

doi:10.3788/gzxb20134207.0845

空间目标红外双波段成像测温

刘莹奇^{1,2}

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 作为空间目标与地基望远镜红外成像终端间不确定参量之一的地球热辐射, 会降低传统双波段比色测温法正向求解准确度. 为了提高目标温度估计的准确度, 建立了基于红外探测器测量电子数的评价函数, 得到了求解最大似然函数的温度反向求解模型; 推导了双波段比色测温法的温度正向求解模型, 进行了两种测温方法的仿真实验与比较分析. 结果表明: 目标温度反演准确度与成像探测器信噪比、地球热辐射估算准确度以及波段之间的发射率差异有着紧密的关系; 当信噪比较低时, 双波段比色测温法会陷入无解区域; 当信噪比较高时, 双波段比色测温法与最大似然函数法反演温度准确度相当; 最大似然函数法采用有约束与有限内存的拟牛顿优化算法可有效避免目标函数陷入局部最小值; 最大似然函数法具有很强的抗噪音干扰能力, 能扩大目标温度求解的范围, 并具有较高的准确度; 在保证信噪比的情况下, 增加成像波段数目可以提高温度反演准确度.

关键词: 红外测温; 比色测温; 极大似然估计; 蒙特卡罗仿真; 比色测温

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)07-0845-4

Space Target Dual-band IR Imaging Thermometry

LIU Ying-qi^{1,2}

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

(2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The earth's heat radiation, as one of the unknown parameters between the space target and ground-based telescopes infrared imaging terminal, will reduce the traditional dual-band pyrometry forward accuracy. To improve the accuracy of target temperature estimation, an estimation function based on the measured number of electrons is established, and temperature inversed solution model for solving the maximum likelihood function is obtained; dual-band forward solution method based on the number of electrons is derived, and the simulation and analysis of the algorithm is performed. The experimental results indicate that the target temperature inversion precision has a close relationship with the imaging detector signal-to-noise ratio, the earth's thermal radiation estimation accuracy and emissivity difference between bands; when the signal-to-noise ratio is relatively low, the dual-band pyrometry is in no solution; when the signal-to-noise ratio is relatively high, the inversion temperature accuracy of the dual-band pyrometry and maximum likelihood function is quite; function method of maximum likelihood using constraints and limited memory quasi-Newton optimization algorithm can effectively avoid the objective function into a local minimum; maximum likelihood function method has a strong ability to resist noise interference, can expand the scope of object temperature solution, and with high precision; under the guarantee of signal-to-noise ratio, increasing the number of image-band in order to improve the accuracy of temperature inversion.

Key words: Infrared temperature; Color pyrometry; Maximum likelihood estimate; Monte carlo simulation; Color pyrometry

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2012AAXX1009)资助

第一作者: 刘莹奇(1984-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为红外热成像. Email: a1032510210@126.com

收稿日期: 2013-01-08; 录用日期: 2013-03-05

0 引言

空间目标的温度分布可以反映其在轨工作状态等信息,例如太阳能帆板的温度受其功能转换效率所影响.此外温度信息还可以用来识别空间目标结构材料、再入飞行器和火箭尾焰等特性.美国毛伊岛先进光电基地的3.67 m望远镜,配置有长波红外多波段成像终端.该终端具有4个成像波段和2 K的噪音等效温差,其温度测量功能是对空间目标可见光自适应成像的重要技术补充^[1-2].

空间目标与地基望远镜红外成像终端之间的不确定参量将降低理论噪音等效设计温差^[2].不确定参量包括大气透过率、地球热辐射等.地球热辐射与空间目标自身热辐射光谱特征较为相似,目前还没有较准确的估计测量方法^[3].本文研究利用双波段红外成像探测器所获取图像信息反演温度,提高目标温度估计的准确度.首先建立了基于探测器测量电子数的测温原理数学模型,并在此基础上推导了双波段比色^[4]的温度正向求解方法和基于最大似然函数的温度反向求解方法,最后给出了对算法的仿真实验和比较分析.

1 空间目标红外成像测温数学模型

望远镜对空间目标的测温一般选择在地影时段,此时受太阳光等外界因素影响较小.对于红外探测器像元 \bar{x} ,接收的辐亮度由目标和背景辐亮度构成.

目标辐亮度包括目标自身和反射地球的热辐射,可表示为

$$L_{\text{target}}(\bar{x}, \lambda_s) = \epsilon(\bar{x}, \lambda_s) L_{\text{BB}}(T(\bar{x}), \lambda_s) + (1 - \epsilon(\bar{x}, \lambda_s)) L_{\text{illum}}(\lambda_s) \quad (1)$$

式中 $L_{\text{BB}}(T(\bar{x}), \lambda_s)$ 表示目标在温度 T 波长 λ_s 处的自身辐亮度, $L_{\text{illum}}(\lambda_s)$ 表示目标反射的辐亮度, $\epsilon(\bar{x}, \lambda_s)$ 表示目标的发射率.

背景辐亮度包括非制冷红外光机系统的自身热辐射和来自大气天光背景的热辐射^[5],可表示为

$$L_{\text{BG}}(\lambda_s) = L_{\text{warm-optics}}(\lambda_s) + \tau_{\text{warm-optics}}(\lambda_s) L_{\text{sky}}(\lambda_s) \quad (2)$$

式中下脚标 s 表示测温所采用的波段, λ_s 表示第 s 波段的中心波长, $L_{\text{BG}}(\lambda_s)$ 表示背景辐亮度, $L_{\text{warm-optics}}(\lambda_s)$ 表示非制冷红外光学系统辐亮度, $\tau_{\text{warm-optics}}$ 表示非制冷红外光学系统透过率, $L_{\text{sky}}(\lambda_s)$ 表示天空背景辐亮度.

探测器接收的总辐亮度可以表示为

$$L_{\text{tot}}(\bar{x}, \lambda_s) = \tau_{\text{atmos}}(\lambda_s) \tau_{\text{warm-optics}}(\lambda_s) \cdot L_{\text{target}}(\bar{x}, \lambda_s) + L_{\text{BG}}(\lambda_s) \quad (3)$$

式中 $\tau_{\text{atmos}}(\lambda_s)$ 表示大气透过率, $\tau_{\text{warm-optics}}(\lambda_s)$ 表示非制冷红外光学系统透过率.

对于红外探测器像元 \bar{x} ,接收的平均电子数为

$$g_s(\bar{x} | T, \epsilon) = K_s [\tau_s \epsilon(\bar{x}, \lambda_s) L_{\text{BB}}(T(\bar{x}), \lambda_s) + \tau_s (1 - \epsilon(\bar{x}, \lambda_s)) L_{\text{illum}}(\lambda_s) + L_{\text{BG}}(\lambda_s)] \quad (4)$$

$$\tau_s = \tau_{\text{atmos}}(\lambda_s) \tau_{\text{warm-optics}}(\lambda_s) \quad (5)$$

$$K_s = q(\lambda_s) C(\lambda_s) \Delta\lambda_s \quad (6)$$

式中 $g_s(\bar{x} | T, \epsilon)$ 表示积分时间内像素 \bar{x} 在波段 s 探测到的平均电子数, $C(\lambda_s)$ 表示辐亮度与电子数之间的转化因子, $q(\lambda_s)$ 表示焦平面的量子响应效率, $\Delta\lambda_s$ 表示探测波段 s 的光谱响应带宽.

假设红外探测器标定之后,各个像元空间与时间响应变化是相对稳定的,各个像素的光子和读出噪音也是统计独立的.接收的电子数服从平均电子数为信号与背景电子数和的泊松随机变量分布函数;并且满足零平均高斯随机变量分布函数,标准偏差为探测器的读出噪音 σ_{RN} ,联合概率密度分布函数形式为^[6]

$$p^{\text{meas}}(d_s(\bar{x}) + \sigma_{\text{RN}}^2 | T, \bar{\epsilon}) = \prod_{s, \bar{x}} \{ \exp[-(g_s(\bar{x} | T, \bar{\epsilon}) + \sigma_{\text{RN}}^2)] (g_s(\bar{x} | T, \bar{\epsilon}) + \sigma_{\text{RN}}^2)^{d_s(\bar{x}) + \sigma_{\text{RN}}^2} \} / [(d_s(\bar{x}) + \sigma_{\text{RN}}^2)!] \quad (7)$$

式中 $d_s(\bar{x})$ 表示积分时间内像素 \bar{x} 在 s 波段探测到的电子数.

通过对式(7)取对数可得到目标参数值估计的最大似然估计函数^[7]

$$LL^{\text{meas}}(d + \sigma_{\text{RN}}^2 | T, \bar{\epsilon}) = \sum_{s, \bar{x}} [(d_s(\bar{x}) + \sigma_{\text{RN}}^2) \cdot \ln(g_s(\bar{x} | T, \bar{\epsilon}) + \sigma_{\text{RN}}^2) - (g_s(\bar{x} | T, \bar{\epsilon}) + \sigma_{\text{RN}}^2) - \ln(d_s(\bar{x}) + \sigma_{\text{RN}}^2)!] \quad (8)$$

式中,最后一项是与温度和发射率无关的常数项,可以忽略.

2 基于双波段比色的温度正向求解方法

对式(8)关于发射率和温度直接求偏导,并令其为零,可得到目标函数的最大似然参数估计值,如令

$$\frac{\partial LL^{\text{meas}}}{\partial \epsilon'_s} = \sum_s \left[\frac{d_s - g_s(T, \bar{\epsilon})}{g_s(T, \bar{\epsilon}) + \sigma_{\text{RN}}^2} \frac{\partial g_s(T, \bar{\epsilon})}{\partial \epsilon'_s} \right] = 0 \quad (9)$$

可以得到

$$T, \bar{\epsilon}; d_s = g_s(T, \bar{\epsilon}) \quad \forall s \quad (10)$$

将式(4)代入式(10)可得

$$d_{s_1} = K_{s_1} [\tau_{s_1} \epsilon(\bar{x}, \lambda_{s_1}) L_{\text{BB}}(T(\bar{x}), \lambda_{s_1}) + \tau_{s_1} (1 - \epsilon(\bar{x}, \lambda_{s_1})) L_{\text{illum}}(\lambda_{s_1}) + L_{\text{BG}}(\lambda_{s_1})] \quad (11)$$

$$d_{s_2} = K_{s_2} [\tau_{s_2} \epsilon(\bar{x}, \lambda_{s_2}) L_{\text{BB}}(T(\bar{x}), \lambda_{s_2}) + \tau_{s_2} (1 -$$

$$\varepsilon(\bar{x}, \lambda_{s_2}) L_{\text{illum}}(\lambda_{s_2}) + L_{\text{BG}}(\lambda_{s_2}) \quad (12)$$

传统双波段比色测温假设目标为灰体,即

$$\varepsilon(\bar{x}, \lambda_{s_1}) = \varepsilon(\bar{x}, \lambda_{s_2}) \quad (13)$$

则将式(11)~(13)联立可得

$$\begin{aligned} [L_{\text{BB}}(T, \lambda_{s_2})] / [L_{\text{BB}}(T, \lambda_{s_1})] (\tau_{s_2} / \tau_{s_1}) = [d_{s_2} / K_{s_2} - \\ L_{\text{BG}}(\lambda_{s_2}) - \tau_{s_2} \cdot L_{\text{illum}}(\lambda_{s_2}) (1 - \varepsilon(\bar{x}, \lambda_{s_2}))] / [d_{s_1} / \\ K_{s_1} - L_{\text{BG}}(\lambda_{s_1}) - \tau_{s_1} \cdot L_{\text{illum}}(\lambda_{s_1}) (1 - \varepsilon(\bar{x}, \lambda_{s_1}))] \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)即为双波段比色测温正向求解表达式。波段比值式左端取决于目标温度,在(180~360)K的范围内,以每2K递增,计算两个波段的比值,并制成表格。这样由实际观测空间目标在此两个波段的比值(比值式右端),通过查表即可正向求解得到空间目标的温度。

通常情况,当 $\lambda_{s_2} > \lambda_{s_1}$ 时, $L_{\text{BB}}(T, \lambda_{s_2}) > L_{\text{BB}}(T, \lambda_{s_1})$,式(14)的左端大于1。然而在背景噪音过大时,式(14)的右端小于1,这将无法求解目标温度。因此,双波段比色测温正向求解温度的范围是有一定限制的。

3 基于 Maximum Likelihood 函数的温度反向求解方法

最大似然函数式(8)可通过最优化算法求解,即对式(8)求极大值,使多维变量分布概率值最大,反向联合求解目标的温度和发射率。本文采用有约束与有限内存的拟牛顿优化算法(Limited Memory Broyden Fletcher Goldfarb Shanno Bounded Optimization, L-BFGS-B)。L-BFGS-B 适合求解有约束大规模参数变量的最优化问题,具有良好的数值效果和较高的搜索效率,对于凸函数的优化问题,具有全局收敛性^[8-9]。

4 仿真实验与分析

仿真参数与假设条件:

- 1) 红外成像波段: $\lambda_1 = 8 \sim 10 \mu\text{m}, \lambda_2 = 10 \sim 12 \mu\text{m}$;
- 2) 目标数据仿真模型: $T = 300 \text{ K}, \sigma_{\varepsilon} = \{0, 0.005, 0.01, 0.03, 0.1\}$;

- 3) 目标估计函数模型: $200 \text{ K} < T < 400 \text{ K}, \bar{T}_0 = 300 \text{ K}, \sigma_T = 50 \text{ K}, \bar{\varepsilon}_0 = 0.75, \sigma_\varepsilon = 0.2$ 。

首先,由本文的假设条件建立双波段比色测温数学仿真模型,并生成目标的比色温表。对比色测温法在地球热辐射已知与未知的情况下进行比较,并应用 Monte Carlo 数值仿真计算得到温度估计标准差 σ^T ,如图1。不同的颜色代表波段之间发射率的差异程度,灰体对应着波段之间发射率差异为零。由图1可以得出地球热辐射的忽略会降低传统双波段比

色测温法对温度求解的准确度;随着波段之间发射率差异的增大,温度求解准确度严重下降;信噪比越高温度求解准确度越高。

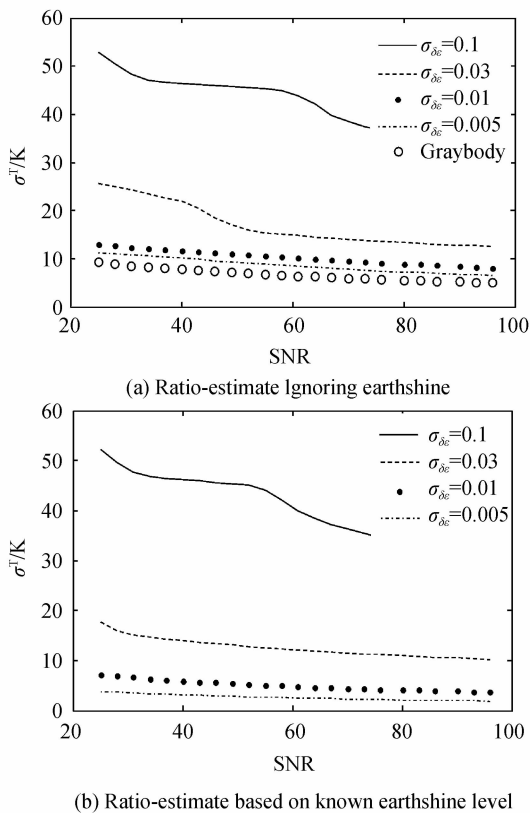
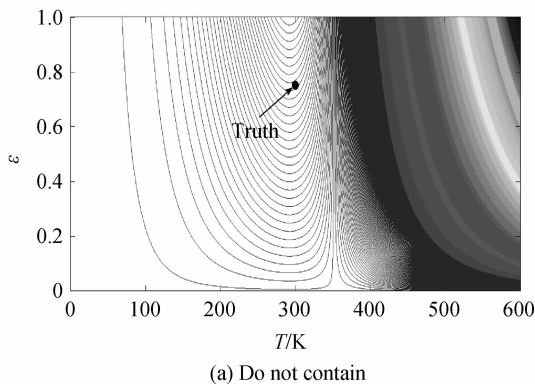


图1 忽略与已知地球热辐射信息情况下双波段比色测温准确度

Fig. 1 Dual-band ratio-estimate in the case of ignoring and knowing earthshine level

其次,由本文假设条件编写求解目标温度和发射率等参数的最大似然估计(Maximum Likelihood, ML)函数。图2(a)和(b)分别为不包含与包含地球热辐射的ML函数。仿真分析可以得出,不包含地球热辐射的ML函数优化算法能够自动寻找到其函数的最优值;对于包含地球热辐射的ML函数,目标函数的曲率形状更加复杂,无法自动寻优;而实际情况是测量的数据一定包含地球热辐射,可见限定目标参数搜索范围,并提供良好的估计初值对目标参数的高准确度求解尤为重要。最后,基



(a) Do not contain

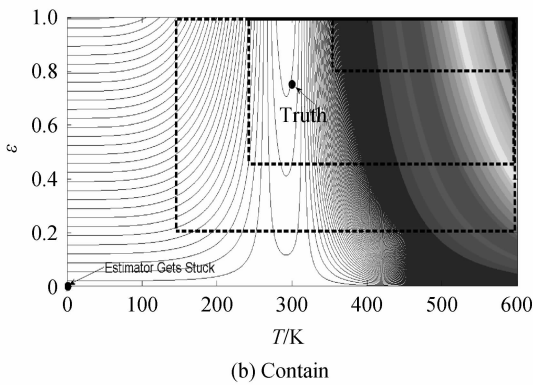


图2 不包含与包含地球热辐射的 ML 函数

Fig. 2 ML function does not contain/contains the Earth's heat radiation

于 ML 函数的温度反向求解方法在地球热辐射已知与未知的情况下进行比较,并应用 Monte Carlo 数值仿真计算得到温度估计标准差 σ^T ,如图 3. 不同的线段类型代表波段之间发射率的差异程度. 由图 3 可以得出地球热辐射的忽略与否对 ML 函数温度求解准确度影响不大;同样,随着波段之间发射率差异的增大,温度求解准确度严重下降,信噪比越高,温度求解准确度越高.

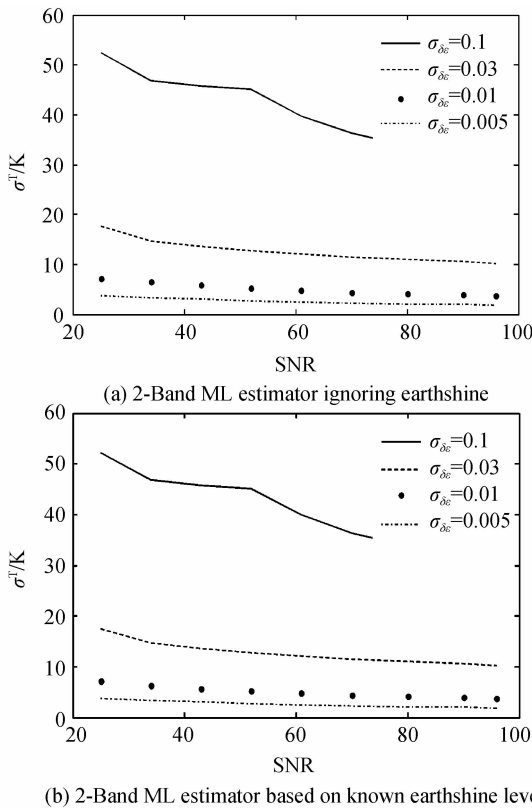


图3 忽略已知地球热辐射信息情况下 ML 函数温度求解准确度

Fig. 3 ML estimate in the case of ignoring and knowing earthshine level

5 结论

本文对空间目标的红外双波段温度分布反演进

行了研究. 空间目标温度反演准确度与成像探测器的信噪比、地球热辐射的估算准确度等有着紧密的关系. 当信噪比较低的时候,双波段比色测温法会陷入无解区域,而 ML 函数法仍能够求解温度;当信噪比较高的时候,双波段比色测温法与 ML 函数法反演温度准确度相当;ML 函数采用 L-BFGS-B 搜索算法求解可有效避免目标函数陷入局部最小值;ML 函数法具有很强的抗噪声干扰能力,扩大目标温度求解的范围,并具有较高的准确度;此外非目标像素点有效温度接近 0 K,发射率接近 1,比色测温法需要事前对非目标像素点进行处理,而 ML 函数法非目标像素点会被算法自动识别而剔除.

两波段相隔越近,波段间发射率差异越小,因此,地基望远镜采用双波段测温所选波段尽量靠近;红外成像终端光机结构制冷,即采用低温冷光学,降低自身背景热辐射,提高信噪比;理论上反演温度的波段数越多,温度求解模型抗误差干扰能力越强,建议在保证信噪比的情况下,应用低温光谱细分技术增加成像波段数量. 本文的研究将为相关空间目标测温装置的研制提供技术支持.

参考文献

- [1] VIGIL M L, WITTE D J. Sensor suite for advanced electro-optical system(AEOS) 3. 6-meter telescope[C]. *SPIE*, 1996, **2819**: 151-169.
- [2] GERWE D R. High resolution imaging thermometry [J]. *Proceedings of Maui*, 2005, **1**: 68-98.
- [3] WANG Guo-qiang, WU Yuan-hao. Ground-based measurement on the infrared characteristic of space object[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(9): 1634-1639. 王国强, 吴元昊. 空间目标红外辐射特征的地基测量[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(9): 1634-1639.
- [4] ZHANG Xiao-long, LIU Ying, ZHANG Ying, et al. Thermometry technology of IR dual color composite simulation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 173-178. 张晓龙, 刘英, 张盈, 等. 红外双色复合仿真系统测温技术研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(2): 173-178.
- [5] QUINN T J, MARTIN J E. Cryogenic radiometry, prospects for further improvements in accuracy[J]. *Metrologia*, 1991, **28**(1): 155-161.
- [6] GOODMAN J W. Statistical optics[M]. QING Ke-cheng, LIU Pei-shen, CAO Qi-zhi Transl. Beijing: Science Press, 1992.
- [7] NIE Hong-bin, HOU Qing yu, ZHAO Ming, et al. IR/visible image registration based on EM iteration of log-likelihood function[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(3): 657-663. 聂宏宾, 侯晴宇, 赵明, 等. 基于似然函数 EM 迭代的红外与可见光图像配准[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(3): 657-663.
- [8] VOGEL C R. Computational methods for inverse problems [M]. Philadelphia: SIAM Press, 2002.
- [9] KAY S M. Fundamentals of statistical signal processing: estimation Theory [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall PTR, 1993.
- [10] WANG Shi-tao, ZHANG Wei, WANG Qiang. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(3): 484-491. 王世涛, 张伟, 王强. 红外探测器件在低温背景下的探测率测试[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(3): 484-491.