

空间目标红外辐射特征的地基测量

王国强, 吴元昊

(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: 空间目标的等效辐射温度、等效辐射面积是主要的红外辐射特征。通过测量空间目标温度并分析其变化规律, 可以推断空间目标的性质, 判断目标的在轨工作状态。基于比色测温原理建立了空间目标温度和等效辐射面积测量数学模型, 结合系统特性、目标辐射特性和红外辐射大气传输特性优选系统的工作波长, 采用简单实用的程序, 实现了空间目标温度和等效辐射面积的地基测量。实验结果表明: 在测温范围 293~353 K 内, 当系统的工作波长为 $\lambda_1=8.01\ \mu\text{m}$, $\lambda_2=8.04\ \mu\text{m}$, 波段宽度取 20 nm, 波段间隔取 30 nm 较为合适。温度分辨力达到 7 K, 测量数据可用于地基空间目标分类与识别, 为地基探测设备的研制和检测提供依据。

关键词: 辐射温度; 中心波长; 带宽; 仿真

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)09-1634-06

Ground-based measurement on the infrared characteristic of space object

Wang Guoqiang, Wu Yuanhao

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

Abstract: Effective radiant temperature and effective radiant area are main infrared radiant characteristics of space objects. Based on the method of determining the object temperature by measuring the spectral distribution and fitting the data to the Planck formula, the characteristics of space objects can be deduced and the working state on orbit can be judged. Based on the colorimetric temperature measurement principle, the mathematical models of temperature and effective radiant area measurement were established. Combined with characteristics of system, target radiation and atmospheric infrared transmittance spectra, the centric wavelength and the bandwidth were optimized. A simple program utilizing the optimal wavelengths was used to implement temperature and effective radiant area measurement. The optimal result shows that the proper wavelength interval should be 30 nm when bandwidth is 20 nm at 293~353 K and the system working wavelength λ_1 and λ_2 are 8.01 μm and 8.04 μm respectively. The resolving power of the measurement temperature is 7 K. The method can not only provide bases for the identification and classification of the space object, but also provide bases for developing and testing the detecting equipments.

Key words: radiant temperature; centric wavelength; bandwidth; simulation

收稿日期: 2011-01-11; 修订日期: 2011-02-27

基金项目: 国家 863 计划(2009AA8080603)

作者简介: 王国强(1975-), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为空间目标光学测量与特性分析。Email: wanggq19751110@126.com

0 引言

等效辐射温度和等效辐射面积测量技术是重要的空间目标非成像探测技术,也是空间目标成像探测技术的必要补充。通过对空间目标在两个窄带光谱波段辐射量的测量,计算空间目标等效辐射温度和等效辐射面积,可以用于对空间目标的性质和状态进行判断和分类,为地面探测设备的研制和试验提供依据^[1]。

由于空间目标的温度低(180~360 K)、距离远、地基观测受大气环境影响较大,地基测量获得的红外辐射信号较弱等原因,其温度等红外特性测量精度较低。通常的比色法测量目标在窄带波段内的辐射通量,通过将波段之间通量的比值与理论比值进行比较,插值得到目标的温度。比色测温法以其测量精度高、抗干扰力强等优点而广泛应用于高温测量领域^[2]。文中通过对测量系统工作波长(中心波长、波段宽度和波段间隔)的优选,将比色测温原理应用到空间低温目标的温度测量领域,对提高空间目标温度的地基测量精度进行探索性研究。

1 地基测量数学模型

基于比色测温的原理,建立了空间目标温度和等效辐射面积测量的数学模型,获得空间目标在两个光谱窄带波段的辐射通量数据,将实测数据与之比较,插值求得目标温度,进而求得等效辐射面积。

探测器输出信号数学模型:

$$V_p = \int_{\lambda}^{\lambda+\delta\lambda} RSR(\lambda) \cdot \Phi(\lambda) d\lambda = \frac{\pi}{2} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 hc^2 \tau_0 A \eta \cdot \int_{\lambda}^{\lambda+\delta\lambda} RSR(\lambda) \varepsilon_{\lambda} \tau_{\lambda} \frac{1}{\lambda^5 \exp(hc/\lambda kT) - 1} d\lambda \quad (1)$$

空间目标温度测量数学模型表示为:

$$R_{12} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_1+\Delta\lambda} RSR(\lambda) \varepsilon_{\lambda} \tau_{\lambda} \frac{1}{\lambda^5 \exp(hc/\lambda kT) - 1} d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_2+\Delta\lambda} RSR(\lambda) \varepsilon_{\lambda} \tau_{\lambda} \frac{1}{\lambda^5 \exp(hc/\lambda kT) - 1} d\lambda} \quad (2)$$

对于已知目标距离的情况,可以建立空间目标等效辐射面积测量数学模型为:

$$\varepsilon_{\lambda} A_p = \frac{2V_s \left(\frac{R}{D}\right)^2}{\pi hc^2 \tau_0 \eta \int_{\lambda}^{\lambda+\delta\lambda} RSR(\lambda) \tau_{\lambda} \frac{1}{\lambda^5 \exp(hc/\lambda kT) - 1} d\lambda} \quad (3)$$

式中:RSR(λ)是光谱响应度;η是调制盘的调制系数;A是探测器灵敏元面积;f'是光学系统焦距;A_p是目标的投影面积;τ₀是大气透过率;τ_λ是光学系统的光谱透过率;D是光学系统入瞳孔径;R是空间目标距离;R₁₂是两波段输出电信号比值^[3]。

2 系统工作波长的优化

基于比色法进行空间目标温度测量的关键是选择合适的系统工作波长(中心波长、波段宽度、波长间隔)。文中基于温度和等效辐射面积测量数学模型,结合目标辐射特性、测量系统特性、测量方法特性和红外辐射大气传输特性等因素,优选测量系统的工作波长,基本原则如下:(1)工作波长处目标辐射占总辐射比重大;(2)工作波长处测量系统的测温灵敏度和测温分辨力高;(3)工作波长处测量曲线的线性度好;(4)工作波长处目标辐射传输的衰减少;(5)工作波长处目标辐射发射率变化小。

2.1 中心波长的优选

中心波长即测量系统使用的窄带光谱波段的基本波长,是决定空间目标温度测量精度的主要因素,它的合理选取是保障空间目标温度测量精度的前提。

2.1.1 中心波长与系统温度分辨力

系统温度分辨力是测量系统接收目标辐射通量的改变量等于系统的噪声等效功率时目标温度的改变量^[4],表征系统对温度变化的分辨能力。仿真分析系统温度分辨力与中心波长的关系,找到合适的中心波长。

系统温度分辨力的数学模型为:

$$\Delta T_s = \frac{2kT^2 \lambda^6 \sqrt{A\Delta f}}{\pi^2 h^2 c^3 \tau_0 A \delta\lambda \eta \varepsilon_{\lambda} \tau_{\lambda} D^2 \left(\frac{D}{f'}\right)^2} \cdot \frac{[\exp(hc/\lambda kT) - 1]^2}{\exp(hc/\lambda kT)} \quad (4)$$

系统温度分辨力与波长的变化关系如图 1 所示。仿真分析表明,目标温度范围越小,中心波长的优化越精细,针对温度范围为 293~353 K 的空间目标,系统优化中心波长范围为 8.0~8.6 μm。

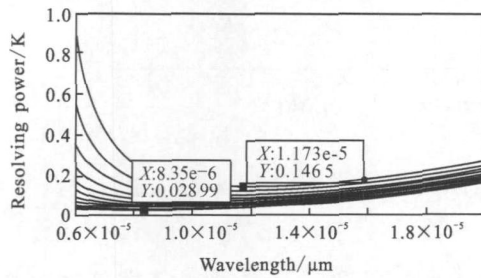


图 1 系统的温度分辨力随中心波长的变化曲线

Fig.1 Relation between resolving power and centric wavelength

2.1.2 中心波长与系统测温灵敏度

系统的测温灵敏度是待测目标温度每变化 1K 时,探测器输出电信号的变化量,表征系统在单个波段对目标温度的测量精度^[5]。为了获得较高的温度测量精度,必须分析系统测温灵敏度与中心波长的关系,以选择合适的中心波长。

系统测温灵敏度数学模型为:

$$S = \frac{\partial V(T)}{\partial T} = \frac{1}{2} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \pi^2 \tau_0 A \eta \varepsilon_\lambda \tau_\lambda h^2 c^3 \cdot \frac{\exp(hc/\lambda kT)}{\lambda^6 T^2 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^2} \delta \lambda \quad (5)$$

系统测温灵敏度的分析如图 2 所示,系统测温

$$S = dR(T)/dT = \frac{2\pi h^2 c^3}{k} \cdot \left(\frac{\int_{\lambda_1 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_1 + \Delta\lambda/2} \frac{\exp(hc/\lambda kT)}{\lambda^6 T^2 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^2} d\lambda}{\left(\int_{\lambda_2 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda/2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} d\lambda \right)^2} - \frac{\int_{\lambda_2 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda/2} \frac{\exp(hc/\lambda kT)}{\lambda^6 T^2 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^2} d\lambda}{\left(\int_{\lambda_2 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda/2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} d\lambda \right)^2} \right) \quad (6)$$

测温曲线 $R(T)-T$ 灵敏度的分析结果如图 3 所示。测温曲线灵敏度虽然存在着极值,但是空间低温目标的主要辐射波段是长波波段,同时,大气窗口为

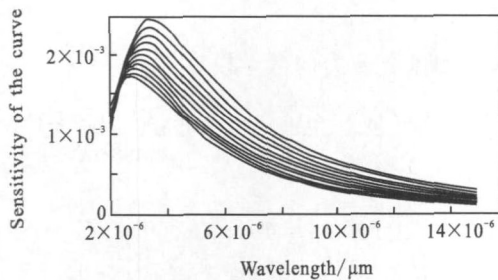


图 3 $R(T)-T$ 曲线灵敏度与波长和温度的关系曲线

Fig.3 Relation between sensitivity of the curve $(R(T)-T)$ and centric wavelength and temperature

灵敏度曲线存在一个极值,与其对应的波长即为测量系统优选的最佳波长。对温度范围为 293~353 K 的空间目标进行的分析可知,系统优选的中心波长范围为 8~8.25 μm 。

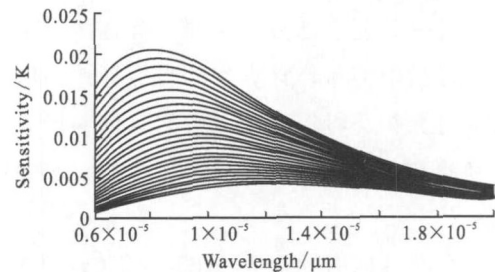


图 2 温度灵敏度随目标温度和中心波长变化曲线

Fig.2 Relation between sensitivity and centric wavelength

2.1.3 中心波长与对测温曲线灵敏度

比色测温根据辐射理论,结合系统及环境特性参数,绘制出 $R(T)-T$ 关系曲线,通过测量两波段探测器输出电信号的比值 $R(T)$,插值求得空间目标辐射温度 T 。因此, $R(T)-T$ 曲线的灵敏度对测温精度有着重要的影响^[6]。

测温曲线 $R(T)-T$ 的灵敏度数学模型为:

8~12 μm 。由灵敏度曲线可见,在长波波段,测温曲线灵敏度与波长成反比,因此对空间低温目标温度的测量,波长选择应越短越好。

2.2 波段宽度的优选

波段宽度即测量系统窄带光谱波段的带宽,决定着系统的温度分辨力和测温灵敏度,它的合理选择将有助于提高系统对空间低温目标温度的测量能力。

2.2.1 波段宽度与温度分辨力

分析不同波长下系统温度分辨力随波段宽度的变化情况,结果如图 4 所示,当波段带宽小于 10 nm 时,系统的温度分辨力较低,同时受波段带宽的影响较大;对一定温度的目标,波段带宽越宽,温度分辨力越高,且对于不同温度的目标分辨力越稳定。

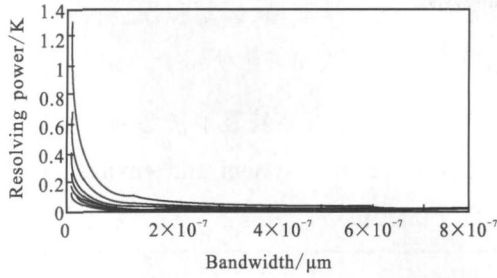


图 4 系统温度分辨率随波段带宽的变化曲线

Fig.4 Relation between resolving power and bandwidth

2.2.2 波段宽度与系统测温灵敏度

不同中心波长的情况下,对系统测温灵敏度随波段宽度的变化情况进行分析,结果如图 5 所示,波段带宽越宽,系统测温灵敏度越高,但较宽的波段宽度可能导致目标发射率变化较大,不利于测温精度的提高。

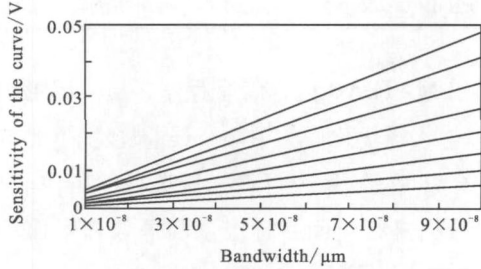


图 5 温度灵敏度与目标温度和波段带宽的变化曲线

Fig.5 Relation between sensitivity of measuring the temperature and bandwidth

2.2.3 波段宽度与测温曲线灵敏度

对测温曲线灵敏度随波段宽度的变化关系进行分析,结果如图 6 所示,某温度下,测温曲线 $R(T)-T$ 灵敏度不随波段宽度的变化而变化;不同波段宽度的测温曲线 $R(T)-T$ 灵敏度随被测温度的变化曲线也几乎重叠在一起。因此,不太大的波段宽度变化范围(10 nm, 150 nm)对 $R(T)-T$ 曲线的温度灵敏度几乎不产生什么影响。

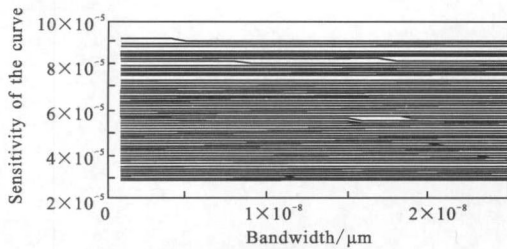


图 6 $R(T)-T$ 曲线灵敏度与波段宽度和温度的变化曲线
Fig.6 Relation between sensitivity of the curve $R(T)-T$ and bandwidth and temperature

2.2.4 波段宽度与测温曲线线性度

探测器两波段信号比值的数学模型为:

$$R_{12} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_1+\Delta\lambda} RSR(\lambda)\epsilon_\lambda \tau_\lambda \frac{1}{\lambda^5 \exp(hc/\lambda kT)-1} d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_2+\Delta\lambda} RSR(\lambda)\epsilon_\lambda \tau_\lambda \frac{1}{\lambda^5 \exp(hc/\lambda kT)-1} d\lambda} \quad (7)$$

对测温曲线 $R(T)-T$ 的线性度进行分析,结果如图 7 所示,不同波段宽度的测温曲线 $R(T)-T$ 随被测温度的变化曲线几乎重叠在一起,可见波段带宽对曲线线性度的影响可以不予考虑。

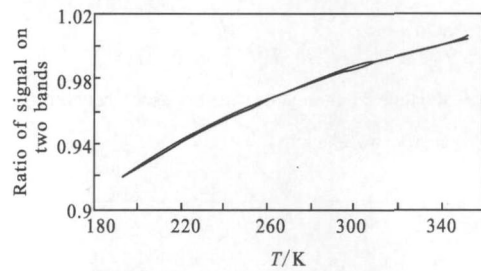


图 7 测温曲线 $R(T)-T$ 与波段带宽关系

Fig.7 Relation between the curve $R(T)-T$ and bandwidth

2.3 波段间隔优选

波段间隔即两中心波长的波长差,它的选取影响着系统对空间目标温度测量的抗噪声能力和测温精度。

2.3.1 波段间隔与测温曲线灵敏度

对测温曲线灵敏度受波段间隔的影响进行分析,结果如图 8 所示,在某一确定温度下, $R(T)-T$ 曲线灵敏度随波段间隔增加而增大;在 193~353 K 的测温范围内,在某一波段间隔下的 $R(T)-T$ 曲线灵敏度随被测温度的增加而减小。

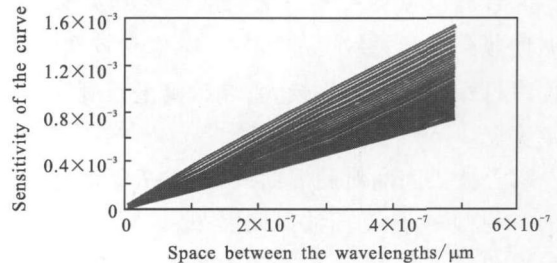


图 8 测温曲线灵敏度与波长间距的变化曲线

Fig.8 Relation of the sensitivity of the curve with the space between the wavelengths

2.3.2 波段间隔与测温曲线线性度

波段间隔对测温曲线 $R(T)-T$ 线性度的影响分析

结果如图 9 所示,波段间隔越小测温曲线 $R(T)-T$ 线性度越好,越有利于温度测量精度的提高。图 10 是曲线线性度随波段间隔的变化曲线,很好地证明了这一点。

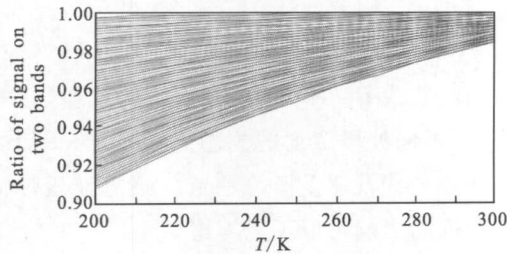


图 9 测温曲线 $(R(T)-T)$ 与中心波长间隔的关系

Fig.9 Relation of the curve with the space between two centric wavelengths

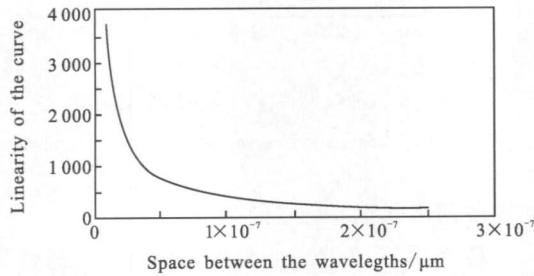


图 10 测温曲线 $(R(T)-T)$ 线性度与中心波长间隔的关系

Fig.10 Relation of the linearity of the curve with the space between the two centric wavelengths

综合中心波长对系统测温曲线灵敏度、系统温度分辨力、系统测温灵敏度的影响,并结合波长选择的基本原则,测量系统的中心波长范围确定为 $8\sim 8.25\ \mu\text{m}$ 。

综合波段宽度对测温曲线线性度和灵敏度、系统温度分辨力和灵敏度的影响,考虑到较宽的波段宽度内目标发射率变化较大,导致测温精度降低;波段带宽取 $20\ \text{nm}$ 。

综合波段间隔对测温曲线 $R(T)-T$ 灵敏度、线性度的影响,并考虑到当波段间隔很大时,两波长处的发射率相差可能很大,降低测温精度,选 $30\ \text{nm}$ 的波段间隔。

3 仿真计算

采用优化的测量系统工作波长,结合测量系统和环境特性参数,根据提出的空间目标温度和等效

辐射表面积测量数学模型,编写程序进行仿真计算。仿真系统及环境参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统及环境参数

Tab.1 Simulation system and environment parameters

Parameter	Value
Atmospheric transmittance	$\tau_0=0.75$
Total transmittance of the optical system	$\tau_\lambda=0.55$
Detectivity of the detector	$D^* = 7 \times 10^7\ \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$
Modulation of the chopper	$\eta=0.95$
Transmittance of the narrow band filter	$D_\lambda=0.80$
Bandwidth of the frequency selecting amplifier	$\Delta f = 10\ \text{Hz}$
Aperture of the optical system	$f' = 650\ \text{mm}$

采用 MATLAB 语言编写程序,提供图形用户界面,可以输入经优化后的中心波长、波段宽度和波段间隔。如图 11 所示,用户可输入所选择的工作波长,加载试验数据进行空间目标温度和等效辐射面积的计算,并输出结果^[7-9]。

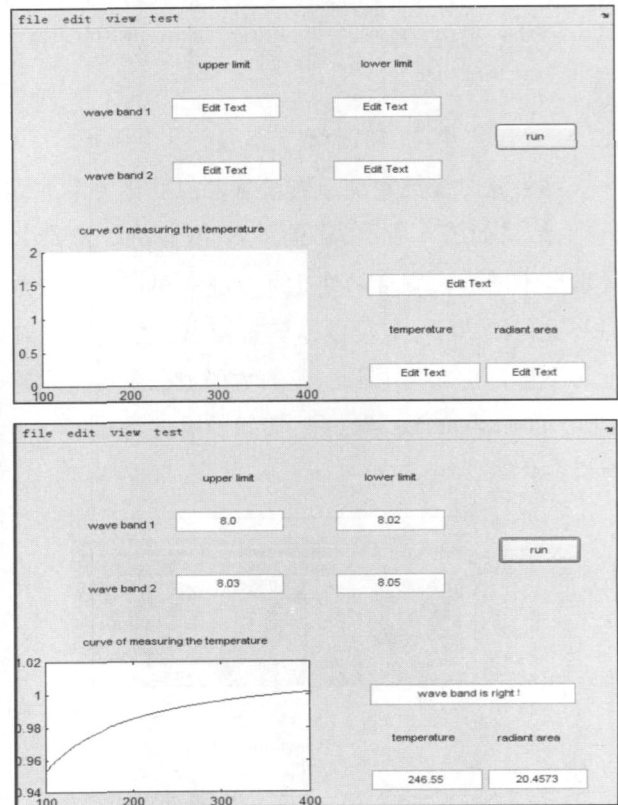


图 11 图形用户界面及结果显示

Fig.11 Graphical user interfaces and result display

4 结论

通过建立空间目标温度测量数学模型,结合系统参数分析系统测温灵敏度、系统测温分辨力、比色测温曲线灵敏度及线性度,给出了测量空间目标温度的工作波长,中心波长分别 $8.01\ \mu\text{m}$ 和 $8.04\ \mu\text{m}$,波段宽度为 $20\ \text{nm}$,波段间隔为 $30\ \text{nm}$,采用插值的方法计算空间目标的温度,计算结果为目标温度 $226.106\ \text{K}$,等效辐射面积为 $20.4573\ \text{m}^2$,温度分辨力高于 $7\ \text{K}$,满足空间目标温度测量的要求,为空间目标探测系统的波段设置提供参考,也为地基空间目标红外辐射特征测量提供了新的思路。

参考文献:

- [1] Gentile T R. Realization of a scale of absolute spectral response using the national institute of standards and technology high-accuracy cryogenic radiometer [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(22): 4392-4403.
 - [2] Gentile T R, Houston J M. National institute of standards and technology high-accuracy cryogenic radiometer [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(7): 1056-1068.
 - [3] Xin Jun, Feng Qibo, Lin Tiesheng, et al. Wavelength optimization of a high-precision non-contact dual-wavelength, fiber-optic pyrometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 26(2): 121-126. (in Chinese)
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.
 - [4] Shi Deheng, Huang Guoqing, Liu Yufang, et al. Working wavelength optimization of a practical real-time temperature measurement system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(6): 545-550. (in Chinese)
施德恒, 黄国庆, 刘玉芳, 等. 一种实用化实时测温系统的工作波长的最优设计[J]. *中国激光*, 2003, 30(6): 545-550.
 - [5] Shi Deheng, Liu Yufang, Chen Yuke, et al. A high-precision optical fiber colorimeter using pyroelectric detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(4): 542-547. (in Chinese)
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
 - [6] Shi Deheng, Chen Yuke, Liu Yufang, et al. A practical dual-wavelength high-precision fiber-optic colorimeter using pyroelectric detector [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(3): 223-227. (in Chinese)
施德恒, 陈玉科, 刘玉芳, 等. 一种采用热电器件的实用化双波长高精度光纤测温仪[J]. *计量学报*, 2004, 25(3): 223-227.
 - [7] Lv Xiangyin, Ling Yongshun, Huang Chaochao, et al. Calculation of surface temperature and infrared radiation for ground target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 563-567. (in Chinese)
吕相银, 凌永顺, 黄超超. 地面目标表面温度及红外辐射的计算[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 563-567.
 - [8] Zhao Qiang, Yang Shizhi, Qiao Yanli, et al. Computation of radiative transfer model based on MODIS infrared channel [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 238-266. (in Chinese)
赵强, 杨世植, 乔延利, 等. 基于 MODIS 红外通道的辐射传输计算[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 238-266.
 - [9] Lv Mingchun, Liang Hongwei. Equivalence study and application of medium-tong IR radiation simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 963-967. (in Chinese)
吕明春, 梁红卫. 中长波红外辐射模拟的等效性研究与应用[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 963-967.
-
- (上接第 1617 页)
- [2] Chen Boliang. Development state of IRFPA imaging device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(1): 1-7. (in Chinese)
陈伯亮. 红外焦平面成像器件发展现状[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(1): 1-7.
 - [3] Guo Jie, Peng Zhenyu, Sun Weiguo, et al. InAs/GaSb superlattices for photodetection in short wavelength infrared range[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 52: 124-126.
 - [4] Chen Lianghui. Development of III-V semiconductor FPA photodetectors of full optical spectrum [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 1-7. (in Chinese)
陈良惠. III-V 族半导体全(多)光谱焦平面探测器新进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 1-7.
 - [5] Perotin M, Coudray P, Gousskov L, et al. Passivation of GaSb by sulfur treatment [J]. *J Electron Mater*, 1994, 23: 7-11.
 - [6] Fukuda Y, Suzuki Y, Shimomura M, et al. $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ -treated InAs (001) surface studied by X-ray photoelectron spectroscopy and low-energy electron diffraction [J]. *Phys Rev B*, 1997, 56: 1084-1088.
 - [7] Ichikawa S, Suzuki Y, Sanada N, et al. An $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ -treated InSb (001) surface studied by using X-ray photoelectron spectroscopy, low-energy electron diffraction, and inverse photoemission spectroscopy [J]. *J Vac Sci Technol A*, 1999, 17: 421-424.