

空间目标红外多波段温度分布反演

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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 地基望远镜对空间目标的长焦距红外成像能够得到空间目标的温度区域分布信息, 然而成像过程的未知参量将降低传统的双波段比色测温法正向求解精度。未知参量包括目标发射率、大气透过率、地球热辐射等。文中建立了基于多波段红外探测器测量电子数的贝叶斯估计评价函数模型, 能够比较精确地反向求解空间目标的真实温度分布; 并推导了目标参量估计函数的克拉美·罗界, 能够预测一系列不确定因素对其温度和发射率等参数求解精度的影响; 最后进行了算法的仿真实验与分析。

关键词: 温度估计; 地基望远镜; 红外多波段成像; 贝叶斯估计; 克拉美·罗界

中图分类号: V11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0556-06

Inversion of space target infrared multi-band temperature distribution

Liu Yingqi^{1,2}

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The temperature distribution of space objects can reflect in-orbit state. Ground-based and long-focal length imaging of space objects in infrared band provides information from which temperature distribution maps can be determined. The methods of the traditional temperature estimation are often single-band radiance and dual-band color thermometry. Uncertainties in the imaging process will reduce the traditional single-band radiance and dual-band color thermometry forward calculation accuracy. Such uncertainties include target emissivity, atmospheric transmittance, the earth's heat radiation, etc. In this paper, multi-band Bayesian estimation function model relating the measured number of electrons was established, the true temperature of space target could be more accurately solved. The model provided an estimation theoretic framework for developing optimal estimators and calculating Cramer-Rao lower bounds. The Cramer-Rao bounds of target parameter estimation function was derived, which could predict the accuracy of solving of the temperature and emissivity. Finally, the simulation and analysis of the algorithm was performed.

Key words: temperature estimation; ground-based telescope; multi-band infrared imaging; Bayesian estimation; Cramer-Rao bounds

收稿日期: 2012-07-05; 修订日期: 2012-08-03

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2011AAXX1009)

作者简介: 刘莹奇(1984-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事红外热成像方面的研究。Email: a1032510210@126.com

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站的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的噪声等效温差,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声等效设计温差^[2]。传统的空间目标温度求解通常是单波段辐亮度与双波段的比色查表法正向求解温度^[3]。文中研究利用多波段红外成像探测器所获取图像信息反向联合反演目标温度,提高温度估计的准确度。文中首先建立了基于探测器测量电子数的测温原理数学模型,并给出了求解未知参量的最大似然目标函数和具有先验信息的最大似然目标函数,推导了相应的克拉美·罗界;接着介绍了用于求解目标函数的最优化算法;最后给出了对算法的仿真实验和分析。

1 红外多波段测温原理数学模型

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:

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

式中: λ_s 表示第s波段的中心波长; $L_{\text{BB}}(T(\bar{x}), \lambda_s)$ 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; $\varepsilon(\bar{x}, \lambda_s)$ 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:

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

式中: $L_{\text{BG}}(\lambda_s)$ 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:

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

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:

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

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

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

式中: $g_s(\bar{x}|T, \varepsilon)$ 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独立统计的^[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函数,标准偏差为探测器的读出噪声 σ_{RN} ,联合概率密度分布函数形式如下:

$$p^{\text{meas}}(d_s(\bar{x}) + \sigma_{\text{RN}}^2 | T, \varepsilon) =$$

$$\prod_{s,z} \frac{\exp[-(g_s(\bar{x}|T, \varepsilon) + \sigma_{\text{RN}}^2)] (g_s(\bar{x}|T, \varepsilon) + \sigma_{\text{RN}}^2)^{d_s(\bar{x}) + \sigma_{\text{RN}}^2}}{(d_s(\bar{x}) + \sigma_{\text{RN}}^2)!} \quad (7)$$

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。

1.1 最大似然估计函数 ML 表达式

通过对公式(7)取对数可得到目标参数值估计的最大似然估计函数:

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

其中,最后一项是与温度和发射率无关的常数项,可以忽略。

1.2 最大先验估计函数 MAP 表达式

先验信息包括区域目标温度、发射率和地球热辐射等。温度与发射率服从联合先验高斯分布:

$$p^{\text{prior}}(T, \varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(T - T_0)^2}{2\sigma_T^2}\right] \frac{1}{(2\pi)^{N_s/2} |\Lambda_\varepsilon|^{1/2}} \cdot$$

$$\exp[-(\bar{\varepsilon}-\bar{\varepsilon}_0)^T \mathbf{A}_\varepsilon^{-1} (\bar{\varepsilon}-\bar{\varepsilon}_0)] \quad (9)$$

对公式(9)取对数得到:

$$\text{LL}^{\text{prior}}(\mathbf{T}, \bar{\varepsilon}) = - \left[\frac{(\mathbf{T}-\mathbf{T}_0)^2}{2\sigma_T^2} + (\bar{\varepsilon}-\bar{\varepsilon}_0)^T \mathbf{A}_\varepsilon^{-1} (\bar{\varepsilon}-\bar{\varepsilon}_0) \right] + c \quad (10)$$

式中: \mathbf{T}_0 , $\bar{\varepsilon}_0$ 为平均温度与发射率; σ_T^2 为温度 \mathbf{T} 的方差; \mathbf{A}_ε 为发射率的协方差矩阵, 对角线表示发射率的方差, 非对角线元素表示发射率间的协方差。

根据贝叶斯定理可得:

$$\mathbf{p}(\mathbf{d}, \mathbf{T}, \bar{\varepsilon}) = \mathbf{p}^{\text{meas}}(\mathbf{d}|\mathbf{T}, \bar{\varepsilon}) \mathbf{p}^{\text{prior}}(\mathbf{T}, \bar{\varepsilon}) \quad (11)$$

对公式(11)取对数得到最大先验估计函数表达式为:

$$\text{LL}(\mathbf{d}, \mathbf{T}, \bar{\varepsilon}) = \text{LL}^{\text{meas}}(\mathbf{d}|\mathbf{T}, \bar{\varepsilon}) + \text{LL}^{\text{prior}}(\mathbf{T}, \bar{\varepsilon}) \quad (12)$$

1.3 克拉美·罗界

克拉美·罗界(Cramer-Rao Bounds, CRB)是衡量参数估计性能的重要参数^[9], 任何无偏估计量的误差协方差矩阵满足不等式(13), 即 CRB:

$$\sigma_{\hat{\theta}_k}^2 = \langle [\hat{\theta}_k - \bar{\theta}_k]^2 \rangle \geq \text{CRB}_{\text{classic}}(\bar{\theta})_k = [\mathbf{F}(\bar{\theta})^{-1}]_{kk} \quad (13)$$

式中: $\bar{\theta}$ 是估计参数; $\hat{\theta}_k$ 为 $\bar{\theta}$ 的无偏估计量; $\mathbf{F}(\bar{\theta})$ 是 Fisher Information 矩阵,

$$\mathbf{F}(\bar{\theta})_{jj} = \left\langle - \frac{\partial^2 \ln \mathbf{p}^{\text{meas}}(\mathbf{d}, \bar{\theta})}{\partial \theta_j \partial \theta_j} \right\rangle_{\text{noise}} \quad (14)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 代表随机变量的数学期望。

1.3.1 ML 函数的平均 CRB

假设未知参数变量的统计值由 $\mathbf{p}^{\text{prior}}(\bar{\theta})$ 所描述, 那么极大似然估计函数的 CRB 可由下式得到:

$$\langle \text{CRB}_{\text{classic}}(\bar{\theta})_k \rangle_{\mathbf{p}^{\text{prior}}(\bar{\theta})} = \int \mathbf{d}\bar{\theta} \{ [\mathbf{F}(\bar{\theta})^{-1}]_{kk} \mathbf{p}^{\text{prior}}(\bar{\theta}) \} \quad (15)$$

这样误差估计精度的预测不依靠特定的目标参数值, 而是取决于估计参数的先验信息分布。

1.3.2 MAP 函数的 CRB

具有先验信息极大似然估计函数的 CRB 如下式所述:

$$\text{CRB}_{\text{Bayesian}}(\bar{\theta})_k = \{ [\langle \mathbf{F}(\bar{\theta}) \rangle_{\mathbf{p}^{\text{prior}}(\bar{\theta})}]^{-1} \}_{kk} = \left\{ \left[\int \mathbf{d}\bar{\theta} \{ \mathbf{F}(\bar{\theta}) \mathbf{p}^{\text{prior}}(\bar{\theta}) \} \right]^{-1} \right\}_{kk} \quad (16)$$

同极大似然估计函数的平均 CRB 求解类似, 误

差估计精度的预测不依靠特定的目标参数值, 而是取决于估计参数的先验信息分布。公式(16)涉及对目标参数估计量的多维积分, 计算量比较大, 可应用蒙特卡洛求积公式近似求解^[9]。

2 目标函数求解

通过对最大似然函数求极值使多维变量分布概率值最大, 联合求解不确定参数值。对于多变量参数目标函数的求解, 目前有很多优化算法。文中采用有约束和有限记忆的 BFGS 方法, 即 L-BFGS-B 方法。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^[9]。

空间目标温度分布在 180~360 K 之间, 有效发射率在 0~1 之间^[3]。非目标像素点有效温度接近 0 K, 发射率接近 1, 非目标像素点会被算法自动识别并剔除。地球和空间目标自身的温度与辐射光谱特性及其相似, 导致无先验 ML 函数对目标自身的和反射的热辐射两参量区分能力非常弱, 带有目标发射率、温度等先验信息的 MAP 函数对目标自身的和反射的辐射具有很强的分辨能力。图 1 所示为不包含地球热辐射的 MAP 函数, 通过实验得出应用无约束的 L-BFGS 算法能找到目标函数全局最优值。和许多其他优化算法一样, 提供良好的算法初值仍然很重要, 对于包含地球热辐射的 MAP 函数, 会使目标函数的曲率形状更加复杂, 应用无约束的 L-BFGS 算法求解时很容易陷入局部最优解。应用有约束的 L-BFGS-B 算法逐渐扩大目标参数搜索范围, 最终搜索到目标函数的全局最优解, 如图 2 所示。

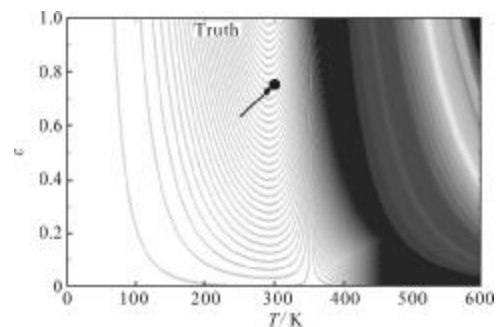


图 1 不包含地球热辐射的 MAP 函数

Fig.1 MAP function when the earth's heat radiation isn't present

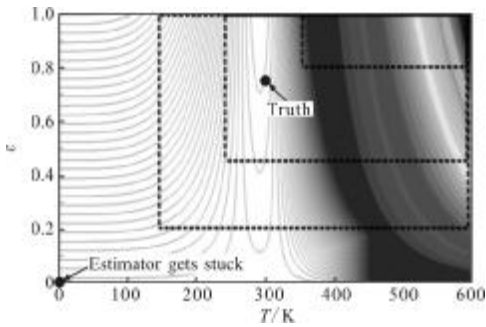


图 2 包含地球热辐射的 MAP 函数

Fig.2 MAP function when the earth's heat radiation is present

3 仿真实验与分析

仿真参数与假设条件如下。

- (1) 红外成像波段: $\lambda_1=8.35\sim 9.19\ \mu\text{m}$, $\lambda_2=10.1\sim 12.9\ \mu\text{m}$, $\lambda_3=11.1\sim 12.2\ \mu\text{m}$, $\lambda_4=12.7\sim 13.5\ \mu\text{m}$;
- (2) 目标数据仿真模型: $T=300\text{K}$, $\sigma_{\text{de}}=\{0, 0.01, 0.03, 0.1, 0.3\}$;
- (3) 目标估计函数模型: $200 < T < 400\text{K}$, $\bar{T}_0=300\text{K}$, $\sigma_T=50\text{K}$, $\bar{\varepsilon}_0=0.75$, $\sigma_\varepsilon=0.2$ 。

由以上假设条件编写求解目标温度和发射率等参数的 ML 与 MAP 函数, 并比较 ML 和 MAP 目标估计函数对温度的求解精度与相应的 CRB。

首先比较一下 MAP 和 ML 估计函数对温度的求解性能, 为简化问题起见, 考虑双波段的情况。在不同信噪比情况下, 对 MAP、ML 温度估计函数进行 Monte Carlo 数值仿真计算, 得到温度估计标准差 σ_T , 并与理论计算的 CRB 进行比较。在低信噪比情况下, MAP 估计函数的性能明显优于 ML 估计函数, 如图 3 所示。伴随着信噪比的提高, MAP 和 ML 估计函数对温度的估计性能趋于一致, MAP 估计函数的性能略优于 ML 函数, 并与 CRB 值相逼近; 波段之间的发射率差异越大, 温度估计的标准差越大, 如图 4 所示。

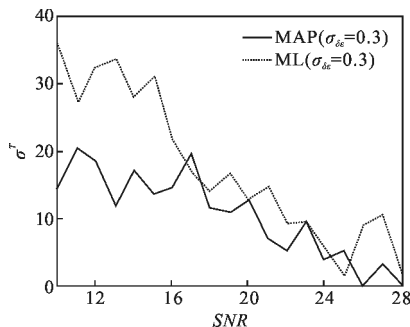


图 3 双波段低信噪比情况下 MAP 与 ML 估计函数性能比较

Fig.3 Performance of the ML algorithms as compared to MAP in the case of dual-band low signal-to-noise ratio

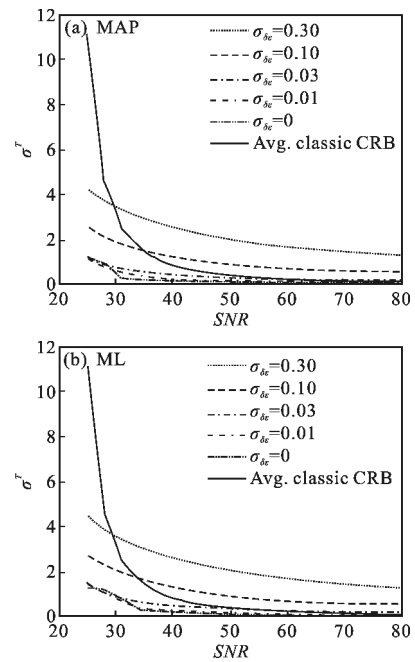


图 4 双波段高信噪比情况下 MAP 与 ML 估计函数性能比较
Fig.4 Performance of the ML algorithms as compared to MAP in the case of dual-band high signal-to-noise ratio

在不同信噪比情况下, 对 MAP、ML 温度估计函数的 CRB 进行了计算, 如图 5 所示。MAP 的 CRB 求解涉及到对目标发射率与温度协方差先验信息矩阵的多维函数积分, 采用 Monte Carlo 近似方法计算。由图 5 可以看出, MAP 函数的 CRB 与波段之间发射率关系不大, 在低信噪比情况下 MAP 的 CRB 优于 ML 的 CRB, 信噪比较高的情况下两者趋于一致。

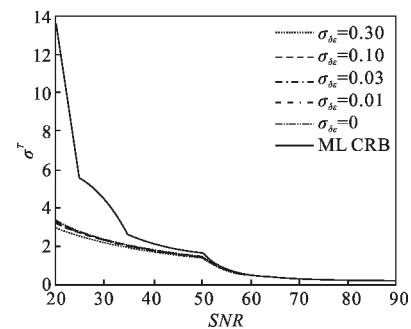


图 5 双波段情况下 ML 与 MAP 的 CRB 比较

Fig.5 Performance of the ML CRB as compared to MAP in the case of dual-band

通过 MODTRAN 软件对大气透过率估算精度最高可达到 5%~10%, 然而目前对地球热辐射的估算还不成熟。假设目标在探测器像面占有 N 个像元, 未知参量包括大气透过率、地球热辐射、目标发射率

和温度,大气透过率、地球热辐射各个像元保持不变,这样一共有 $2 \times N + 2$ 个自由变量。双波段温度反演信息量为 $2 \times N$, 小于未知自由变量数目 $2 \times N + 2$ 。上面所述双波段 MAP 和 ML 函数对温度的反演求解,是在大气透过率和地球热辐射已知的情况下求得的。因此多波段温度反演至少需要三波段信息量 $3 \times N$, 才能对大气透过率、地球热辐射、目标发射率和温度联合反演。图 6 所示为大气透过率估算精度对温度估计函数性能的影响。

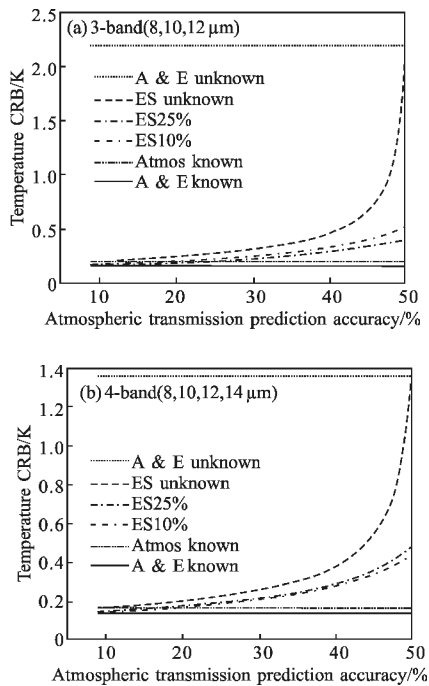


图 6 大气透过率估算精度对温度估计函数性能的影响

Fig.6 Influence on the accuracy of prior knowledge of atmospheric transmission on temperature estimation accuracy

当对大气透过率估算精度在 10% 以内,三波段模型可以对目标进行较高精度的温度反演,大气透过率估算精度更高对温度反演精度的提升影响不大。当对大气透过率预测精度在 10% 以上,温度反演精度开始降低,尤其是在地球热辐射的先验信息未知的情况下。当在大气透过率和地球热辐射完全未知的情况下,四波段模型对温度反演的精度可以在 1.5 K 以内。三波段和四波段情况大气透过率估算精度对地球热辐射估计函数性能的影响具有同样的预测趋势关系,如图 7 所示。

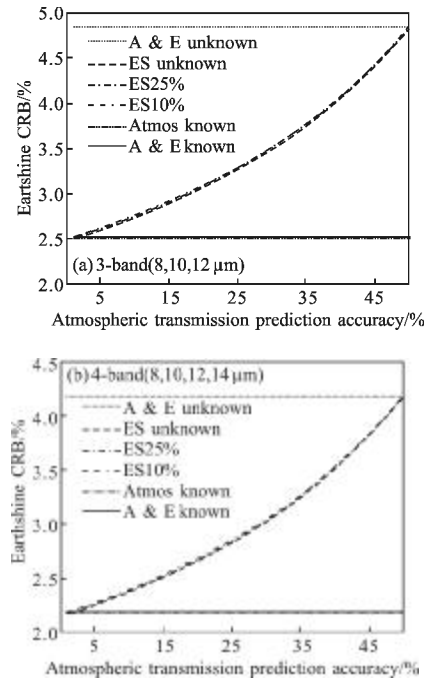


图 7 大气透过率估算精度对地球热辐射估计函数性能的影响

Fig.7 Influence on the accuracy of prior knowledge of atmospheric transmission on the earth's heat radiation estimation accuracy

4 结论

文中对低轨空间目标的红外多波段温度分布反演进行了研究。空间目标温度反演精度与成像探测器的信噪比、地球热辐射和大气透过率等未知参量的估算精度有着紧密的关系。在高信噪比的时候 ML 和 MAP 函数反演温度的精度是类似的;当信噪比较低的时候,MAP 函数反演温度的精度要高于 ML 函数方法。MAP 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。

目标波段之间发射率差异越大,导致温度估计的偏差越大,因此色温反演的波段应尽量选择相互靠近。原理上是色温反演波段数越多目标温度反演精度越高,但带宽越窄成像系统信噪比越低。三波段估计函数的 CRB 分析表明,只要大气透过率预测精度在 10% 以上,目标的温度等特性就能得到较高精度的求解。四波段在地球热辐射和大气透过率未知的情况下,温度求解能达到很高的精度。文中建议地基望远镜采用双面阵长波红外探测器;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;应用低温滤光轮,即通过光谱滤光实现波段选择的细分^[10];成像波段总数控制在 4 个为宜。

参考文献:

- [1] Vigil Michael L, Witte David J. Sensor suite for advanced electro-optical system (AEOS) 3.6-meter telescope[C]//SPIE, 1996: 151-169.
- [2] David R. Gerwe. High Resolution Imaging Thermometry[C]// Proceedings of Maui, 2005: 68-98.
- [3] Wang Guoqiang, Wu Yuanhao. Ground-based measurement on the infrared characteristic of space object [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1634-1639. (in Chinese)
- [4] Wang Guoqiang, Wu Yuanhao, Zhang Shixue, et al. Band selection in measurement of colour temperature of space object[J]. Infrared, 2012, 33(1): 17-21. (in Chinese)
- [5] Wang Guoqiang, Wu Yuanhao, Cao Jingtai. Waveband optimization method for enhancing precision of measuring space object's temperature [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4): 738-742. (in Chinese)
- [6] Quinn T J, Martin J E. Cryogenic Radiometry, Prospects for further improvements in accuracy [J]. Metrologia, 1991, 28(1): 155-161.
- [7] Dave Smith, et al. ATSR infrared radiometric calibration and in orbit performance [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 116(15): 4-16.
- [8] Goodman J W. Statistical Optics [M]. Qing Ke-cheng, Liu Peishen, Cao Qizhi Transl. Beijing: Science Press, 1992.
- [9] Kay S. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall PTR, 1993.
- [10] Wang Shitao, Zhang Wei, Wang Qiang. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 484-491. (in Chinese)

下期预览

一种 40 Gbit/s 全光异或门性能仿真研究

邓大鹏¹, 曹东东¹, 朱峰¹, 黄凯², 李将¹

(1. 西安通信学院, 陕西 西安 710106; 2. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

摘要: 为了提高基于 SOA-MZI 结构的全光异或门的输出消光比, 优化系统性能, 将 SOA 和 HNLFF 相结合, 在光通信系统设计软件 OptiSystem7.0 仿真平台上搭建了基于 SOA-MZI 的全光异或仿真实验模型, 对两路 40 Gbit/s 的 RZ 码数据信号进行了全光异或仿真实验。利用 HNLFF 的非线性效应设计了一种优化结构, 对基于 SOA-MZI 的全光异或输出信号进行优化, 并对优化前后的信号时域波形图和系统眼图进行了比较分析, 通过多次反复实验得到一组最佳的系统参数, 使得基于 SOA-MZI 的全光异或门的输出消光比从 10 dB 提高到约 28 dB。实验结果表明: 常规的基于 SOA-MZI 的全光异或门由于相消干涉不彻底造成输出消光比较低, 而经过优化, 很好地解决了这种问题, 提高了异或输出消光比, 优化了系统性能。