

## 卫星温度传感器的高可靠性封装

梁玉娇<sup>1</sup>, 钟国舜<sup>2,3</sup>, 娄小平<sup>1</sup>, 孟凡勇<sup>1</sup>, 祝连庆<sup>1</sup>

(1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016;

2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 3. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:**针对卫星在轨温度实时监测对传感器可靠性的要求,提出了一种采用金属基底与陶瓷片结合的光纤光栅温度传感器封装结构和工艺。将光纤光栅弯曲为C字型并粘贴固定于陶瓷薄片上,以避免陶瓷材料热应变引起光栅产生轴向应变影响温度测量精度,陶瓷片用导热胶及硅胶固定于金属槽内,保障其牢固性并良好导热,同时进一步隔离被测部件机械变形及热变形对光栅的影响。地面实验采用恒温水浴槽进行模拟,对不同温度下传感器的反射波长与温度骤变时传感器的响应时间进行标定,并在轨测量了卫星运行时帆板的温度变化过程。结果表明,传感器在满足温度灵敏度、响应速度的同时,满足了卫星温度监测对传感器可靠性的要求。

**关键词:**温度传感;响应时间;在轨测量;陶瓷片;光纤光栅

**中图分类号:**TN253 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.016

## The high reliable encapsulation of the satellite temperature sensor

LIANG Yu-jiao<sup>1</sup>, ZHONG Guo-shun<sup>2,3</sup>, LOU Xiao-ping<sup>1</sup>, MENG Fan-yong<sup>1</sup>, ZHU Lian-qing<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China; 2. School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin 300072, China; 3. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** A metal base and ceramic pieces of optical fiber grating temperature sensor encapsulation structure and technology of the combination was proposed, which is used to resolve the requirements of the satellite on-orbit temperature real-time monitoring reliability. Optical fiber grating was bended to C word and fixed on the ceramic chip, in order to avoid ceramic material thermal strain causes a grating axial strain. Ceramic chip was attached to metal groove, which is adopted thermal conductive silicone. The robustness and good thermal conductivity is allowed, and the unit under test mechanical deformation and thermal deformation on the influence of the grating is isolated. Thermostatic water bath is used to simulate ground experiment. The relationship of reflection wavelength and temperature was demarcated. And the relationship of reflection wavelength and sensor's response time with temperature variation was demarcated. Results show that it not only meet the temperature sensitivity and response speed, but meet the requirement of satellite temperature monitoring of the reliability of the sensor at the same time.

**Key words:** temperature sensor; the response time; on-orbit measurement; ceramic chip; fiber Bragg grating

### 1 引言

传感器的可靠性很大程度上受封装工艺的影

响,这些影响使得光纤光栅的传感优势在应用中难以发挥,因此研究光纤光栅的封装工艺具有重要意

**基金项目:**教育部“长江学者与创新团队发展计划”项目(No. IRT\_16R07);北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(No. IDHT20170510);高等学校学科创新引智计划(No. D17021)资助。

**作者简介:**梁玉娇(1994-),女,硕士研究生,主要从事光纤传感及光电器件的研究。E-mail:2571942610@qq.com

**通讯作者:**娄小平(1970-),女,教授,主要从事精密测量与光机电系统研究。E-mail:louxiaoping@bistu.edu.cn

**收稿日期:**2018-09-07; **修订日期:**2018-10-28

义<sup>[1]</sup>。航天用温度传感器对性能的要求极高,除了抗发射振动和长期温度交变循环外,还要求传感器体积小、质量轻。特别是在卫星在轨温度测量领域,由于外层空间的辐射影响,帆板会产生较大温差,产生热变形或热致振动等结构响应<sup>[2]</sup>,从而对卫星的正常工作造成影响。而传统的测温方法存在抗电磁干扰性能差、体积大、质量重、难以组网复用等缺点,用于航天卫星上,具有明显的缺陷与不足。

与传统的温度传感器相比,光纤传感器具有抗电磁干扰强、体积小、重量轻、能够组网复用等优点<sup>[3]</sup>,目前已逐步应用于航天事业中。用光纤光栅进行温度测量时,需要排除应变、外界环境等因素的影响,并对栅区进行封装加以防护。光纤光栅的封装材料主要有:复合材料封装、金属封装和陶瓷封装等<sup>[3-6]</sup>。封装形制主要有:基片封装、管式封装和嵌入式封装等。金属封装虽然导热速度快且强度大,但不可避免地受电磁干扰的影响<sup>[7]</sup>;克服电磁干扰可以采用聚合物封装或陶瓷封装,但是这两种封装均存在尺寸过大问题。

2014年,加拿大 Amir Azhari<sup>[8]</sup>设计了一种氧化锆制成的圆柱形管封装结构。光纤一端使用各向异性(在轴向的热导率大)热解石墨管,另外一端是空气冷却系统,从而达到保护光纤作用。2015年,韩国 Kim Jin Hyuk<sup>[9]</sup>提出嵌入式光纤光栅结构。即在机翼复合材料内部嵌入光纤光栅阵列,空气薄膜包裹光纤光栅作为温度补偿,在线测量机翼飞行时的温度。2016年佳木斯大学薛泽利<sup>[10]</sup>提出一种三钢管结构光纤光栅温度传感器。该结构有应变解耦作用,温度变化 200 °C 范围内,预留出的光纤要大于 0.69 mm,温度灵敏度为 10 pm/°C。

本文采用导热速度极快的金属基底与陶瓷片应变隔离相结合的方式,对光纤光栅进行 C 字型封装。地面实验标定了温度骤变时传感器的响应时间以及反射波长和温度的线性拟合关系。在轨实验测量了卫星帆板的温度变化过程,并对采集到的数据分析处理。结果表明,该传感器的响应速度极快,且线性度和精度均能达到卫星温度场测温及体检的要求,可应用于卫星温度场的测量。

## 2 光纤布拉格光栅温度传感原理

光纤光栅的反射波长取决于纤芯材质的有效折射率及刻写的栅格周期。当一束宽带光入射到光纤光栅中时,满足布拉格反射条件的窄带光才会被反射,其方程表达式<sup>[11-12]</sup>为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

其中,  $\lambda_B$  为光栅的中心波长;  $n_{\text{eff}}$  为纤芯有效折射率;  $\Lambda$  为光栅的栅格周期。

由式(1)可得有效折射率或光栅周期导致的光栅谐振波长的变化为:

$$\Delta\lambda_B = 2(\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + n_{\text{eff}}\Delta\Lambda) \quad (2)$$

光栅谐振波长随应变和温度的变化为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_z)\Delta\varepsilon + (\alpha + \beta)\Delta T \quad (3)$$

其中,  $\Delta\varepsilon$ 、 $\Delta T$ 、 $\rho_z$  分别为应变变化、温度变化和有效弹光系数;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为热膨胀系数和热光系数。

在温度传感器的制作过程中,我们仅考虑温度对光纤光栅波长变化量的影响,因此需使光纤光栅不受应变的作用,即光纤光栅处于自由状态或所受应力均匀且不变化。此时光栅谐振波长变化可改写为:

$$\Delta\lambda_B = K_T\Delta T \quad (4)$$

其中,  $K_T = \lambda_B(\alpha + \beta)$  为光栅温度系数,且可由式(2)得  $\alpha = d\Lambda/(\Lambda dT)$ ,  $\beta = dn_{\text{eff}}/(n_{\text{eff}}dT)$ 。

由式(4)可知,光栅的中心波长随温度线性变化,通过采集光栅的中心波长数据,得到中心波长的变化量即可推算出温度的变化量。

## 3 光纤光栅温度传感器设计

### 3.1 光纤光栅温度传感器的封装

本文设计了一种航天用金属材料与陶瓷片相结合的封装方式,隔离基底应变,其结构示意图及实物图如图 1 所示。采取相应措施,给光纤光栅一致的弧度,这一设计的优点在于,首先基底的形变不会传送到光纤本身,避免了卫星结构的形变对传感器性能的影响;其次,在长期测量中,一旦胶体发生蠕变,光纤仍能保持弯曲,一定程度上降低了蠕变带来的影响。再者,C 字型弯曲使得光纤一直处于松弛状态,不受应力作用,有效避免了温度-应变交叉敏感问题。

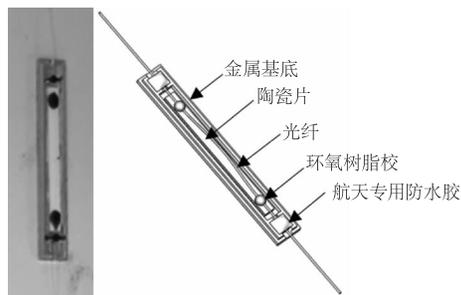


图 1 传感器内部结构示意图及实物图

Fig. 1 Sensor internal structure diagram and the real figure

为了加快传感器的响应速度,外壳选用导热速度极快的金属制成,同时为防止基底应变直接传递到光纤光栅,采用陶瓷片对应变进行隔离。隔离的方法是

将光纤光栅两端点胶固定到陶瓷片上,注意点胶位置要去除涂覆层,以避免涂覆层对光栅响应速度产生影响,并对去除涂覆层的位置用无尘纸蘸取酒精进行清洁处理。其次点胶量要尽可能的少且要使光纤光栅处在点胶的中间位置,保证光纤光栅与陶瓷片之间不发生相对滑动。接下来将基底放置在超声波清洗机里面,清洗 5 min,然后将完全固化在陶瓷片上的光纤光栅用航天专用防水胶粘贴在金属基底内。光纤两端用单模缆最外层的套管做防护。

### 3.2 温度-应变解耦原理及仿真

光纤光栅温度传感器 C 字型封装的应变解耦方式是栅区悬空,两端固定,其结构草图如图 2(a) 所示。通过改变弧长来调节温度传感器的应变解耦范围与温度测量范围,其结构示意图如图 2(b) 所示。光纤光栅作为弧形的一部分,其两端固定点分别为 A、B,弧形长度为  $\widehat{L}$ ,  $r$  为弧形半径,  $y$  为弧形对应的标准弦长,  $x$  为弧形顶部离弦长距离。

由几何关系及勾股定理得:

$$r = \frac{x^2 + (y/2)^2}{2x} \quad (5)$$

$$\theta = \tan\left(\frac{xy}{(y/2)^2 - x^2}\right) \quad (6)$$

假设原弧长为  $\widehat{L}_1 = 2\theta r$ ,若弦长 AB 两点间  $y$  变化  $\Delta y$ ,  $x$  变化  $\Delta x$ ,则弧长变换量为:

$$\Delta\widehat{L} = \frac{(x + \Delta x)^2 + (y/2)^2}{x} \times \tan\left(\frac{x(y + \Delta y)}{(y + \Delta y)^2 - (x + \Delta x)^2}\right) - \frac{x^2 + (y/2)^2}{x} \times \tan\left(\frac{xy}{(y/2)^2 - x^2}\right) \quad (7)$$

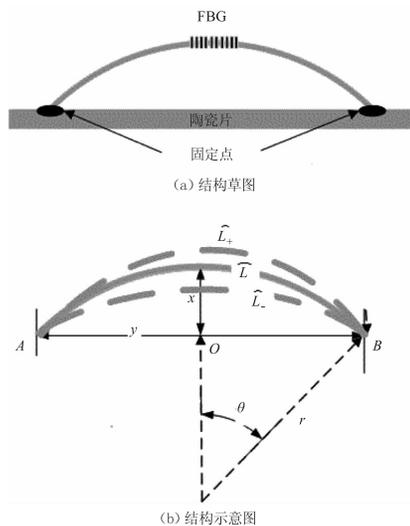


图 2 C 字型应变解耦温度传感器原理图

Fig. 2 C type strain decoupling principle diagram of the temperature sensor

若  $\Delta\widehat{L} \leq \widehat{L}_{1-y}$ , 则会有应变解耦效果;若  $\Delta\widehat{L} > \widehat{L}_{1-y}$ , 则无应变解耦效果,应变量为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\widehat{L} - (\Delta\widehat{L}_1 - y)}{\widehat{L}_1} \quad (8)$$

为了达到应变解耦效果,设计此种方式的温度传感器必须控制弦长  $y$  对应的非标准圆弧的长度  $\widehat{L}_+$  与  $\widehat{L}_-$ , 即当固定点距离  $y$  确定后,其标准弧长与半径则也确定,通过调整非标准圆弧的长度  $\widehat{L}_+$  与  $\widehat{L}_-$ , 来控制光纤光栅温度传感器的解耦范围。

采用 COMSOL 软件对该结构进行有限元分析,由于传感器安装在卫星表面,因此在对传感器进行有限元模拟分析时,先将传感器的基底底端固定在 7075T6 航天专用铝制板材上,再进行网格划分。接下来,对被拉伸件、传感器壳体、陶瓷片以及光纤光栅进行切割、组合、扫掠网格划分。固定拉伸件的一端,另一端施加  $500 \mu\text{E}$  的拉力,仿真得到各部件的受力云图如图(3)所示,其中(a)、(b)、(c)和(d)分别为被拉伸件、温度传感器壳体(基底)、陶瓷片和光纤光栅受力云图。

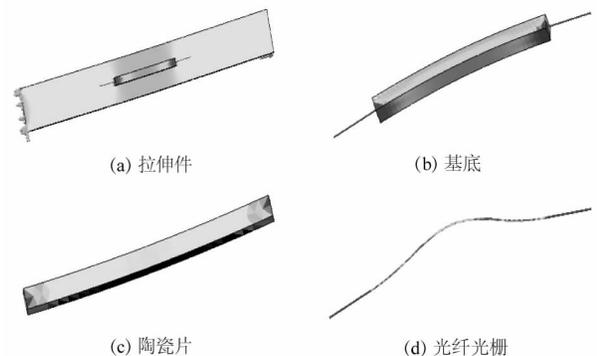


图 3 拉伸件、基底、陶瓷片、光纤光栅受力云图

Fig. 3 Tensile, basal, ceramic chip and fiber Bragg grating stress contours

根据各部分受力云图可以看出板材在拉伸  $500 \mu\text{E}$  的情况下,陶瓷片应变小于  $200 \mu\text{E}$ ,光纤光栅几乎不受力。仿真结果表明,陶瓷片对应变可以起到一定的隔离作用,同时通过光纤光栅 C 字型弯曲的方式,预留出一段拉伸缓冲区,即可保证被测件在不受到极大应变的情况下,光纤光栅的中心波长不发生变化,有效排除了温度传感器普遍存在的温度-应变交叉敏感问题。

### 4 地面实验及结果分析

实验中采用 FLLIKE 公司的高精度恒温水浴槽模拟温度环境,可调范围为  $-80 \sim 110 \text{ }^\circ\text{C}$ ,精度为

0.01 °C。

(1) 线性度及灵敏度

进行传感器的线性度及灵敏度测试时,将3个光纤光栅温度传感器同时放入恒温水浴槽进行标定,标定范围分别为-55 ~ -5 °C和5 ~ 55 °C,其中零上水浴环境用蒸馏水进行模拟,零下水浴环境用酒精进行模拟,设置温度变化间隔为10 °C,每个温度点稳定15 min,标定实验现场如图4所示。

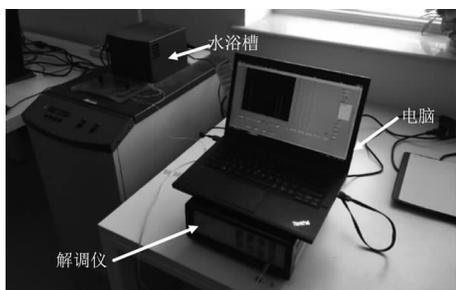


图4 温度标定实验现场图

Fig. 4 Scene graph of the temperature experiment

将软件采集到的反射波长变化量与温度变化量进行线性拟合,零上、零下拟合曲线分别如图5(a)、5(b)所示。图中各点为6次重复性实验的波长变化量平均值,式(9)、式(10)分别为零上、零下时三个传感器的拟合函数及线性度。

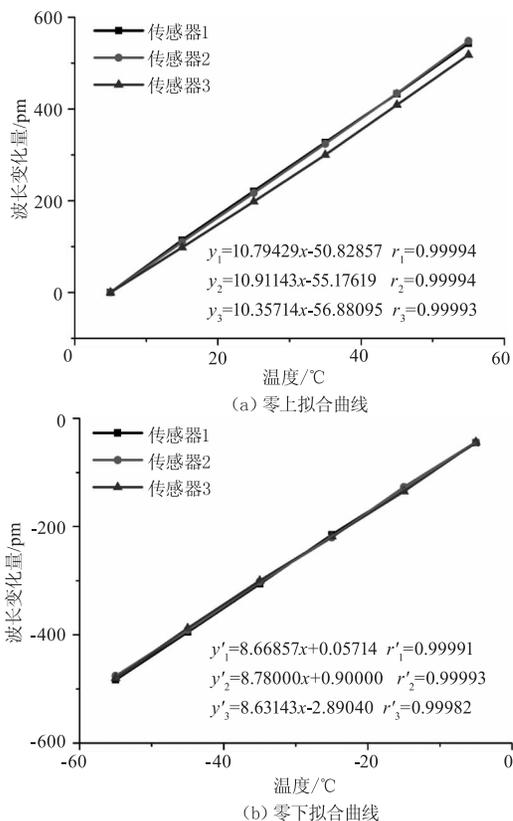


图5 温度变化时传感器的反射波长变化量

Fig. 5 The changes in the reflectal wavelength of the sensor when the temperature changes

$$\begin{cases} y_1 = 10.79429x - 50.82857; & r_1 = 0.99994 \\ y_2 = 10.91143x - 55.17619; & r_2 = 0.99994 \\ y_3 = 10.35714x - 56.88095; & r_3 = 0.99973 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} y'_1 = 8.66857x + 0.05714; & r'_1 = 0.99991 \\ y'_2 = 8.78000x + 0.90000; & r'_2 = 0.99993 \\ y'_3 = 8.63143x - 1.89040; & r'_3 = 0.99982 \end{cases} \quad (10)$$

根据标定结果得到,零上时传感器的温度灵敏度系数分别为10.79429 pm/°C、10.91143 pm/°C、10.35714 pm/°C。零下时传感器的温度灵敏度系数分别为8.66857 pm/°C、8.78000 pm/°C、8.63143 pm/°C。反射波长的最大不确定度约为±1pm,因此可得,传感器的温度传感精度约为0.20 °C。

(2) 响应时间

光纤光栅温度传感器的响应时间是指环境温度出现阶跃变化时,输出温度变化到相当于该环境温度阶跃量的63.2%所需要的时间。

为了获得温度骤变时传感器的响应时间,将标定用的3个温度传感器快速在两个不同温度的盛水容器间进行切换。两容器分别为0 °C冰水混合物和100 °C蒸馏水,温差达到100 °C。三次切换的整体响应如图6所示。

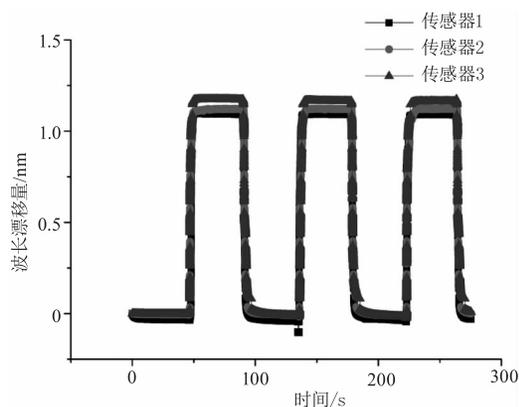


图6 温度变化时光纤光栅传感器的响应

Fig. 6 Response of fiber Bragg grating sensor to temperature change

把3个传感器快速从0 °C的冰水混合物切换到100 °C的蒸馏水,传感器局部升温响应如图7(a)所示。待传感器波长稳定后,再迅速把传感器从100 °C的蒸馏水切换到0 °C的冰水混合物,传感器局部降温响应如图7(b)所示。

表1数据为3次切换过程中,传感器的升温、降温响应时间。

由表1可知,该传感器的升、降温响应速度均很快,其中升温过程的平均响应时间约为1.37 s,降温

过程的平均响应时间约为 5.22 s,在国内外达到领先水平。但传感器升温过程的响应时间略小于降温过程的响应时间,这主要是因为传感器的体积小,其所释放热量被带走的速率较慢。同时由于传感器在两容器间切换时,在室温环境下会经历变温过程,另外手动切换也会带来一定的延迟,因此该温度传感器的实际响应速度应更快。

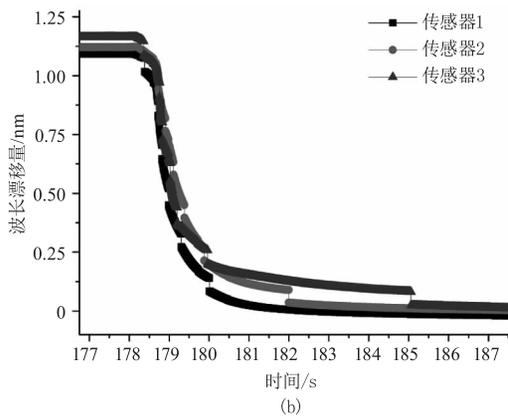
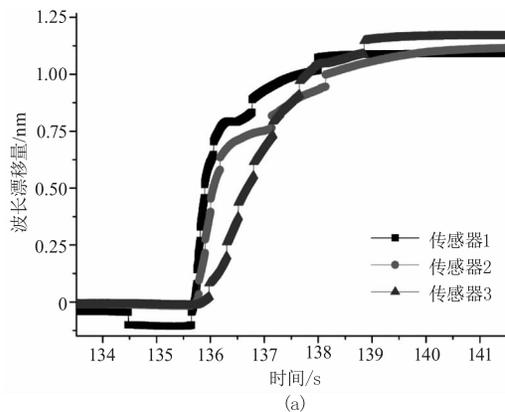


图7 传感器局部升、降温响应

Fig. 7 Sensor local rise and reduce response

表1 光纤光栅温度传感器的响应时间

Tab. 1 The response time of the fiber Bragg grating temperature sensor

响应时间/s	第一次	第二次	第三次
升温	1.09	1.50	1.52
降温	5.10	5.2	5.36

## 5 光纤光栅温度传感器太空实验

为验证该温度传感器在卫星温度监测中的实用性,进行了太空飞行实验。实验中,卫星帆板的传感器布局如图8所示,传感器均匀地分布在帆板表面,以达到测量整个帆板温度的效果。

在轨运行过程中,利用星上测温装置,实时获取帆板温度数值。按照地面标定实验得到的传感器温

度系数,对太空环境下采集到的波长数据分析处理,得到对应的温度值。并将传感器处理得到的温度数据与热敏电阻的温度值进行对比,可以发现由传感器波长变化与系数换算出的温度值与热敏电阻采集到的温度值基本一致。卫星在轨运行一个周期内,光纤温度传感器与热敏电阻采集到的温度值对比如图9所示,卫星帆板温度在 $-60 \sim 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化,温度传感器与热敏电阻采集到的温度值最大相差不到 $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,具有良好的一致性。传感器在经历了卫星发射振动和长期温度交变循环后,状态良好,表明该传感器可应用于卫星温度的测量,且具有较高的可靠性。

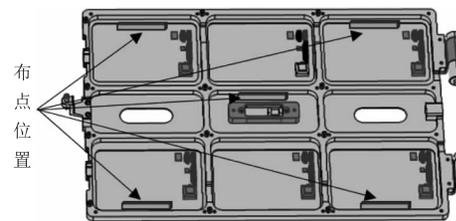


图8 传感器布点位置

Fig. 8 Stationing position sensor

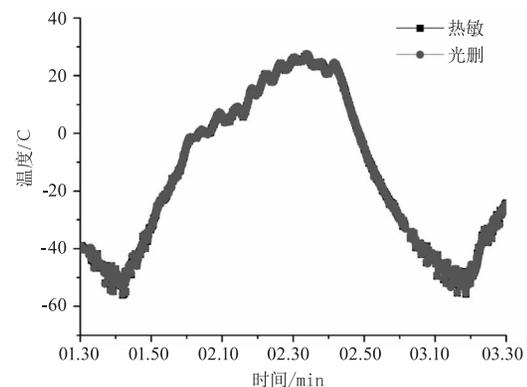


图9 卫星在轨运行一个周期的温差变化

Fig. 9 Satellites temperature changes in orbit during one cycle

## 6 结论

本文利用金属基底与陶瓷片相结合的封装方式,获得了响应速度快、可靠性高,可用于卫星帆板温度测量的小型光纤光栅温度传感器,传感器光纤采用C型封装固定在陶瓷片上,有效消除了温度传感器普遍存在的温度-应变交叉敏感问题。实验测得传感器的升温响应时间约为1.37 s,降温响应时间约为5.22 s,传感精度约为 $0.20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $-55 \sim -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $5 \sim 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内反射波长与温度的线性拟合度分别达到0.9998和0.9997以上,并能实时监测卫星在轨运行时帆板的温度变化。结果表明,该传感器可满足太空环境下温度骤变时,卫星帆板温度的实时、精确测量,具有高的可靠性。

## 参考文献:

- [1] WANG Defang. Reviewed present situation of optical fiber temperature sensor development [J]. Laser & Infrared, 1986, 16(5): 17-23. (in Chinese)  
王德芳. 光纤温度传感器研制现状评述[J]. 激光与红外, 1986, 16(5): 17-23.
- [2] LI Qiongyang. A study of thermal fatigue of solar array [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese)  
李琼阳. 太阳能帆板的热疲劳研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [3] ZHANG Xuezi, ZHU Lianqing, ZHANG Yinmin, et al. Fiber Bragg grating with nonmetal and corrosion resisting packaging and its temperature characteristic [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(4): 437-441. (in Chinese)  
张学智, 祝连庆, 张荫民, 等. 光纤光栅非金属耐腐蚀封装及其温度特性研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(4): 437-441.
- [4] WAN Xu, PENG Baojin, LIAO Yanbiao, et al. Removing the influence of the stain measure by temperature [J]. Laser & Infrared, 2005, 35(10): 50-52. (in Chinese)  
万旭, 彭保进, 廖延彪, 等. 消除温度对应变测量的影响[J]. 激光与红外, 2005, 35(10): 50-52.
- [5] WANG Debing, HUANG Jin. Response time test of temperature sensor [J]. Measuring Technology, 2016, (s1): 95-97. (in Chinese)  
王德兵, 黄进. 温度传感器响应时间测试[J]. 计测技术, 2016, (s1): 95-97.
- [6] LIU Tiegeng, WANG Shuang, JIANG Junfeng, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1681-1692. (in Chinese)  
刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1681-1692.
- [7] XU Fusheng, YAN Guang, ZHONG Guoshun, et al. Study on FBG sensor for satellite ambient temperature monitoring [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(6): 762-768. (in Chinese)  
徐福胜, 闫光, 钟国舜, 等. 卫星环境温度监测的光纤光栅传感器研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(6): 762-768.
- [8] TIAN He, CHEN Tianting, BAI Yan, et al. Medical miniature fiber grating temperature sensing probe encapsulated with glass [J]. Optics & Precision Engineering, 2017, 25(12): 3105-3110. (in Chinese)  
田赫, 陈天庭, 白岩, 等. 玻璃封装医用小型光纤光栅温度传感探头[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 3105-3110.
- [9] Azhari A, Liang R, Toyserkani E. A novel fibre Bragg grating sensor packaging design for ultra-high temperature sensing in harsh environments [J]. Measurement Science & Technology, 2014, 25(7): 075104.
- [10] Kim J H, Park Y, Kim Y Y, et al. Aircraft health and usage monitoring system for in-flight strain measurement of a wing structure [J]. Smart Materials & Structures, 2015, 24(10): 105003.
- [11] WANG Haiping, CHEN Rong, LIN Bin, et al. Temperature compensation of FBG sensors with double fiber Bragg gratings [J]. Laser & Infrared, 2003, 33(3): 218-220. (in Chinese)  
王海平, 陈荣, 林斌, 等. 双光纤 Bragg 光栅用于 FBG 型传感器的温度补偿[J]. 激光与红外, 2003, 33(3): 218-220.
- [12] LIU Li, GU Xingfa, YU Tao, et al. HJ-1B thermal infrared band in-flight radiometric calibration and validation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1119-1125. (in Chinese)  
刘李, 顾行发, 余涛, 等. HJ-1B 卫星热红外通道在轨场地定标与验证[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1119-1125.