

# 红外地球敏感器测量误差分析及修正方法

由 川<sup>1,2</sup>, 李 勇<sup>1</sup>, 林 夏<sup>3</sup>, 郑伟波<sup>1</sup>, 杨晓宇<sup>1</sup>, 崔维鑫<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201210)

**摘 要:** 红外地球敏感器作为卫星平台重要设备, 在对地指向、姿态测量和天文自主导航等方面发挥着重要作用, 高精度的地球敏感器量对于提高卫星姿态控制和天文自主导航精度具有重要意义。本文通过分析地敏测量误差的影响因素, 提出随季节变化的地球 CO<sub>2</sub> 辐射特性是影响地敏测量精度的重要因素; 根据地球辐射模型构建了地敏测量修正方法, 结合在轨实测数据分析验证, 证明可以大大降低由地球辐射不均匀引发的误差, 有效压缩地敏在轨测量误差。

**关键词:** 红外地球敏感器; 误差分析; 地球辐射; 误差修正

**中图分类号:** TN 215    **文献标志码:** A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.05.016

## Analysis and Correction Method for Infrared Earth Sensor Measurement Error

YOU Chuan<sup>1,2</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, LIN Xia<sup>3</sup>, ZHENG Weibo<sup>1</sup>, YANG Xiaoyu<sup>1</sup>, CUI Weixin<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** As an important facility of satellite platform, infrared earth sensor plays a crucial role in nadir pointing, attitude measurement, and astronomical autonomous navigation. High precision earth sensors are of great significance to the improvement of satellite attitude control and astronomical autonomous navigation accuracy. By analyzing the factors causing the measurement error, this paper indicates that the seasonal changing infrared radiation feature of earth CO<sub>2</sub> layer is an important factor affecting the accuracy of earth sensor. According to the earth infrared radiation model, a method for correcting the earth sensor measurement is constructed. With the constructed method, along with the analysis and validation using in-orbit data, the deviation caused by non-uniformly earth radiation is significantly reduced, and the in-orbit measurement error is effectively compressed.

**Key words:** infrared earth sensor; error analysis; earth radiation; error correction

## 0 引言

对于近地空间卫星, 日、地、月 3 大天体是最容易获得的参照物, 以日、地、月测量信息作为卫星定姿、定轨的参考是非常常用的方法, 也是近地卫星有效的导航模式<sup>[1]</sup>。美国的自主运行飞行技术

(Technology for Autonomous Operational Survivability, TAOS) 利用日、地、月信息确定近地卫星的轨道和姿态, 并通过自主导航系统 (Microcosm Autonomous Navigation System, MANS) 验证了该导航技术<sup>[2]</sup>。

红外地球敏感器 (简称地敏、地球敏感器) 以 14~16 μm 波段测量地球表面的 CO<sub>2</sub> 辐射带, 并以

**收稿日期:** 2020-09-07; **修回日期:** 2020-12-14

**基金项目:** 国家重大专项项目、科技部重大科学仪器设备开发专项 (2013YQ47076706)

**作者简介:** 由 川 (1987—) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空间飞行器姿态光学敏感技术。

**通信作者:** 崔维鑫 (1964—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间飞行器及其天文自主导航光学姿态敏感技术、红外光电技术与系统。

此为依据计算地心与地敏的相对方位,结合地敏在卫星上的安装矩阵,可以测量卫星对地指向以及卫星的滚动角和俯仰角。地敏是卫星测量地球指向的重要仪器,按照测量方式的不同,分为单圆锥扫描地敏、双圆锥扫描地敏、线阵地敏和面阵地敏。地敏在对地指向、姿态测量和天文自主导航等方面发挥重要作用,高精度的地敏测量对于提高卫星姿态控制<sup>[3-4]</sup>和天文自主导航精度具有重要意义<sup>[5-7]</sup>。

地球的 CO<sub>2</sub> 辐射受天气、季节、经度和纬度等因素的影响,在同一时间地球不同地区的温度差异很大,即使同一地区也会出现温度的差异,因此红外辐射具有不均匀性,这种不均匀性体现在不同海拔高度上的红外辐射强度随经纬度和时间变化,造成红外地敏检出的地球、太空边界的海拔高度不固定,引起测量误差<sup>[8-10]</sup>。

本文通过分析地敏测量误差的影响因素,提出

随季节变化的地球辐射特性是影响地敏测量精度的重要因素;根据地球辐射模型构建地敏测量修正方法,结合在轨实测数据分析验证,证明可以大大降低由于地球辐射不均匀引发的误差,有效压缩地敏在轨测量偏差<sup>[11-15]</sup>。

## 1 地敏工作原理

红外地球敏感器,又称为红外地平仪,是将地球作为姿态参考目标源,通过红外光学探测手段获取卫星相对于地球不同姿态时的红外地平圆信息的 1 种仪器,如图 1(a) 所示。卫星从观察点  $O$  看到的地球为红色以上的球冠部分,是从  $O$  向地球引切线所截区域,其在焦平面的成像即地平圆。观察点  $OO'$ ,地心  $O'$  和地平圆圆心 3 点共线,通过确定地心矢量  $OO'$  在仪器坐标系  $OXYZ$  中的指向,即可实现卫星滚动、俯仰姿态偏差角测量<sup>[16]</sup>。

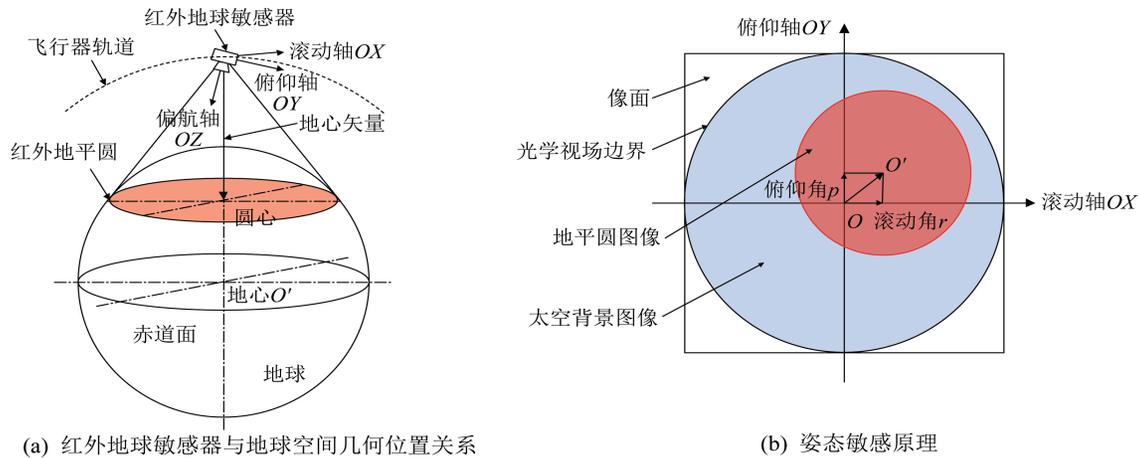


图 1 红外地球敏感器姿态敏感原理

Fig. 1 Schematic diagram of the attitude sensitivity principle of infrared earth sensor

新一代面阵成像式红外地球敏感器基于红外成像探测技术实现卫星的姿态测量。在仪器工作光谱频段内,太空的平均温度约为 4.2 K,而地球平均温度为 247 K,通过红外光学成像系统对地球红外辐射成像,利用非致冷焦平面红外探测器获取深冷太空背景下 1 个“灼热”的圆盘——红外地平圆数字图像。卫星姿态不同,该圆盘在探测器敏感面成像的位置也不同,探测器获得的地平圆图像如图 1(b) 所示,由于地平圆圆心、地球圆心在观察点 3 点共线,图像上地平圆圆心即地球圆心方位  $O'$ ,焦平面中心即观察点位置  $O$ ,故  $OO'$  即地心矢量。

经后端信息处理电路处理,提取地平圆并计算地平圆中心位置,确定地心矢量在红外地球敏感器

仪器坐标系  $OXY$  面上的投影矢量  $OO'$ ,其在滚动轴  $OX$  和俯仰轴  $OY$  上的投影分量  $or$  和  $op$  分别为卫星平台的滚动姿态角  $r$ 、俯仰姿态角  $p$ ,大小由式(1)表示如下:

$$\begin{cases} r = X_{or} \times \alpha \\ p = Y_{op} \times \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X_{or}$  为地心矢量在滚动轴上投影  $or$  的像素值; $Y_{op}$  为地心矢量在俯仰轴上投影  $op$  的像素值; $\alpha$  为探测器单个像素所对应的视场角大小。

由此可见,只要计算出地平圆圆心在图像上以像素值为单位的坐标  $(X_{or}, Y_{op})$ ,即可换算出姿态角。通过地平圆图像计算地平圆圆心坐标的软件为地球敏感器姿态解算软件。

原始的姿态检测算法,认为地平圆为均匀灰度的正圆,姿态解算软件核心算法为穿越点法,即检测地平圆边界穿越点,以求取圆心坐标,进而反演出姿态。以图像上固定位置 17 行 17 列数据,寻找这些行列上地平圆的边界,称这些边界点为穿越点,如图 2 所示。显然,并非所有行列都有穿越点,并且穿越点一般成对出现。假设共有  $n$  个行穿越点,其横坐标为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 有  $m$  个列穿越点,其纵坐标为  $y_1, y_2, \dots, y_m$ 。地平圆的圆心坐标  $X_{or}, Y_{op}$  分别为

$$\begin{cases} X_{or} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \\ Y_{op} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_m}{m} \end{cases} \quad (2)$$

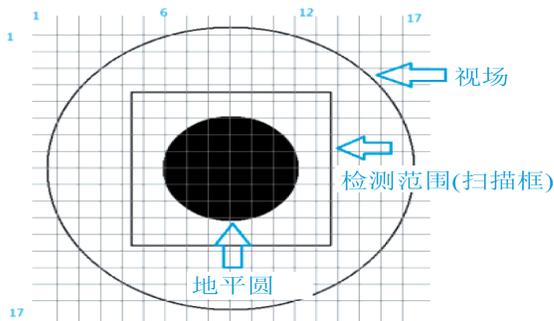


图 2 姿态解算

Fig. 2 Schematic diagram of attitude resolving

## 2 地敏测量误差分析

### 2.1 地球辐射模型

地球是一个赤道略鼓、两极稍扁的椭球体,其  $CO_2$  层在纬度上分布均匀。 $CO_2$  层过渡带不仅在不同纬度地区差别明显,还受到季节变化影响,在不同太阳辐射量的地区呈现出较大反差。地球辐射与季节相关,夏季太阳直射北回归线,北半球辐射高于南半球,冬季反之,南半球辐射高于北半球。以夏季为例,辐射最大值达  $3.0 W \cdot m^{-2} \cdot sr \cdot \mu m$ ,最小值仅有  $1.75 W \cdot m^{-2} \cdot sr \cdot \mu m$ ,最大值可达最小值的 150%~200%。地球南北辐射偏差很大,采用近似成辐射均匀地球体可能会导致姿态较大偏差<sup>[8-9]</sup>。

SALLARD 等<sup>[17-18]</sup>对地球辐射不均匀性进行了研究,基于法国 HELIOS1 和 STD16 地球敏感器的地球红外辐射数据,分析不同季节时间、不同纬度的地球辐射,归纳出了地球辐射和季节时间变化、纬度变化之间的关系,公式如下:

春季:

$$\begin{cases} L_a < 20^\circ S, L = 2.4 + 1.28 \times \sin \left[ \frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right] \cdot \left( \frac{L_a + 20}{70} \right) \\ 20^\circ S < L_a < 35^\circ N, L = 2.4 \\ L_a > 35^\circ N, L = 2.4 + 1.00 \times \sin \left[ \frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right] \cdot \left( \frac{L_a + 35}{55} \right) \end{cases} \quad (3)$$

夏季:

$$\begin{cases} L_a < 20^\circ S, L = 2.4 + 1.28 \times \sin \left[ \frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right] \cdot \left( \frac{L_a + 20}{70} \right) \\ 20^\circ S < L_a < 20^\circ N, L = 2.4 \\ L_a > 20^\circ N, L = 2.4 + 0.83 \times \sin \left[ \frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right] \cdot \left( \frac{L_a - 20}{70} \right) \end{cases} \quad (4)$$

秋季:

$$\begin{cases} L_a < 35^\circ S, L = 2.4 + 1.32 \times \sin \left[ \frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right] \cdot \left( \frac{L_a + 35}{55} \right) \\ 35^\circ S < L_a < 20^\circ N, L = 2.4 \\ L_a > 20^\circ N, L = 2.4 + 0.83 \times \sin \left[ \frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right] \cdot \left( \frac{L_a - 20}{70} \right) \end{cases} \quad (5)$$

冬季:

$$\begin{cases} L_a < 35^\circ S, L = 2.4 + 1.28 \times \sin \left[ \frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right] \cdot \left( \frac{L_a + 35}{55} \right) \\ 35^\circ S < L_a < 20^\circ N, L = 2.4 \\ L_a > 20^\circ N, L = 2.4 + 1.00 \times \sin \left[ \frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right] \cdot \left( \frac{L_a - 20}{70} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $L_a$  为纬度, ( $^\circ$ );  $L$  为地球红外辐射照度,

$W \cdot m^{-2} \cdot sr \cdot \mu m$ ;  $t$  为时间, 天;  $t_0$  为时间参考点, 4 月 10 日;  $T=365.23 t$ 。只需要给出 1 年内任何日期值  $t$ , 就可计算不同纬度地球辐射, 从而得到地球辐射特性的仿真值。

本文所研究的某卫星, 轨道与赤道面倾角  $55^\circ$ , 星下点纬度变化范围从南纬  $40^\circ$  到北纬  $40^\circ$ , 1 个轨道周期分为 2 个部分: 升轨和降轨。升轨是指卫星从南纬  $40^\circ$  飞行至北纬  $40^\circ$ 。降轨是指卫星从北纬  $40^\circ$  飞行至南纬  $40^\circ$ 。卫星自主调整偏航角, 使得太

阳面板效率最大化。

根据地球辐射模型构建的地球目标和目标卫星轨道参数及地敏观测模型仿真, 共有冬、春、夏、秋 4 个季节, 分别选取 1 月、4 月、7 月、10 月的前 3 天在轨数据。其中, 在轨采集的真实姿态数据如图 3 所示, 计算机仿真得到的姿态数据如图 4 所示。采用现有地球敏感器姿态解算算法, 对仿真图像进行姿态结算, 其目的是为了真实还原空间应用背景下, 地球敏感器产生的误差。

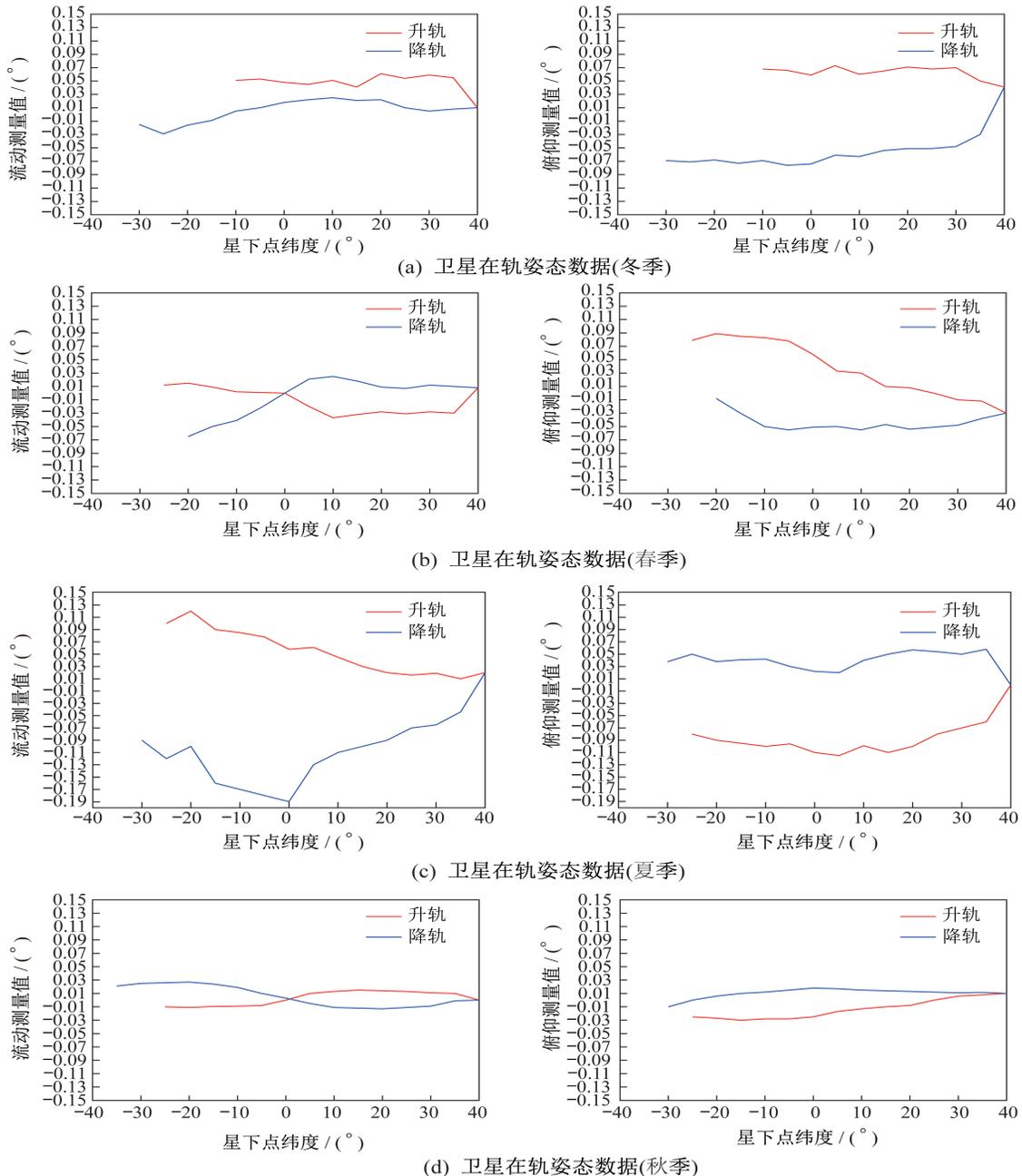


图 3 卫星在轨姿态数据

Fig. 3 In-orbit attitude data

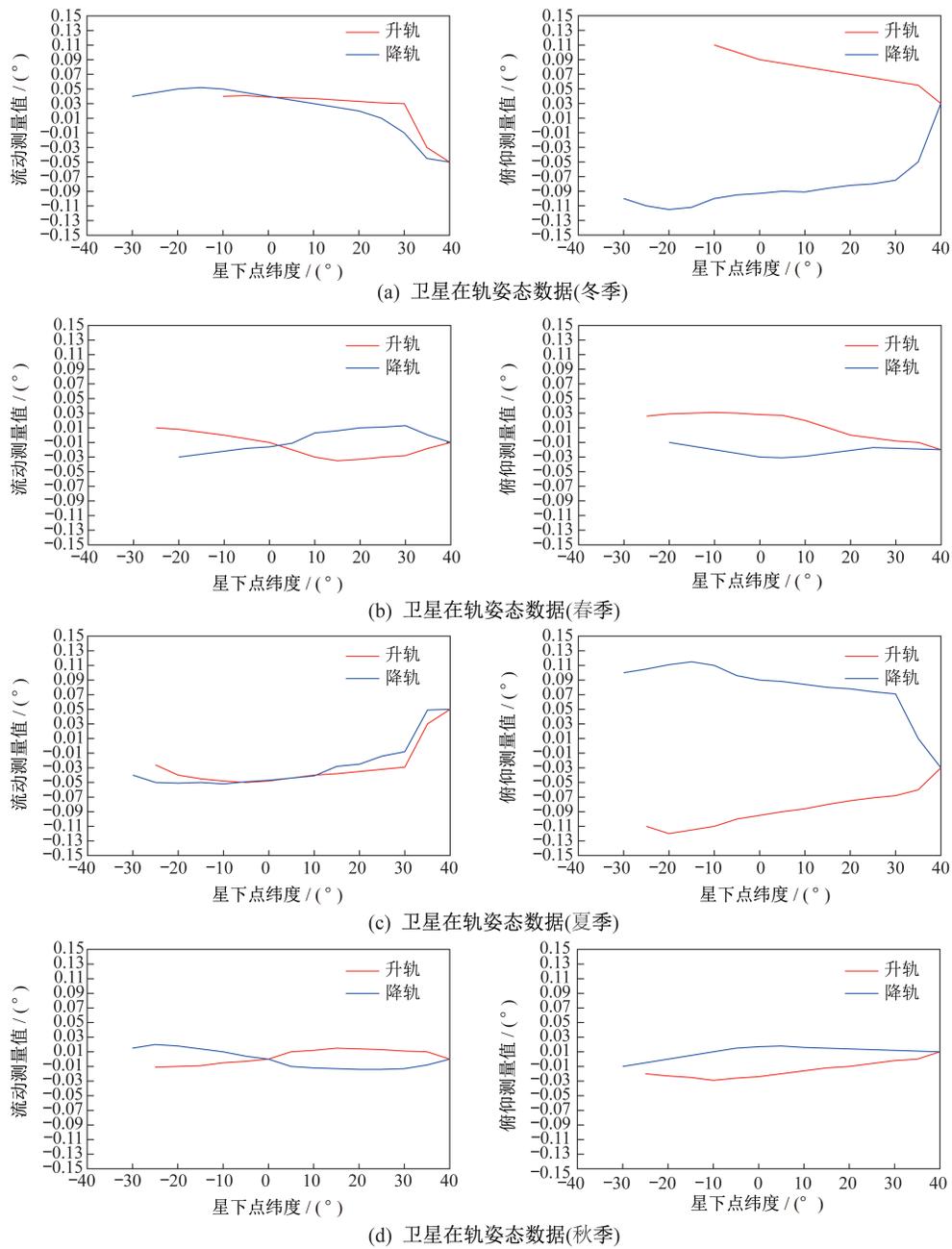


图 4 卫星仿真姿态数据

Fig. 4 Simulated attitude data

2.2 结果分析

从图中仿真结果与在轨实测偏差数据比较,得出以下结论:

1) 大部分情况下,仿真数据不管从形态上还是数值上都接近真实水平,如冬季俯仰,升轨和降轨的仿真都与真实值数据一致。证明辐射不均匀性确实是导致姿态检测误差的主要因素。

2) 局部地区仿真结果与实测相差较大,如春季、秋季滚动的仿真,整体趋势与实际值一致,但具

体数值上存在差异。这是因为仿真模型不够完善,在地球部分区域辐射仿真值与实际值产生较大差异,导致仿真出现偏差。

3) 由于地球红外模型在南北半球为对称形态,从数值上来说,仿真姿态偏差在南北半球幅度相当。但实际在轨偏差呈现非对称形态,南半球偏差大于北半球,这可能与在轨地平仪工况有关。因为地球敏感器所处环境温度对红外图像非均匀性有一定影响,会导致一定的姿态偏差。

### 2.3 地球辐射对姿态解算的影响

原有姿态检测软件本身设计不合理是导致误差的主要原因,姿态检测算法假设地球是 1 个均匀辐射的球体,未考虑辐射不均匀性。检测非均匀地球辐射的图像时会产生一些错误,如冬季升轨,仿真与实际偏差较大,经查为算法自身问题导致。一般情况下,均匀辐射球体的地平圆边界辐射相同,红外图像上地平圆边界具有一致性,可以用统一的门限阈值来确定穿越点。而非均匀辐射球体,会呈现出 1 个冷半球和 1 个热半球,热半球辐射可达冷半球的 150%,使用固定数值的门限阈值来求解穿越点,必将与真实穿越点产生偏差。

采用动态阈值可以一定程度上减小误差,将冷半球和热半球分别求自身对应的门限阈值,不同扫描行列分别计算。然而地球过渡带形态各异,想要真正意义上消除误差,就必须在非均匀辐射的情况下,在过渡带准确找到冷半球和热半球穿越点,这需要对算法进一步优化。

## 3 误差修正

根据上述分析,可以通过修正因地球辐射时空差异带来的误差,提高地敏的测量精度。首先,根据地球辐射模型、卫星轨道和偏航角,计算出偏差值,构建修正表;其次,地敏在轨测量时,按照日期和所在星下点纬度,查表获得修正值;最后,用当前姿态数据减去校正值,从而提高测量精度。

### 3.1 构建修正表

通过计算机仿真的方法,对地球红外辐射建立模型,能有效分析在轨卫星姿态角偏差。由于卫星在特定季节和特定位置时,其偏航角总是调整为相同数值,因此,如果能把仿真数据绘制成表格,则可以通过查表法,输入当前位置和时间信息,用存储好的仿真偏差数据来进行校准,从而很大程度上消除误差。本文以春季 1 个轨道周期为例,制作 1 幅校正表格对姿态数据进行校正。按照 4 月 1 日升轨和 4 月 3 日降轨在轨偏航角进行仿真,因地球辐射时空差异带来的误差如图 5 所示,制作成校正表格见表 1。

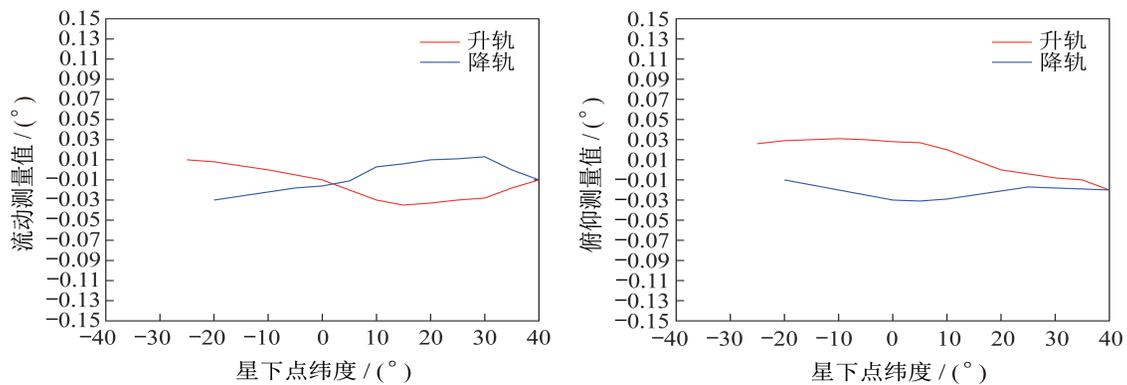


图 5 仿真得到的因地球辐射时空差异带来的误差

Fig. 5 Simulated error caused by the earth radiation variation of spatial and temporal disparities

表 1 因地球辐射时空差异带来的误差修正表

Tab. 1 Correction for the error caused by the earth radiation variation of spatial and temporal disparities

星下点纬度/(°)	升轨滚动/(°)	升轨俯仰/(°)	降轨滚动/(°)	降轨俯仰/(°)
-40	-0.011 1	0.033 7	-0.111 1	0.033 7
-39	-0.017 0	0.032 2	-0.008 0	0.034 7
-38	-0.020 8	0.030 1	-0.005 5	0.036 0
-37	-0.024 4	0.027 6	-0.003 5	0.036 6
-36	-0.029 0	0.024 7	0.000 0	0.036 2
-35	-0.032 3	0.022 3	0.003 3	0.037 2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	-0.041 9	-0.025 6	-0.008 2	0.004 8

其中,每1行代表1个星下点纬度,间隔 $1^\circ$ ,一共81行,表示星下点纬度 $-40^\circ\sim 40^\circ$ 内每隔 $1^\circ$ 的校正正值。实际应用中,针对不同季节不同纬度,应制作每个月份的校正表格。

使用的时候按照当前日期寻找对应的表格,按照四舍五入的方法寻找最接近的星下点纬度,并按照表格中数据进行校正。

### 3.2 校正结果

以4月1日和4月3日的某型号卫星为例,其地敏在轨实际测量数据如图6所示,滚动测量误差约在 $-0.06^\circ\sim 0.04^\circ$ 内,俯仰测量误差约在 $-0.08^\circ\sim 0.08^\circ$ 内。通过本文方法修正后的地敏测量误差曲线如图7所示,滚动测量误差约在 $-0.02^\circ\sim 0.04^\circ$ 内,俯仰测量误差约在 $-0.03^\circ\sim 0.04^\circ$ 内,测量精度提高近1倍。

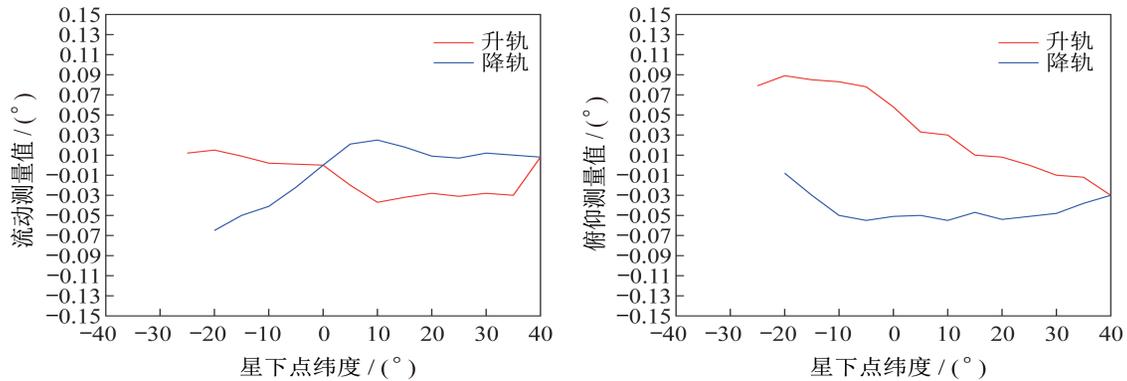


图6 某卫星地敏在轨实测误差曲线

Fig. 6 Measured earth sensor in-orbit error curve of a satellite

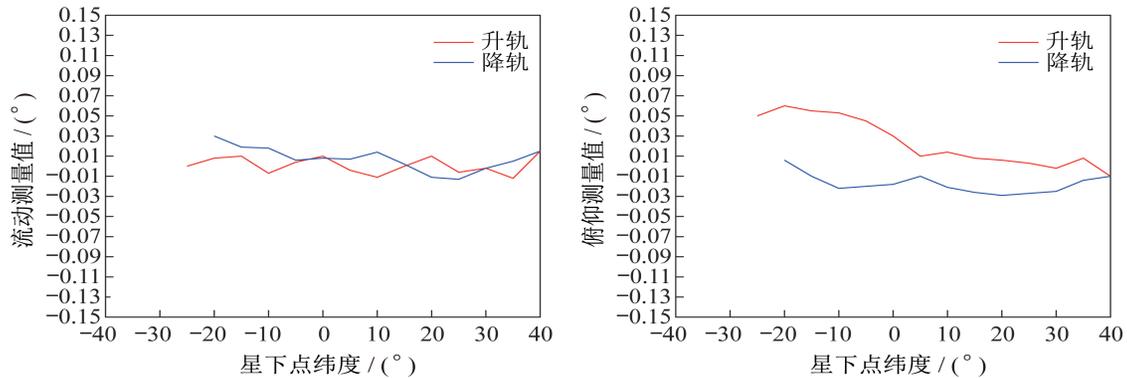


图7 修正后地敏测量误差曲线

Fig. 7 Earth sensor measurement error curve after correction

## 4 结束语

本文结合某型号卫星在轨飞行实测数据,以及地球红外辐射不均匀性仿真结果分析,得到地球红外辐射不均匀性是影响在轨姿态偏差主要因素。针对红外辐射不均匀性带来的测量误差,提出1种校正手段,即查表校正法,该方法用地面仿真对在轨卫星在不同季节、星下点以及偏航角情况下,绘制姿态偏差数据作为校正表格进行误差修正。在轨卫星红外地平仪通过向星载计算机查询当前日期、纬度、偏航获得所需校正数据,对自身输出姿态

进行校正。

对某卫星4月在轨数据进行了查表校正仿真实验,实验结果表明,该方法能有效降低50%以上的误差。仿真结果与实际尚且有一定差距,原因主要有:

1) 仿真模型建立不够完善,地球辐射在南北半球的局部地区存在差异。目前正在着手建立更加细化的地球辐射模型,每1个经纬度建立1个仿真点,使仿真出来的误差更接近在轨值,给校正提供更准确的参考。

2) 姿态检测算法本身不够完善,在检测辐射不

均匀图像时候,自身会产生一些偏差。考虑用动态阈值代替固定阈值,减小计算带来的误差,适用于不均匀辐射地球模型的新型姿态检测算法也在设计中。一旦将来有了更完备的地球辐射模型,辅以辐射不均匀适应性的姿态检测算法,则能更准确地完成姿态检测和校正。

3) 空间应用环境也会产生一定测量误差,主要体现在温度交变对图像非均匀性的影响,目前降低温度交变引发的图像非均匀性相关工作也在开展当中。

综上所述,本文针对红外地球敏感器精度提高和误差降低,阐明了目前红外地球敏感器产生误差的主要原因,提出的 1 种校正方法,并指明了后续研究方向。

#### 参考文献

- [ 1 ] 邓广慧,廖卓凡,朱蓉,等.基于日地月信息的航天器全弧段自主容积卡尔曼滤波导航[J].中国空间科学技术,2018,38(1):70-76.
- [ 2 ] 陈璐,王昊,王本冬,等.一种用于静态红外地球传感器的高效算法[J].宇航学报,2019,40(8):928-936.
- [ 3 ] 孙向平,赵辉,李妍.红外地球敏感器光电组件测试技术研究[J].宇航计测技术,2019,39(5):65-70.
- [ 4 ] 林夏,林宝军,刘迎春,等.星敏感器与地平仪联合自主定轨改进算法[J].中国惯性技术学报,2018,26(4):540-545.
- [ 5 ] 刘栋,戴聪明,魏合理.中高层大气临边红外辐射的 LTE 与 non-LTE 模拟对比[J].大气与环境光学学报,2019,14(5):337-344.
- [ 6 ] 李享,李劲东,孙鹤枝,等.空间目标温度与红外特性影响因素研究[J].激光与红外,2019,49(12):1436-1441.
- [ 7 ] 张玉山,李旭,颜露新,等.一种红外点目标图像高保真压缩方法[J].上海航天,2018,35(5):32-38.
- [ 8 ] 吴永康,胡雄超,毛晓楠,等.高精度星敏感器热设计研究及仿真验证[J].上海航天(中英文),2018,35(5):123-129.
- [ 9 ] WHITMAN R I, THOMAS B M, RICHARD E, et al. Infrared horizon profiles for winter conditions from pronet scanner[J]. NASA TN, 1968(12): D-4905.
- [ 10 ] WHITMAN R I, THOMAS B M, RICHARD E, et al. Infrared horizon profiles for summer conditions from pronet scanner[J]. NASA TN, 1968(8): D-4741.
- [ 11 ] SALLARD S, SAMSON G, KREBS J P, et al. New accurate infrared earth radiation model for pointing accuracy improvement of LEO platforms [J]. Spaceflight Dynamics, 1998, 100: AAS 98-337.
- [ 12 ] BRUNEL O, HAIGNERE F, KREBS J P, et al. A 15 [mu] infrared earth mapping through the STD12 sensor telemetries on board SPOT satellites [J]. Advances in the Astronautical Sciences, 1993, 84: 1037-1050.
- [ 13 ] THOMAS J R. The analysis of 15 [mu] infrared horizon radiance profile variations over a range of meteorological, geographical, and seasonal conditions [M]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1967.
- [ 14 ] HYNCEK J, AUSTIN R J. Digital nonuniformity correction for image sensors: US6522355B1[P]. 2003-02-18.
- [ 15 ] SCHULZ M, CALDWELL L. Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays [J]. Infrared Physics and Technology, 1995, 36: 763-777.
- [ 16 ] 吕小峰,王大力.一种确定自旋卫星姿态的新方法[J].上海航天(中英文),2011,28(1):40-45.
- [ 17 ] WANG R Z, CHEN P Y, TSIEN P. An improved nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays which is easy to implement [J]. Infrared Physics and Technology, 1998, 39:15-21.
- [ 18 ] 封天明,李润青,高长生,等.考虑地球敏感器误差的自主导航方法研究[J].上海航天(中英文),2017,34(2):112-119.