

文章编号: 1672-8785(2012)01-0017-05

空间目标色温测量的波段选择

王国强 吴元昊 张世学 曹景太

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要: 针对某空间目标色温测量技术, 提出了一种可用于选择最优波段和提高系统温度分辨力与测温灵敏度的方法。基于目标不同波长辐亮度的比对, 推导了目标单色辐射率之比与标准黑体波长及色温之间的关系, 建立了目标色温测量数学模型, 从而巧妙地绕开辐射率对测温工作的不利影响。同时建立了波段优选评价函数数学模型, 并通过分析系统的温度分辨力及测温灵敏度与探测波段之间的关系优选探测波段, 提高了色温测量的精度。基于红外系统进行的波段选择仿真结果表明, 在 $8.0 \sim 8.5 \mu\text{m}$ 范围内, 当波段宽度取 60 nm 时, 对温度为 200 ~ 300 K 的空间目标进行色温测量的温度分辨力最高可达到 0.07 K。对不同温度目标的温度分辨力与测温灵敏度分别平均提高了 7.9 % 和 11.3 %。通过波段优选可以有效提高温度分辨力及测温灵敏度, 为空间目标探测与识别装置的研制提供了技术支持。

关键词: 温度; 比辐射率; 波段

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.01.002

Band Selection in Measurement of Colour Temperature of Space Object

WANG Guo-qiang, WU Yuan-hao, ZHANG Shi-xue, CAO Jing-tai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: According to a space object color temperature measurement technology, a method for selecting optimal waveband and improving temperature resolving power and sensitivity of a space object detection system is proposed. Comparing the radiance values of a space object at different wavelengths, the relation between the homochromatic radiance and the wavelength and temperature of a standard blackbody is deduced. A mathematic model for measuring the temperature of a space object is established. Thus, the negative influence of the emissivity on temperature measurement is avoided. In addition, a mathematic model for optimizing the waveband is established. By analyzing the relation between the temperature resolving power and sensitivity and the detection waveband, the optimal detection band is selected for the system and its temperature measurement accuracy is improved. This waveband selection based on an infrared system is simulated. The result shows that when the bandwidth of 60 nm is selected in the range from 8.0 to 8.5 μm , the detection system has its temperature resolving power up to 0.07 K for a space object with a temperature of 200 to 300 K. Its temperature resolving power and sensitivity are increased by 0.079 and 0.113 respectively. The waveband optimization is very useful for the improvement

收稿日期: 2011-11-22

作者简介: 王国强(1975-), 男, 吉林榆树人, 博士, 主要研究方向为空间目标的光学特性测量和特性分析。

E-mail: wanggq19751110@126.com

of the temperature resolving power and sensitivity of a space object detection system. This work can provide fundamental support for the development of space object detection and recognition equipment.

Key words: temperature; emissivity; waveband

0 引言

空间目标的温度特性是其主要的红外辐射特性之一。通过测量和分析空间目标的温度及其变化规律，可以推断出空间目标的性质，从而判断目标的在轨工作状态。由于空间目标温度较低(通常在200~300 K左右)、观测距离远、红外辐射信号弱，对其温度等红外特性的测量难度很大。在理论上有三种可用于测量目标温度的方法。第一种方法是应用维恩定律。假设目标为黑体，通过测量目标的峰值辐射计算目标的温度。第二种方法是应用斯蒂芬-玻尔兹曼定律。假定目标的平均发射率，并在目标的表面面积已知的前提下，通过测量目标的全部辐射能来确定目标的温度。第三种方法是利用比色法测温。假定目标为灰体，测量目标在多个光谱波段内的辐射能量，然后计算两个波段之间的能量比值并将其与理论值进行比较后得到目标的温度^[1-2]。

上述方法适用于目标近似为黑体或灰体时的情况。此时，目标的辐射发射率为1或者不随波长变化且为小于1的常数。而在多数情况下，辐射发射率不是一个常数，而是随波长变化的函数。利用上述方法求得目标温度的误差较大。本文从空间目标的发射率与自身材料、测量波长和目标温度有关的实际情况出发，提出利用比辐射率法测量目标的色温，建立波段优选评价函数模型，并通过仿真优选探测波段来提高目标色温测量的灵敏度和分辨力。

1 测量原理

由基尔霍夫定律可知，在同一温度下，对于任何波长，物体的辐射出射度总是小于绝对黑体的辐射出射度。两者的比值为该物体的发射率，即

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot M_B(\lambda, T) \quad (1)$$

当温度为T的物体的辐射能量随波长的分布情况与温度为T_s的黑体的相同时，即物体的辐亮度的最高峰值及其左右两个不同波长λ₁和λ₂处的辐亮度比值和黑体的相应各个波长的辐亮度比值相等，将T_s称为该物体的色温度，简称色温。

$$\frac{\varepsilon(\lambda_1, T) \cdot l_B(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T) \cdot l_B(\lambda_2, T)} = \frac{l_B(\lambda_1, T_s)}{l_B(\lambda_2, T_s)} \quad (2)$$

式中，ε(λ, T)为辐射发射率，l_B(λ, T)和l_B(λ, T_s)分别为黑体在温度为T和T_s时的辐射亮度。根据朗伯余弦定律，漫辐射源的辐射亮度和辐射出射度之间的关系为M(λ, T) = πl(λ, T)。式(2)可改写为

$$\frac{\varepsilon(\lambda_1, T) \cdot M_B(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T) \cdot M_B(\lambda_2, T)} = \frac{M_B(\lambda_1, T_s)}{M_B(\lambda_2, T_s)} \quad (3)$$

当λTΔc₂ ≪ 1时，普朗克公式可以改写为

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-c_2/\lambda T} \quad (4)$$

于是式(3)可改写为

$$e^{c_2/T_s(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} e^{c_2/T(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)} \quad (5)$$

或

$$T_s = \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) T}{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) + T \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}} \quad (6)$$

从普朗克定律出发，构造不同波长发射率的比值式，得到物体在波长为λ₁和λ₂时的光谱辐射出射度分别为M_{λ₁} = $\frac{\varepsilon(\lambda_1, T) C_1}{\lambda_1^5 [\exp(C_2/\lambda_1 T) - 1]}$ 和M_{λ₂} = $\frac{\varepsilon(\lambda_2, T) C_1}{\lambda_2^5 [\exp(C_2/\lambda_2 T) - 1]}$ 。通过用光学辐射比对装置进行辐射亮度比较，分别得到标准黑体在λ₁和λ₂时的光谱辐射出射度分别为M_{Bλ₁} = $\frac{C_1}{\lambda_1^5 [\exp(C_2/\lambda_1 T_1) - 1]}$ 和M_{Bλ₂} = $\frac{C_1}{\lambda_2^5 [\exp(C_2/\lambda_2 T_2) - 1]}$ 。假定黑体和辐射体均为朗伯余弦体，调节黑体温度T₁和T₂，使黑体在

波长为 λ_1 和 λ_2 时的辐射亮度分别与物体的辐射亮度相等，则 $\frac{M_{\lambda_1}}{M_{\lambda_2}} = \frac{M_{B\lambda_1}}{M_{B\lambda_2}}$ ，即

$$\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} = \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_2 T_2} - \frac{c_2}{\lambda_1 T_1} + \frac{c_2}{\lambda_1 T} - \frac{c_2}{\lambda_2 T} \right] \quad (7)$$

将两边取对数，则

$$\ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} = \frac{c_2}{\lambda_2 T_2} - \frac{c_2}{\lambda_1 T_1} + \frac{c_2}{\lambda_1 T} - \frac{c_2}{\lambda_2 T} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)后便可消去物体在不同波长下的发射率的商，从而得到色温测量数学模型：

$$T_s = \frac{\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}}{\frac{1}{\lambda_2 T_2} - \frac{1}{\lambda_1 T_1}} \quad (9)$$

式中， λ_1 和 λ_2 为探测中心波长； c_2 为已知常数； T_1 和 T_2 的值均可测量，代入式(9)即可求出物体的色温度^[3-4]。

2 优选测温系统的探测波段

由色温测量数学模型可见，探测波段的选择是测量的关键。提出波段优选的主要原则，建立系统温度分辨力与测温灵敏度模型并将其作为波段优选评价函数。基于某一系统参数进行仿真研究，分析中心波长和波段宽度对系统温度分辨力和系统测温灵敏度的影响，并由此优选出探测波段。

表 1 仿真用系统及环境参数

系统及环境参数	参数值
大气透过率	$\tau_0 = 0.75$
光学系统的总透过率	$\tau_\lambda = 0.55$
探测器的探测率	$D^* = 7 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$
斩波器的调制系数	$\eta = 0.95$
窄带滤光片的透过率	$D_\lambda = 0.80$
选频放大器的带宽	$\Delta f = 10 \text{ Hz}$
光学系统的入瞳孔径	$f' = 650 \text{ mm}$

波长优选的主要原则如下：

(1) 由维恩定律可知，空间目标(温度为 200 ~ 300 K)的辐射峰值波长和辐射能量主要集中在长波波段。

(2) 由于地基系统对空间目标的测量须透过地球大气进行，必须考虑大气对目标辐射的吸收和散射。长波红外的大气窗口为 8 ~ 12 μm，因此在此范围内选择波长。

(3) 考虑到目标发射率会随波长变化，在选择测量波长及波段宽度时，避免发射率发生较大变化。

2.1 建立系统的温度分辨力数学模型

系统的温度分辨力是指测量系统接收到辐射能的改变量等于系统的噪声等效功率时目标温度的改变量。它表征的是系统对温度变化的分辨能力。有人已建立了系统的温度分辨力数学模型，并仿真和分析了中心波长和波段宽度对系统温度分辨力的影响^[5]。

$$\Delta T = \frac{2kT^2\lambda^6\sqrt{A\Delta f}}{\pi^2 h^2 c^3 \tau_0 A_p \delta\lambda \eta \varepsilon_\lambda \tau_\lambda D^* \left(\frac{D}{R}\right)^2}$$

$$\times \frac{\left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^2}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} \quad (10)$$

2.1.1 中心波长对系统温度分辨力的影响

图 1 所示为通过仿真和分析得到的温度分辨力随工作波长的变化曲线。从图 1 中可以看出，探测中心波长的优选可以大大提高测量的温度分辨力，而且目标的温度范围越窄，中心波长的优化越精细。对于仿真采用的系统和环境参数，可供选择的中心波长范围为 8.0 ~ 8.6 μm。此时，温度分辨力最高可达 0.07 K。

2.1.2 波段宽度对系统温度分辨力的影响

对系统的温度分辨力随波长带宽的变化情况进行分析，得到图 2 所示的分析结果。当波段带宽小于 60 nm 时，系统的温度分辨力较低。不同温度目标的分辨力受波段带宽的影响较大。同时考虑到波段带宽太宽，目标的辐射发射率变化太大，这将会降低温度测量的精度。因此，将波段带宽选择为 60 nm。

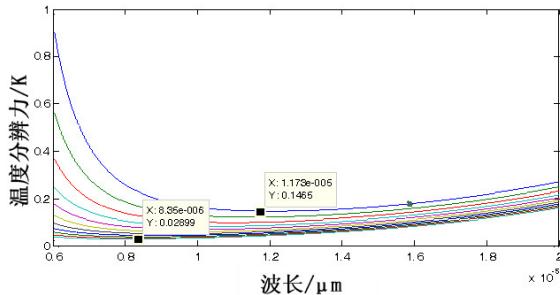


图1 系统的温度分辨力随中心波长的变化曲线

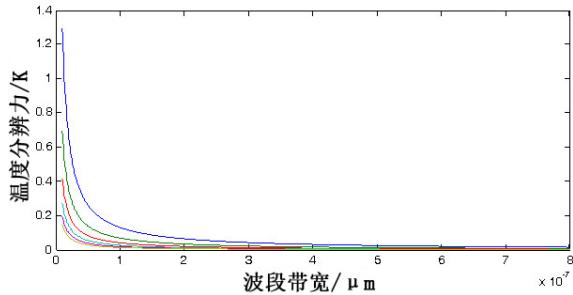


图2 系统的温度分辨力随波段带宽的变化曲线

2.2 建立系统的测温灵敏度数学模型

系统的测温灵敏度是指当待测目标的温度每变化 1 K 时测得的电信号的变化量。它表征的是单个波段系统的温度测量精度。有人已建立了测温灵敏度数学模型，并仿真和分析了中心波长与波段宽度对测温灵敏度的影响^[6]。

$$S = \frac{\partial V(T)}{\partial T} = \frac{1}{2} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \pi^2 \tau_0 A \eta \varepsilon_\lambda \tau_\lambda h^2 c^3 \times \frac{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)}{\lambda^6 T^2 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^2} \delta \lambda \quad (11)$$

2.2.1 中心波长对系统测温灵敏度的影响

图 3 所示为通过仿真和分析得到的测温灵敏度随工作波长的变化曲线。从图 3 中可以看出，测温灵敏度随工作波长的变化过程中存在一个极值。该极值与对某一温度目标进行测量时可以选择的最佳中心波长相对应。鉴于空间目标的温度范围，将中心波长选择为 8.0 ~ 8.5 μm。

2.2.2 波段宽度对系统测温灵敏度的影响

对系统的测温灵敏度随波段宽度的变化情况进行仿真，得到图 4 所示的分析结果。系统测

温灵敏度随波段宽度增加而增加，但是考虑到发射率对测温精度的影响，在满足要求的前提下，尽量选择较小的波段宽度。

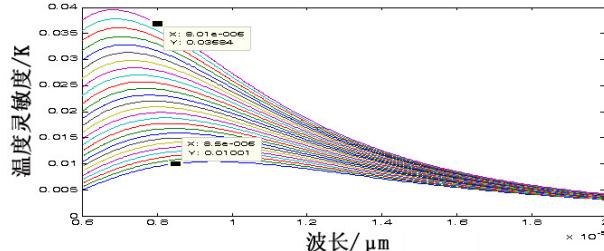


图3 温度灵敏度随目标温度和中心波长的变化曲线

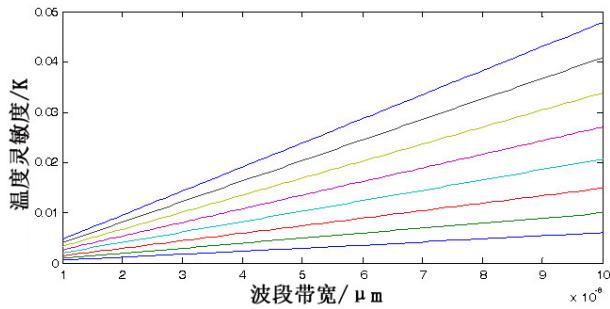


图4 温度灵敏度随目标温度和波段带宽的变化曲线

2.3 优选小结

对采用的系统和环境参数进行了仿真分析，得到了中心波长和波段宽度对系统温度分辨率和系统测温灵敏度的影响情况。考虑到在较宽波段上发射率出现较大变化时会导致测温精度降低，对温度范围为 200 ~ 300 K 的空间目标进行了温度测量。测量所选择的中心波长为 8.0 ~ 8.5 μm，波段宽度为 60 nm。系统的温度分辨力最高可达到 0.07 K，对不同温度目标的温度分辨力与测温灵敏度分别平均提高了 7.9 个百分点和 11.3 个百分点，实现了温度测量精度的有效提高。

3 结束语

通过对空间目标测温方法进行理论分析，提出了用于测量非灰 / 黑体空间目标的色温度的原理性方法，建立了空间目标的色温测量数学模型和波段优选评价函数数学模型。针对某个温度范围的目标，并结合系统和环境参数进行波段选择的仿真分析，得出优选中心波长范围为 8

~8.5 μm, 波段宽度为 60 nm。该方法通过波段选择提高了系统的温度分辨力与测温灵敏度, 为空间目标红外辐射特性的有效获取提供了参考。本文对于发射率随波长变化较大的情况, 在如何选择发射率相近的两个中心波长时还存在一定不足, 这还有待于进一步研究和改进。

参考文献

- [1] Sapritskil V I. National Primary Radiometric Standards of the USSR [J]. *Metrologia*, 1990, **27**(2): 53–60.
- [2] Gentile T R. Realization of a Scale of Absolute Spectral Response Using the National Institute of Stan-

dards and Technology High-accuracy Cryogenic Radiometer [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(22): 4392–4403.

- [3] Gentile T R, Houston J M. National Institute of Standards and Technology High-accuracy Cryogenic Radiometer [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(7): 1056–1068.
- [4] Quinn T J, Martin J E. Cryogenic Radiometry, Prospects for Further Improvements in Accuracy [J]. *Metrologia*, 1991, **28**(1): 155–161.
- [5] 辛军, 冯其波, 林铁生, 等. 高精度双波长非接触光纤高温计的波长最优设计 [J]. *中国激光*, 1999, **26**(2): 121–126.
- [6] 施德恒, 刘玉芳, 陈玉科, 等. 一种高精度光纤测温系统工作波长的优化设计 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 542–547.

新闻动态 News

美国正在研制可提供地球全覆盖实时影像的新型间谍卫星

据 www.physorg.com 网站报道, 美国国防高级研究计划局 (DARPA) 正在从事一个名为薄膜光学实时成像仪 (MOIRE) 的研究项目。该项目尚处于概念论证阶段, 若成功的话, 它将可以提供地球上任何时间、任何地点的实时影像。到目前为止, 这种情形也只有在电影和科幻小说中才能看到。确定这只庞大的“天眼”是否还具有天文学应用也将会是一项有趣的研究。

MOIRE 是一个地球同步轨道系统, 它将采用一块庞大而轻质的薄膜透镜。DARPA 称, 他们将用一只以衍射图案蚀刻的 20 m 宽的薄膜“眼睛”将光线聚焦在传感器上。据悉, MOIRE 项目将会在每一个天基望远镜上花费 500 万美元, 而且 MOIRE 能够以 1 帧 / s 以上的影像更新速率对大于 100 km×100 km 的区域进行成像。

DAPRA 表示, MOIRE 项目旨在演示一种可以制造用于支撑光学平台的大块薄膜和大型结构的能力, 而且他们还可以制作出用于将衍射型透镜改造成大带宽数像器件的二次光学元件。

目前, 于 2010 年 3 月启动的 MOIRE 项目正处于研制的首个阶段, DARPA 也在对项目内容

的可行性进行测试。此后, Ball Aerospace 公司将承担第二阶段的系统设计工作, 并制作和测试一台口径为 5 m 的望远镜。在 MOIRE 项目的第三阶段, 他们将会发射一台口径为 10 m 的望远镜, 以完成在轨飞行测试任务。

MOIRE 望远镜的 20 m 口径设计将会远远大于美国航空航天局 (NASA) 的新一代詹姆斯韦伯空间望远镜 (其孔径为 6.5 m)。

Public Intelligence 公司的报告称, 根据 DARPA 的一份合同, MOIRE 望远镜将可以对地面上移动速度高达 60 mph 的导弹发射车进行定位。这也将要求单个图像像素内的图像分辨率足以使人们观察到长度小于 3 m 的物体。



图 1 MOIRE 概念图

□ 岳桢千