文章编号:1002-2082(2013)04-0648-05

# 空间目标红外双波段比色测温法精度分析

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,吉林 长春 130033;2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘 要:针对空间目标与地基望远镜红外成像传感器终端之间的不确知参量将降低双波段比色测温法求解精度,且精度影响程度未知,假设目标为灰体,对包含不确知参量的最大似然估计函数关于发射率求偏导,建立基于红外探测器测量电子数的双波段比色测温数学模型,并进行双波段比色测温法的蒙特卡洛仿真实验与精度分析。对于大气透过率的估算,提出应用红外自然星体的大气透过率现场标校方法。空间目标温度反演精度与成像探测器的信噪比、大气透过率、地球热辐射以及波段之间的发射率差异等未知参量的估算精度有关。结果表明:信噪比高于 20,波段之间发射率差异小于 0.03,地球热辐射预测精度优于 50%,大气透过率预测精度优于 10%时,比色测温法优于 40 K 的温度估计精度。

关键词:地基望远镜;红外成像;温度分布;比色测温;蒙特卡洛

中图分类号:TN219; TB133 文献标志码:A doi:10.5768/JAO201334.0404001

## Accuracy analysis of space target infrared dual-band pyrometry

LIU Ying-qi[1,2]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract**: The unknown parameters between space target and ground-based telescopes infrared imaging terminal reduce the dual-band pyrometry accuracy, and the influence degree is unknown. Assuming that the target is gray body, the partial derivative of maximum likelihood estimation function about emissivity is solved. The dual-band pyrometry mathematical model based on infrared detectors to measure the electron number is established, and the Monte Carlo simulation and precision analysis of dual-band pyrometry is performed. The field calibration method of atmospheric transmittance prediction based on infrared natural star is proposed. The inversion precision of space target temperature has a close relationship with the imaging detector signal-to-noise (SNR) ratio, the earth's thermal radiation estimation accuracy, atmospheric transmittance and emissivity difference between bands. When the SNR is above 20, emissivity difference is less than 0.03, the earth radiation prediction accuracy is better than 50%, and atmospheric transmittance prediction accuracy is better than 10%, the temperature estimation precision of dual-band pyrometry is better than 40 K.

**Key words**: ground-based telescope; infrared imaging; temperature distribution; colorimetric pyrometry; Monte Carlo

收稿日期:2013-01-10; 修回日期:2013-04-18
基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2012AAXXX1009)
作者简介:刘莹奇(1984—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事红外热成像方面的研究工作。
E-mail: a1032510210@126.com

## 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站的 3.67 m 望远镜,配置有长波红外双面阵探测器,具有双波段比色测温功能,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知参量将降低理论噪声等效设计温差[2],不确知参量包括不同波长目标发射率差异、大气透过率和地球热辐射等。本文研究并定量分析不确知参量对空间目标温度反演的影响。建立基于红外探测器测量电子数的双波段比色测温数学分析模型,电子数法更能精确反映不同噪声源对系统测温性能的影响;论述了高精度的大气透过率现场标校方法;最后应用 Monte Carlo 法对双波段比色测温法进行了仿真实验与精度分析。

## 1 基于探测电子数的空间目标红外双波段比色测温数学模型

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[3-5]。

目标辐亮度包括目标自身和反射地球的热辐射,可表示为

$$L_{t\,\mathrm{arg}\,et}(\bar{x},\lambda_s)=[\varepsilon(\bar{x},\lambda_s)L_{BB}(T(\bar{x},\lambda_s)+(1-\varepsilon(\bar{x},\lambda_s))L_{\mathrm{illum}}(\lambda_s))] \tag{1}$$

式中:$L_{BB}(T(\bar{x}),\lambda_s)$表示目标在温度 $T$ 波长 $\lambda_s$ 处的自身辐亮度;$L_{\mathrm{illum}}$表示目标反射的辐亮度;$\varepsilon(\bar{x},\lambda_s)$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[6-7],可表示为

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

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

探测器接收的总辐亮度可以表示为

$$L_{tot}(\bar{x},\lambda_s)=\tau_{\mathrm{atmos}}(\lambda_s)\tau_{\mathrm{warm\text{-}optics}}(\lambda_s)L_{t\,\mathrm{arg}\,et}(\bar{x},\lambda_s)+L_{BG}(\lambda_s) \tag{3}$$

式中:$\tau_{\mathrm{atmos}}(\lambda_s)$表示大气透过率;$\tau_{\mathrm{warm\text{-}optics}}(\lambda_s)$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

$$g_s(\bar{x}\mid T,\varepsilon)=K_s[\tau_s\varepsilon(\bar{x},\lambda_s)L_{BB}(T(\bar{x}),\lambda_s)+(1-\varepsilon(\bar{x},\lambda_s))L_{\mathrm{illum}}(\lambda_s)+L_{BG}(\lambda_s)] \tag{4}$$

其中,

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

$$K_s=q(\lambda_s)C(\lambda_s)\ \Delta\lambda_s \tag{6}$$

式中:$g_s(\bar{x}\mid T,\varepsilon)$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的波动是相对稳定的,各个像素的光子和读出噪声是统计独立的[8]。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分布函数,标准偏差为探测器的读出噪声 $\sigma_{RN}$,联合概率密度分布函数形式如下[9]:

$$p^{\mathrm{meas}}(d_s(\bar{x})+\sigma_{RN}^2\mid T,\bar{\varepsilon})=\prod_{s,\bar{z}}\frac{\exp[-(g_s(\bar{x}\mid T,\bar{\varepsilon})+\sigma_{RN}^2)](g_s\bar{x}\mid T,\bar{\varepsilon})+\sigma_{RN}^2{}'d,(\bar{x})+\sigma_{RN}^2)}{(d_s(\bar{x})+\sigma_{RN}^2)!} \tag{7}$$

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(7)式取对数可得到目标参数值估计的最大似然估计函数:

$$LL^{\mathrm{meas}}(d+\sigma_{RN}^2\mid T,\bar{\varepsilon})=\sum_{s,\bar{z}}[(d_s(x)+\sigma_{RN}^2)\cdot\ln(g_s(\bar{x}\mid T,\bar{\varepsilon})+\sigma_{RN}^2)-(g_s(\bar{x}\mid T,\bar{\varepsilon})+\sigma_{RN}^2)-\ln(d_s(\bar{x})+\sigma_{RN}^2)] \tag{8}$$

最后一项是与温度和发射率无关的常数项,

可以忽略。

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

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

可以得到:

$$T,\bar{\varepsilon}:d_s=g_s(T,\bar{\varepsilon})\ \forall\, s \tag{10}$$

将(4)式带入(10)式可得:

$$d_{s1}=K_{s1}[\tau_{s1}\varepsilon(\bar{x},\lambda_{s1})L_{BB}(T(\bar{x}),\lambda_{s1})+\tau_{s1}(1-\varepsilon(\bar{x},\lambda_{s1}))L_{\text{illum}}(\lambda_{s1})+L_{BG}(\lambda_{s1})] \tag{11}$$

$$d_{s2}=K_{s2}[\tau_{s2}\varepsilon(\bar{x},\lambda_{s2})L_{BB}(T(\bar{x}),\lambda_{s2})+\tau_{s2}(1-\varepsilon(\bar{x},\lambda_{s2}))L_{\text{illum}}(\lambda_{s2})+L_{BG}(\lambda_{s2})] \tag{12}$$

双波段比色测温假设目标为灰体,即

$$\varepsilon(\bar{x},\lambda_{s1})=\varepsilon(\bar{x},\lambda_{s2}) \tag{13}$$

将(11)式、(12)式和(13)式联立可得到如下关系式:

$$\frac{L_{BB}(T,\lambda_{s2})\tau_{s2}}{L_{BB}(T,\lambda_{s1})\tau_{s1}}=\frac{d_{s2}/K_{s2}-L_{BG}(\lambda_{s2})-\tau_{s2}\cdot L_{\text{illum}}(\lambda_{s2})(1-\varepsilon(\bar{x},\lambda_{s2}))}{d_{s1}/K_{s1}-L_{BG}(\lambda_{s1})-\tau_{s1}\cdot L_{\text{illum}}(\lambda_{s1})(1-\varepsilon(\bar{x},\lambda_{s1}))} \tag{14}$$

(14)式即为双波段比色测温求解表达式。波段比值式左端取决于目标温度,在 180 K~360 K 的范围内,以每 2 K 递增,计算 2 个波段的比值,并制成表格。这样由实际观测空间目标在此 2 个波段的比值(比值式右端),通过查表就可以求解得出空间目标的比色温度。

由(13)式和(14)式可以直观分析出,不确知因素实际测温波段之间的发射率差异、大气透过率和地球热辐射等对比色测温法的精度有着较大的影响。

## 2 大气透过率的预测原理

大气透过率和地球热辐射可以通过 MODTRAN 软件进行估算,但精度较低。大气透过率可应用红外自然星体作现场标校,速度快且具有较高的精度,具体原理如下:

对红外标准星的光谱数据进行积分,可得其大气层外辐照度,设其为 $E_{\text{top}}$,则有:

$$E_{\text{top}}=\int_{\lambda 1}^{\lambda 2}P(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{15}$$

式中:$P(\lambda)$为天基红外载荷测得的红外自然星光谱数据;$\lambda_1\sim\lambda_2$ 为仪器测温波段。已标定红外测温系统入瞳处的辐照度可根据系统输出数码值直接得到,设其为 $E_{\text{bottom}}$,则在红外测温系统工作波段范围内的平均透过率 $t$ 为

$$t=\frac{E_{\text{bottom}}}{E_{\text{top}}}=\exp(-\tau(\lambda)m(\theta)) \tag{16}$$

式中:$\tau(\lambda)$为总的垂直方向大气消光光学厚度(大气衰减);$m(\theta)$为大气质量。由单颗标准星即可获得$\tau(\lambda)$,但为提高精度,应尽量测量多颗标准星,以对$\tau(\lambda)$取均值。

## 3 仿真实验与精度分析

仿真参数与假设条件如下。

1) 红外成像波段:

$\lambda_1=8\ \mu\text{m}\sim10\ \mu\text{m}$,

$\lambda_2=8\ \mu\text{m}\sim12\ \mu\text{m}$;

2) 目标数据仿真模型:$T=300$ K,

$\sigma_{\delta\varepsilon}=\{0,\ 0.005,0.01,\ 0.03,\ 0.1\}$;

3)目标估计函数模型:200 K$<T<$400 K,

$\overline{T}_o=300$ K,$\sigma_T=50$ K,$\bar{\varepsilon}_o=0.75$,$\sigma_e=0.2$。

首先,由以上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。利用对比色测温法对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$\sigma_T$,如图 1 和图 2 所示。不同的线形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 和图 2 可以得出对地球热辐射的忽略会降低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,温度求解精度严重下降;信噪比越高,温度求解精度越高。

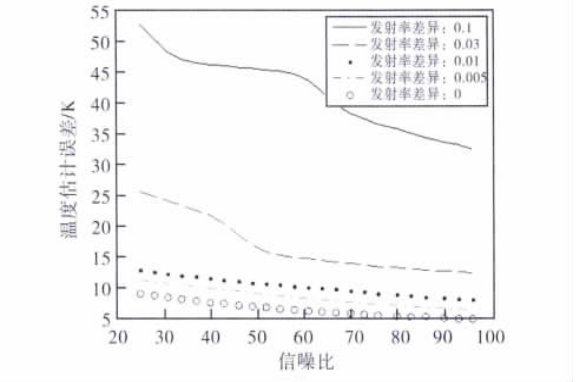



图 1 忽略地球热辐射信息情况下双波段比色测温精度

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

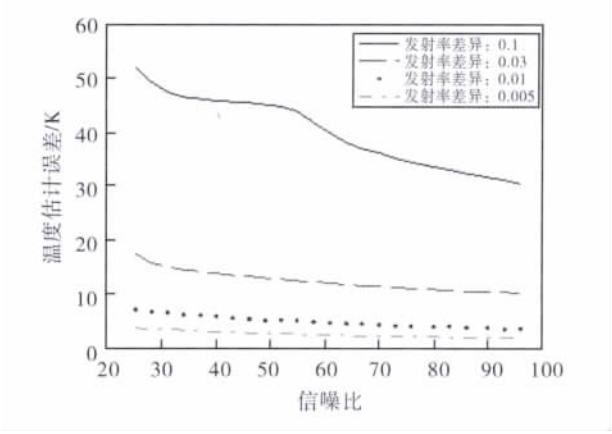



图 2 已知地球热辐射信息情况下双波段比色测温精度

Fig. 2 Dual-band ratio-estimate in case of knowing earthshine level

其次,利用上面建立的双波段比色测温数学仿真模型与 Monte Carlo 数值仿真法计算大气透过率预测精度对双波段比色测温法对温度求解准确度的影响,如图 3 和图 4 所示。图 3 中不同的线形代表地球热辐射的预测精度;图 4 中不同的线形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。由这 2 幅图可以得出:随着对大气透过率预测精度的下降,温度求解精度严重下降;当大气透过率预测精度在 10%以下时,温度反演精度开始大幅度下降,尤其是在地球热辐射的先验信息未知的情况下。

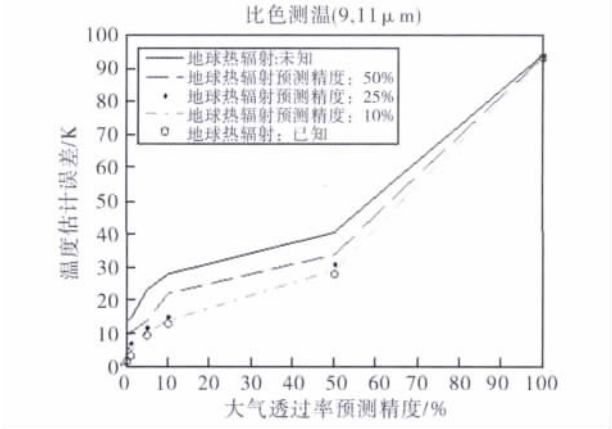



图 3 不同地球热辐射先验情况下大气透过率预测精度对温度估计精度的影响

Fig. 3 Influence of prediction accuracy of atmospheric transmittance on temperature accuracy under different prior knowledge of earthshine

最后,要说明的是,在 $\lambda_{s2}>\lambda_{s1}$ 时,一般 $L_{BB}(T,\lambda_{s2})>L_{BB}(T,\lambda_{s1})$,即(14)式左端大于 1,然而在背景噪声过大的时候将使得(14)式右端小于 1,这时候会无法求解目标的温度,即比色法对温度的求解是有一定范围的。因此,比色测温法需要事前对非目标像素点进行剔除。

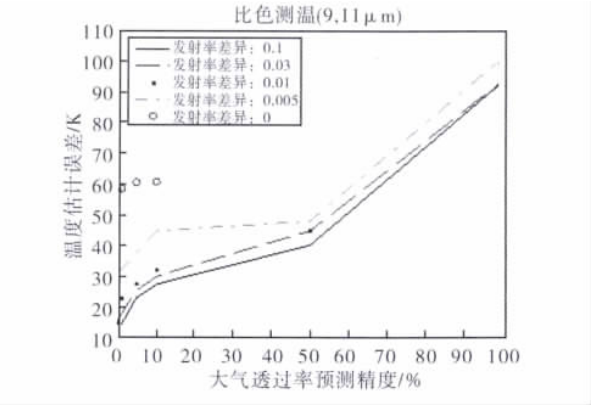



图 4 不同发射率情差异情况下大气透过率预测精度对温度估计精度的影响

Fig. 4 Influence of prediction accuracy of atmospheric transmittance on temperature prediction accuracy in case of different emittance

## 4 结论

本文对低轨空间目标的红外双波段比色测温法进行了研究。研究过程中发现空间目标温度反演精度与成像探测器的信噪比、大气透过率和地球热辐射等未知参量的估算精度有着紧密的关系;当信噪比比较低的时候,反演温度误差较大,尤其是在地球热辐射信息未知的情况下;波段之间的差异越大,反演温度误差越大,尤其是波段之间发射率差异超过 0.1 的情况;比色测温法需要大气透过率预测精度优于 10%(大气透过率为 0.5 的条件下),才能保证较高的温度反演精度。

本文建议地基望远镜采用双波段比色法对空间目标测温时,成像波段选择尽量接近,尽量选择地影时刻,降低太阳等外界因素对测温精度的影响;大气透过率采用红外自然星体进行现场标校,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。

参考文献:

[1] VIGI M L, WITTE D J, LEVANP D, et al. Sensor suite for advanced eelectro-optical system (AEOS) 3.6-meter telescope [J]. SPIE, 1996, 2819: 151-169.

[2] GERWE D R, HILL J L, STRIBLING B S. High resolution imaging thermometry [C]. Hawaii: Air Force Research Laboratory, 2005.

[3] 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.
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. (in Chinese with an English abstract)

[4] 王国强, 吴元昊, 张世学, 等. 空间目标色温测量的波段选择[J]. 红外, 2012, 33(1): 17-21.
WANG Guo-qiang, WU Yuan-hao, ZHANG Shi-xue, et al. Band selection in measurement of colour temperature of space object[J]. Infrared, 2012, 33(1): 17-21. (in Chinese with an English abstract)

[5] 王国强, 吴元昊, 曹景太. 提高空间目标温度测量精度的波段优选方法[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 738-742.
WANG Guo-qiang, WU Yuan-hao, CAO Jing-tai. Waveband optimization method for enhancing precision of measuring space object's temperature [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4): 738-742. (in Chinese with an English abstract)

[6] QUINN T J, MARTIN J E. Cryogenic radiometry, prospects for further improvements in accuracy [J]. Metrologia, 1991, 28(1): 155-161.

[7] GENTILE T R, HOUSTON J M. National institute of standards and technology high-accuracy cryogenic radiometer [J]. Applied Optics, 1996, 35(7): 1056-1068.

[8] SMITH D. ATSR infrared radiometric calibration and in orbit performance[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 116(15): 4-16.

[9] GOODMAN J W. Statistical Optics [M]. Translated by CHENG Qing-ke, LIU Pei-shen, CAO Qi-zhi. Beijing: Science Press, 1992.