观辐射强度随目标直径的变化，图中分别计算了目标斜距 R 为10,12,14,16,18 km 5种情况下的大气

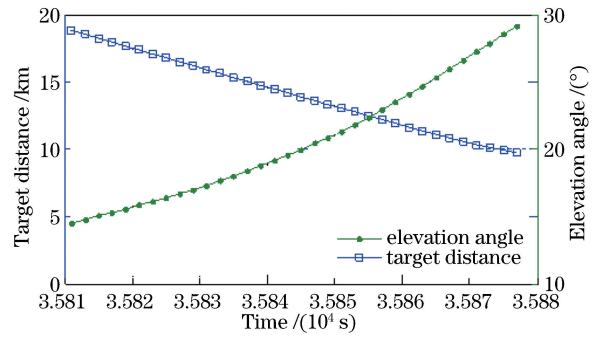


图2 目标斜距及观测仰角随时间的变化曲线
Fig. 2 Variations of target slope distance and observational elevation angle with time

表观辐射强度(目标直径范围为0.3~3.0 m,这一尺寸范围在一定程度上可涵盖航空武器迎头或尾后的典型尺寸)。由图3~4可以看出：无论是中波还是长波红外，大气表观辐射强度值对目标尺寸的依赖性较强，大尺寸目标的大气表观辐射强度大于小尺寸目标的大气表观辐射强度；在相同的条件下，长波红外大气表观辐射强度要远大于中波红外的大气表观辐射强度；当目标直径为2.9 m且距离红外设备18 km时，长波红外的大气表观辐射强度为 $4.875 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ ，而中波红外的大气表观辐射强度仅为 $0.08 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。此外，远距离目标的大气表观辐射强度要略大于近距离目标的大气表观辐射强度，实际上，当目标越远时，虽然大气程辐亮度越来越逼近背景辐亮度，但受大气透过率迅速衰减的影响，大气表观辐射强度随距离增加反而会逐渐增大。这也表明，在利用(9)式计算红外小目标辐射强度时，不能简单地认为大气表观辐射强度项可以忽略。

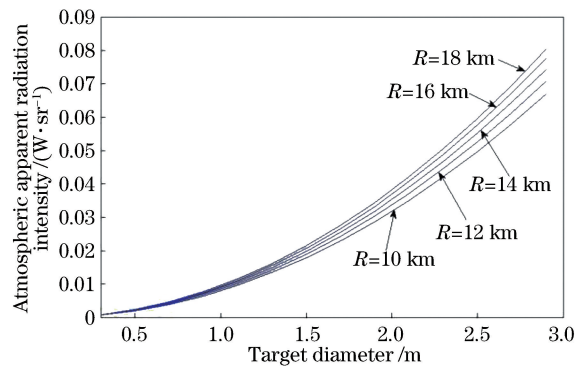


图3 中波红外大气表观辐射强度随目标直径的变化
Fig. 3 Variation of middle infrared atmospheric apparent radiation intensity with diameter of target

为了考察大气表观辐射强度对目标总辐射强度的贡献，取测试段落内目标斜距 $R = 18 \text{ km}$ 对应的大气数据进行处理。表1列出了7种不同几何尺寸

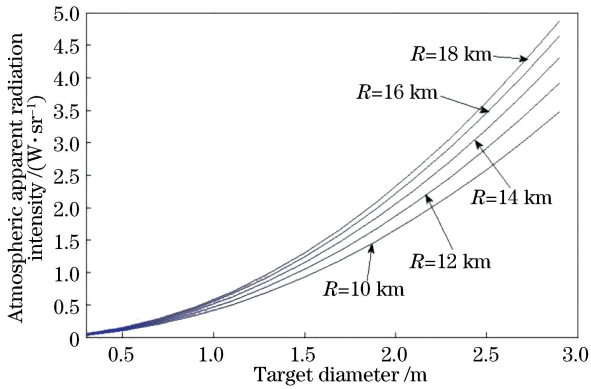


图 4 长波红外大气表观辐射强度随目标直径的变化
Fig. 4 Variation of long infrared atmospheric apparent radiation intensity with diameter of target

目标的中波和长波红外辐射大气表观辐射强度及占比情况,其中:目标直径分别设为 0.3,0.5,1.0,2.0,3.0,5.0,8.0 m;目标按照灰体进行处理,发射率 $\epsilon = 0.85$;目标仰角 $E = 15.2^\circ$;目标高度 $H = 4.7$ km,该高度层的大气环境温度设为 T_0 ,依据中纬度夏季标

准大气模式计算, $T_0 = -5.64$ °C;目标的飞行速度 $v = 0.7Ma$,其中 Ma 表示马赫数。

由表 1 可以看出:在测试段落内,虽然中、长波红外大气表观辐射强度随目标尺寸增加而逐渐增大,但其占目标总辐射强度的比例却基本不变,分别约为 1.70%(中波)和 9.30%(长波),中波红外大气表观辐射强度对目标总辐射强度的贡献可以忽略;此外,对长波红外小目标,即使目标像直径小于 10 pixels,长波红外大气表观辐射强度对目标总辐射强度的贡献较大,不可忽略。对于军用航空目标而言,目标飞行速度大于 $0.7Ma$ 的情况较普遍,且目标含发动机尾喷口等高温部位,此时目标的总辐射强度会更大,因而中、长波红外大气表观辐射强度对目标总辐射强度的贡献会相应减小;当目标飞行距离进一步增加时,地面设备对目标的观测仰角将小于 15° ,此时大气测量误差增大,已不适宜开展目标的红外特性测量。

表 1 不同几何尺寸目标中波和长波红外大气表观辐射强度及占比情况

Table 1 Middle- and long-wave infrared atmospheric apparent radiation intensity of different geometry targets and its proportion

Target diameter / m	Target image size /pixel	Mid-wave infrared radiation (3.7-4.8 μm)			Long-wave infrared radiation (8.0-9.2 μm)		
		$\Delta /$ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)	$I_{\text{theory}} /$ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)	$\frac{\Delta}{I_{\text{theory}}}$ / %	$\Delta /$ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)	$I_{\text{theory}} /$ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)	$\frac{\Delta}{I_{\text{theory}}}$ / %
0.3	1	0.00086	0.05	1.72	0.052	0.56	9.29
0.5	2	0.00240	0.14	1.71	0.145	1.55	9.35
1.0	3	0.00950	0.55	1.73	0.580	6.19	9.37
2.0	9	0.03820	2.20	1.74	2.320	24.74	9.38
3.0	13	0.08600	4.96	1.73	5.220	55.67	9.38
5.0	22	0.24000	13.77	1.74	14.490	154.64	9.37
8.0	35	0.61000	35.26	1.73	37.100	395.87	9.37

根据上述分析可知,外场大口径地基红外系统测量动态目标辐射特性时,对于长波红外小目标,大气表观辐射强度的影响不可忽略,需要根据目标的实际投影面积 A_s ,通过(9)、(11)式来计算目标的总辐射强度;对于中波红外小目标,大气表观辐射强度的影响可忽略,中波红外小目标的辐射强度可由下式计算:

$$I_{\text{target}} = \frac{A_d}{G_t \tau_{\text{atm}} M_s^2} \left(\sum_{i=1}^{N_1} h_i - N_1 h_b \right) \quad (12)$$

利用(12)式对某型目标动态红外测量数据进行

计算。目标朝向地基红外系统方向迎头飞行,在距离红外系统 13~18 km 范围内,目标仰角均大于 15° ,满足测量要求,且由于目标尺寸较小(迎头直径约为 0.7 m),在探测器上的成像区域小于 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$,按红外小目标进行处理。表 2 列出了该型目标中波红外辐射强度的计算结果,可以看出,该型目标中波红外辐射强度介于 $0.26 \sim 0.30 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 之间,根据普朗克公式可计算得到目标迎头方向辐射强度理论值约为 $0.266 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$,实测数据处理结果与理论值能够较好地吻合。

表 2 中波红外小目标动态测试数据的计算结果

Table 2 Calculation results of dynamic test data of middle-wave infrared small target

No.	Target distance /km	Elevation angle /($^{\circ}$)	Target altitude /km	Mid-wave infrared radiation intensity /($W \cdot sr^{-1}$)
1	18	15.20	4.71	0.2636
2	17	16.20	4.73	0.2617
3	16	17.19	4.72	0.2698
4	15	18.42	4.73	0.2751
5	14	19.82	4.74	0.2818
6	13	21.37	4.73	0.2970

3.2 扩展目标红外辐射强度计算

扩展目标在外场动态特性测试中较为常见。从某型目标外场动态测试数据中选取目标距离测量设备较近的段落进行辐射特性处理,该目标在红外探测器上形成扩展图像,目标的几何轮廓可以辨识。表 3 列出了该扩展目标在不同距离处中、长波红外辐射强度的计算结果,目标仰角超过 27° ,满足仰角不小于 15° 的测量要求。由表 3 可以看出,该目标中波红外辐射强度介于 $0.5 \sim 0.6 W \cdot sr^{-1}$ 之间,长波

红外辐射强度介于 $9 \sim 10 W \cdot sr^{-1}$ 之间。在计算段落内,目标处于侧身飞行状态,目标长度约为 $3.2 m$,直径为 $0.5 \sim 0.8 m$,实际投影面积按 30° 投影夹角估算时,目标投影面积为 $1.39 \sim 2.22 m^2$,该面积处于表 1 列出的直径介于 $1 \sim 2 m$ 的目标所对应的面积内 ($0.785 \sim 3.140 m^2$),此时,中、长波红外辐射强度的测量结果恰好处于直径为 $1 \sim 2 m$ 的目标辐射强度理论计算范围内,这在一定程度上说明本文所提模型的计算结果是可靠的。

表 3 扩展目标动态测试数据的计算结果

Table 3 Calculation results of dynamic test data for extended target

No.	Target distance / km	Elevation angle / ($^{\circ}$)	Target altitude / km	Image size / (pixel \times pixel)	Mid-wave infrared radiation intensity / ($W \cdot sr^{-1}$)	Long-wave infrared radiation intensity / ($W \cdot sr^{-1}$)
1	9.7	29.3	4.740	30 \times 30	0.5534	9.8829
2	9.8	29.0	4.739	30 \times 30	0.5900	9.8769
3	9.9	28.7	4.742	30 \times 30	0.5462	9.3779
4	10.0	28.3	4.728	30 \times 30	0.5261	9.7281
5	10.1	27.9	4.726	30 \times 30	0.5373	9.5847

4 结 论

本课题组提出了一种计算空中目标辐射强度的通用模型,该模型消除了对环境温度依赖较大的背景偏置的影响,可有效提升外场复杂多变环境条件下航空目标红外辐射特性测量及计算的精度。作为模型应用,结合某型航空目标动态红外特性测试数据,定量分析了目标斜程路径外的大气表观辐射强度对红外小目标总辐射强度的贡献,结果表明,在设备测试段落内,中波红外辐射的大气表观辐射强度对目标总辐射强度的贡献最大约为 1.7% ;相比之下,长波红外辐射的大气表观辐射强度对目标总辐射强度的贡献最大达到 9.3% 左右。因此,在计算长

波红外小目标总辐射强度时,需要考虑大气表观辐射强度对结果的影响,采用本文提出的通用模型来计算辐射总强度;对于中波红外小目标,大气表观辐射强度的贡献可以忽略,给出了辐射强度计算简化模型。对红外小目标和扩展目标两种情况的外场动态测试数据进行了处理,目标迎头方向的中波红外辐射强度为 $0.26 \sim 0.30 W \cdot sr^{-1}$,目标侧身方向的中波红外辐射强度为 $0.5 \sim 0.6 W \cdot sr^{-1}$,长波红外辐射强度为 $9 \sim 10 W \cdot sr^{-1}$,与理论结果进行对比后验证了所提模型的正确性。

参 考 文 献

- [1] Huang Z G. Research on space target of ground-

- based infrared detection technology[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
黄志国. 空间目标地基红外探测技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2018.
- [2] Tian Q J, Li Z, Chang S T, *et al.* Measurement method of infrared radiometric characteristics for high-temperature small targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1012004.
田棋杰, 李周, 常松涛, 等. 高温小目标红外辐射特性测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1012004.
- [3] Zhao Z J, Xu F Y, Xu S C, *et al.* Measurement of atmospheric infrared radiance and extinction characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0401004.
赵志军, 许方宇, 徐世春, 等. 大气红外辐射及消光特性实测研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0401004.
- [4] Xie C Y, Li J J, Yuan Y L, *et al.* Measurement method of internal stray radiation in short-wave infrared channel of atmospheric corrector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0901002.
谢臣瑜, 李健军, 袁银麟, 等. 大气校正仪短波红外通道内部杂散辐射测量方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0901002.
- [5] Liu B. Research on the development of photoelectric stealth technology[J]. *Shipboard Electronic Warfare*, 2002, 25(6): 44-47.
刘波. 光电隐身技术发展研究 [J]. *舰船电子对抗*, 2002, 25(6): 44-47.
- [6] Jiang Y T, Wang Y. Technology and development of infrared stealthy[J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(5): 7-9.
蒋耀庭, 王跃. 红外隐身技术与发展 [J]. *红外技术*, 2003, 25(5): 7-9.
- [7] Yang C Y, Zhang J P, Cao L H, *et al.* Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(3): 284-288.
杨词银, 张建萍, 曹立华, 等. 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.
- [8] Chang S T. Research on infrared theodolite design and key technologies to improve the radiometry precision [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
常松涛. 红外经纬仪结构设计及提高其辐射测量精度的关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2015.
- [9] Chang S T, Sun Z Y, Zhang Y Y, *et al.* Internal stray radiation measurement for cooled infrared imaging systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 64(5): 050702.
常松涛, 孙志远, 张尧禹, 等. 制冷型红外成像系统内部杂散辐射测量方法 [J]. *物理学报*, 2015, 64(5): 050702.
- [10] Chang S T, Zhang Y Y, Sun Z Y, *et al.* Method to remove the effect of ambient temperature on radiometric calibration [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): 6274-6279.
- [11] Yu Y, Wang M, Chang S T, *et al.* Drift compensation of infrared imaging system using ambient temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1004002.
余毅, 王旻, 常松涛, 等. 根据环境温度进行红外成像系统漂移补偿 [J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1004002.
- [12] Sun Z Y, Wang M, Chang S T, *et al.* Effect and correction of environmental temperature on infrared radiation measurement precision [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(5): 522-527.
孙志远, 王旻, 常松涛, 等. 环境温度对红外辐射测量精度的影响及修正 [J]. *激光与红外*, 2014, 44(5): 522-527.
- [13] Chang S T, Sun Z Y, Zhang Y Y, *et al.* Radiation measurement of small targets based on PSF [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 2879-2887.
常松涛, 孙志远, 张尧禹, 等. 基于点扩散函数的小目标辐射测量 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 2879-2887.
- [14] Chang S T, Zhang Y Y, Sun Z Y, *et al.* Radiation measurement method for infrared small targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0504001.
常松涛, 张尧禹, 孙志远, 等. 红外小目标辐射测量方法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0504001.
- [15] Liu Y Q, Liu X Y. Research on technology of ground-based infrared radiation feature measurement for space target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512003.
刘莹奇, 刘祥意. 空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0512003.
- [16] PLA General Armament Department. The measurement methods of radiance for target and background: GJB 6181-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
中国人民解放军总装备部. 目标与背景辐射亮度测试方法: GJB 6181-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.