**文章编号**:1002-2082(2011)06-1093-05

# 空间双折射干涉滤光器的主动补偿研究

张鹏斌[1,2,3],毛伟军[1]

(1. 中国科学院 国家天文台南京天文光学技术研究所,江苏 南京 210042;2. 中国科学院 天文光学技术重点实验室,江苏 南京 210042;3. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

摘 要:空间太阳望远镜中的双折射干涉滤光器对于温度的变化十分敏感,传统的滤光器在空间环境中很难做到高精度的温度控制。改进传统滤光器的结构,在每一单级中加入 LCVR(液晶位相延迟器),通过 LCVR 主动引入的附加位相延迟补偿由于温度波动引起的晶体位相延迟,可使滤光器透过率峰值波长始终保持稳定。以 Lyot 滤光器为研究对象,通过理论计算和模拟分析证明了该方法的可行性。该方法应用到空间双折射干涉滤光器可以使滤光器在卫星制造部门提供的环境温度下不使用任何温控系统依然正常使用,成功解决了空间双折射干涉滤光器温控精度的问题。由于摒弃了传统的两级温控装置,有效减小了滤光器的体积,减轻了滤光器的质量,使其更符合空间有效载荷的使用要求。

关键词:双折射干涉滤光器;主动补偿;温控系统;空间太阳望远镜

**中图分类号**:TH753 **文献标志码**:A **doi**:10.5768/JAO201132.0601008

## Active compensation research of spatial birefringent filter

ZHANG Peng-bin[1,2,3], MAO Wei-jun[1]

(1. National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, CAS, Nanjing 210042, China; 2. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, CAS, Nanjing 210042, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract**: The birefringent filter on space solar telescope is sensitive to the change of temperature, however, the precise temperature control of the traditional birefringent filter is difficult to achieve. An active compensation method which added a liquid crystal variable retarder (LCVR) in each single-stage of birefringent filter and introduced an additional retarder to compensate the delay caused by temperature fluctuation was put forward. This allowed the wavelength of the birefringent filter transmission peak to remain stable. The Lyot filter was studied, and the theoretical calculations and simulation proved the feasibility of this method. By applying the method to the spatial birefringent filter, the good performance of the filter could be remained without any temperature control system at the temperature provided by the satellite manufacturer, and the accurate temperature control of spatial birefringent filter was achieved. Since the traditional two-stage temperature control device was abandoned, the volume and weight of the filter were effectively reduced which met the requirements of space payload.

**Key words**: birefringent filter; active compensation; temperature controller; space solar telescope

**收稿日期**:2011-03-19; **修回日期**:2011-05-31

**作者简介**:张鹏斌(1985—),男,北京人,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所硕士研究生,主要从事特殊光学系统设计。E-mail:pbzhang@niaot.ac.cn

## 引言

双折射干涉滤光器是法国物理学家 Lyot 为了天文研究的需要,特别是为了观察太阳的日珥和日冕而发明的。由于双折射干涉滤光器可被设计成具有大视场角、窄通带、良好的抗光损伤能力等独特的光学特性的器件,因此在空间太阳望远镜中它是必备的有效光载荷。传统的色球双折射干涉滤光器其温控精度要求达到 0.02 ℃,这对于空间仪器无疑是十分困难的。首先由于空间有效载荷对质量和体积要求十分苛刻,因此传统双折射干涉滤光器的二级温控系统就显得过于笨重。其次由于卫星发射时的冲击振动十分剧烈,这就使传统的机械传动装置升空后的精度大大降低。

本文通过对四级宽场双折射干涉滤光器引入主动补偿装置,从而实现在卫星制造部门提供给滤光器的环境温度下,可以不使用任何温控系统的条件下双折射干涉滤光器正常使用,保证透射带峰值波长始终保持在(656.2808±0.002)nm。由于摒弃了传统温控系统的两级温控装置无论在体积还是质量上都得到了有效减小,更符合空间有效光载荷的使用要求。同时由于采用了 LCVR(液晶位相延迟器),从而摆脱了传统复杂而冗余的机械传动装置,使得设备发射升空后的可靠性得到了极大地提升。

## 1 双折射干涉滤光器的基本结构

### 1.1 双折射干涉滤光器基本要求

双折射干涉滤光器基本要求为

工作波长:656.2 808 nm;

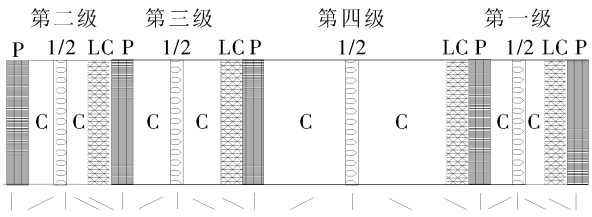
工作温度:42 ℃(实现补偿后可允许±5°温度变化,这个温度范围大于卫星制造部门提供给滤光器的环境温度变化范围);

半高全宽:FWMH≤0.025 nm;

视场大小:FOV=1°~2°。

### 1.2 双折射干涉滤光器的基本结构

为了满足双折射干涉滤光器的基本要求,本研究采用四级结构,选择冰洲石晶体为材料。同时为了满足视场的要求,各级采用宽场滤光器结构,双折射干涉滤光器结构如图 1 所示。




P:偏振片;1/2:宽场半波片;C:冰洲石单晶体; LC:液晶位相延迟器

**图 1 双折射滤光器结构**

**Fig. 1 Structure of birefringent filter**

双折射干涉滤光器的具体结构参数见表 1。

**表 1 双折射干涉滤光器结构参数**

**Table 1 Parameters of birefringent filter structure**

| 级数 | 材料 | 半宽/nm | 厚度/mm | 干涉级次 | 自由光谱范围 |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | C | 0.025 | 23 X 2 | 11 888 | 0.552 07 |
| 3 | C | 0.05 | 11.5 X 2 | 5 944 | 1.104 14 |
| 2 | C | 0.1 | 5.75 X 2 | 2 972 | 2.208 28 |
| 1 | C | 0.2 | 2.875 X 2 | 1 486 | 4.416 56 |

## 2 主动补偿滤光器理论研究

### 2.1 温度变化对晶体位相延迟的影响

晶体的位相延迟为

$$\sigma_i(T)=\frac{2\pi}{\lambda}\times d(T)\times\mu(T) \tag{1}$$

当晶体温度变化后晶体位相延迟变为

$$d\sigma_i(T)=\frac{2\pi}{\lambda}\times\left[d(T)\times\frac{\partial\mu}{\partial T}+\mu(T)\times\frac{\partial d}{\partial T}\right]\mathrm{d}T \tag{2}$$

$$\sigma_{温度}=\sigma_i(T)+\sigma_{温度}(T)=\sigma_i(T)+\frac{2\pi}{\lambda}\times\left[d(T)\times\frac{\partial\mu}{\partial T}+\mu(T)\times\frac{\partial d}{\partial T}\right]\Delta T \tag{3}$$

由温度变化引起的位相延迟为[2]

$$\sigma_{温变}=\sigma_i\left[\frac{1}{d}\frac{\partial d}{\partial T}+\frac{1}{\mu}\frac{\partial\mu}{\partial T}\right]\Delta T$$

($\Delta T$ 是晶体温度变化量) (4)

### 2.2 LCVR 工作原理

液晶相位可变延迟器(liquid crystal variable retardar ,LCVR) 是一种新型的偏振器件,其产生的相位延迟受电压控制,无须机械转动,而且响应时间极快,为 ms 数量级。LCVR 是基于液晶的电控双折射特性而制成,使用向列型液晶材料。向

列型液晶可被指向形成双折射层,因此在精心准备好的衬底之间排列向列相液晶可制备大孔径相位可调的延迟器,结构如图 2 所示。

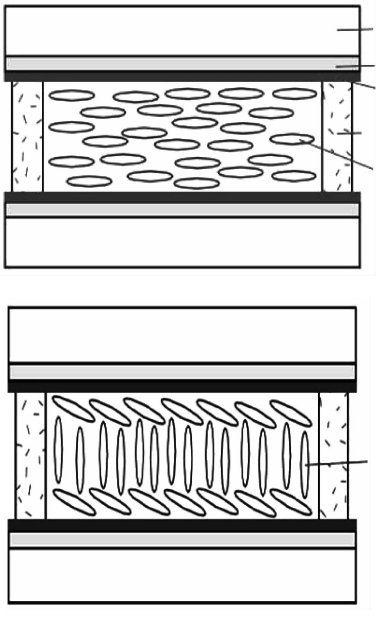


**图 2　LCVR 的结构**

**Fig. 2　Structure of LCVR**

各向异性的向列型液晶分子具有单轴双折射效应,液晶分子有序排列,并平行于长轴。不加电压时液晶分子平行排列,具有最大的相位延迟。此时 LCVR 的相延延迟为

$$\sigma = 2\pi \times \frac{\mu}{\lambda} \times d \tag{5}$$

式中:$\mu$ 是液晶的折射率差;$d$ 是液晶层的厚度。向列型液晶具有电偶极矩,施加电场趋向于使正的介电各向异性的向列相液晶的分子平行于电场方向排列。通过改变 LCVR 液晶两端的电压可连续调节光学轴的指向,从而实现入射光延迟相位的连续可调,其产生的相位延迟随着电压的增加而减小。

## 2.3　主动补偿装置的研究

通过滤光器每一级引入一个液晶位相延迟器(LCVR),由 LCVR 引入与波长无关的附加位相延迟。需要补偿的位相延迟是晶体温度变化量 $\Delta T$ 的函数,所以需要高分辨率温度传感器实时检测晶体温度变化值并反馈给主控电脑。主控电脑调用数据库中的相关数值计算出需要补偿的位相延迟,之后主控电脑控制驱动电压使 LCVR 达到需要的位相延迟。每完成一次主动补偿后,下一次的主动补偿将从前一次补偿后的驱动电压值开始调整。整个滤光器每一个单级都有一个相互独立闭环主动补偿系统,当每一单级的透过率峰值都稳定在同一波长时,整体透过率峰值波长也保持在此波长。结构如滤光器中每一单级的主动补偿装置,示意图如图 3 所示。

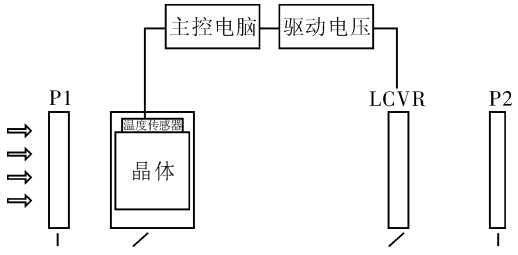



**图 3　滤光器中每一单级的主动补偿装置**

**Fig. 3　Active compensation device of each single-stage birefingent filter**

## 2.4　主动补偿装置理论可行性推导

如图 3 所示,为方便计算偏振片 $P_1$、$P_2$ 透光轴平行,双折射晶体光轴与 $P_1$、$P_2$ 透光轴夹角为 45°并与 LCVR 的快轴平行,其中双折射晶体 o 光与 e 光的位相差为 $\sigma$,LCVR 引入的附加位相差为 $\sigma_{LC}$,$P_1$ 代表经过偏振片 $P_1$ 后的光振幅,$P_2$ 代表从偏振片 $P_2$ 出射后的光振幅,$f_{晶体}$ 代表晶体快轴光振幅,$s_{晶体}$ 代表晶体慢轴光振幅,$f_{LCVR}$ 代表液晶快轴光振幅,$s_{LCVR}$ 代表液晶慢轴光振幅。

令偏振片 $p_1$ 出射的光振幅分布为

$$p_1 = a\cos(\omega t) \tag{6}$$

$$f_{晶体} = \frac{a}{\sqrt{2}}\cos(\omega t)$$

经过晶体后出射的振幅分布为

$$s_{晶体} = \frac{a}{\sqrt{2}}\cos(\omega t - \sigma) \tag{7}$$

通过 LCVR 后出射的振幅分布为

$$\begin{aligned} f_{LCVR} &= \frac{a}{\sqrt{2}}\cos(\omega t - \sigma) \\ s_{LCVR} &= \frac{a}{\sqrt{2}}\cos(\omega t - \sigma_{LC}) \end{aligned} \tag{8}$$

通过偏振片 $P_2$ 后的出射振幅为

$$P_2 = \frac{a}{2}\cos(\omega t - \sigma) + \frac{a}{2}\cos(\omega t - \sigma_{LC}) = a\cos\left(\frac{\sigma - \sigma_{LC}}{2}\right)\cos\left(\omega t - \frac{\sigma + \sigma_{LC}}{2}\right) \tag{9}$$

单级的振幅透过率变为

$$T = a^2\cos^2\left(\frac{\sigma-\sigma_{LC}}{2}\right) \tag{10}$$

结合本文 2.1 节对双折射晶体温度敏感性的研究结论可知,引入主动补偿装置后,当晶体温度变化时双折射干涉滤光器单级的透过率变为

$$T_{温度} = \frac{1}{2}\left\{1-\cos\left(\sigma_i+\left[\sigma_i\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial\mu}{\partial T}+\frac{1}{d_i}\frac{\partial d}{\partial T}\right)\Delta T-\sigma_{LC}\right]\right)\right\} \tag{11}$$

通过上式分析可看出,当 $\sigma_{LC}=\sigma_i\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial\mu}{\partial T}+\frac{1}{d_i}\times\frac{\partial d}{\partial T}\right)\Delta T$ 时,温度变化与双折射干涉滤光器的透过率无关,也就是由于补偿装置的引入消除了温度变化对双折射干涉滤光器的影响,使得滤光器透过率峰值波长始终保持在工作波长。

## 3 数值模拟分析

当温度稳定在设计温度 42℃时,此时双折射滤光器整体透过率输出方程为

$$T = \cos^2\left(\pi\frac{\mu}{\lambda}d_1\right)\times\cos^2\left(\pi\frac{\mu}{\lambda}d_2\right)\times\cos^2\left(\pi\frac{\mu}{\lambda}d_3\right)\times\cos^2\left(\pi\frac{\mu}{\lambda}d_4\right) \tag{12}$$

式中:$\mu$ 是晶体的双折射率;$d_i$ 是各级晶体厚度。此时的双折射干涉滤光器透过率曲线如图 4 所示,此时滤光器透过率峰值在波长 656.280 8 nm。我们选择此波长为工作波长。

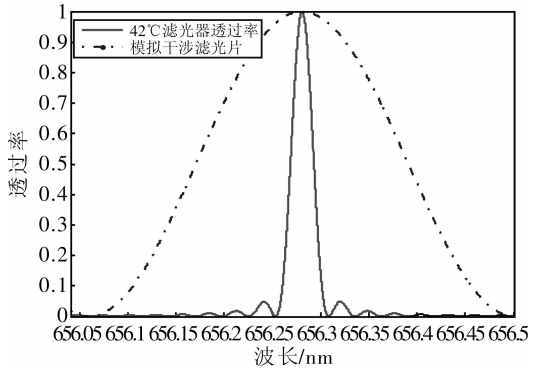



**图 4 温度稳定在 42 ℃时双折射干涉滤光器的透过率曲线**

**Fig. 4 Transmittance curve of birefringent filter when temperature was stable at 42 ℃**

当温度发生变化时,此时冰洲石晶体的双折射率和厚度同时发生变化,此时双折射滤光器的透过率曲线发生变化,其透过率输出方程为

$$T_{温变} = \cos^2\left[\frac{\sigma_1+\frac{\partial\sigma_1}{\partial T}\Delta T_1}{2}\right]\times\cos^2\left[\frac{\sigma_2+\frac{\partial\sigma_2}{\partial T}\Delta T_2}{2}\right]\times\cos^2\left[\frac{\sigma_3+\frac{\partial\sigma_3}{\partial T}\Delta T_3}{2}\right]\times\cos^2\left[\frac{\sigma_4+\frac{\partial\sigma_4}{\partial T}\Delta T_4}{2}\right] \tag{13}$$

其中 $\sigma_i=2\pi\times\frac{\mu}{\lambda}\times d_i$。下面模拟当滤光器整体温度降低 5℃时,即 $\Delta T_1=\Delta T_2=\Delta T_3=\Delta T_4=-5$℃时双折射干涉滤光器的透过率曲线,如图 5 所示。从图 5 中可以看出,滤光器透过率峰值波长从原先的 656.280 8 nm 变为 656.47nm,并且基本移出了干涉滤光片的范围(虽然干涉滤光片本身也存在温度效应,但是由于其本身带宽远远大于双折射干涉滤光器的带宽,所以其影响基本可以忽略不计)。显然这在实际使用中是不能容忍的,排除这种情况正是本研究的意义所在。

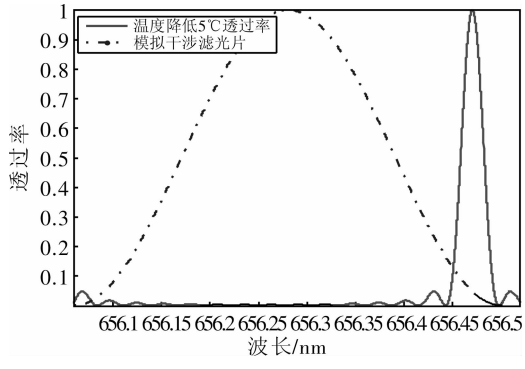



**图 5 温度降低 5℃后滤光器的透过率曲线**

**Fig. 5 Transmittance curve of birefringent filter after temperature is reduced by 5℃**

当引入补偿装置后,此时 LCVR 引入与波长无关的位相延迟为 $\sigma_{LCi}=\frac{\partial\sigma_i}{\partial T}\Delta T_i$,此时滤光器整体透过率输出方程重新变为

$$T_{补偿} = \cos^2\left(\pi\frac{\mu}{\lambda}d_1\right)\times\cos^2\left(\pi\frac{\mu}{\lambda}d_2\right)\times\cos^2\left(\pi\frac{\mu}{\lambda}d_3\right)\times\cos^2\left(\pi\frac{\mu}{\lambda}d_4\right) \tag{14}$$

图 6 模拟出此时的双折射干涉滤光器的透过率曲线。从图 6 中可以看到,通过补偿装置的引入透过率峰值重新回到了我们设定的工作波长 656.280 8 nm。

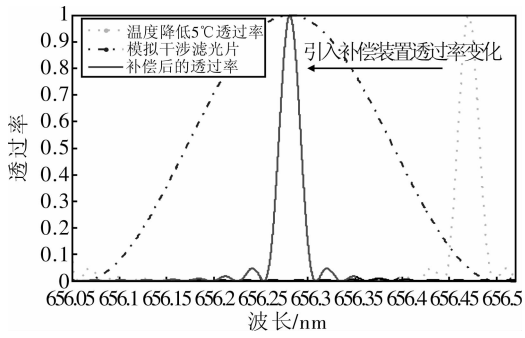



**图 6　引入温度补偿装置后透过率曲线**

**Fig. 6　Transmittance curve of birefringent filter after adding active compensate device**

通过理论计算并模拟主动补偿双折射干涉滤光器透过率曲线的变化,揭示了滤光器主动补偿的工作原理,验证了其理论可行性。

## 4　结束语

本文根据空间双折射干涉滤光器的特殊需要,提出了一种双折射干涉滤光器的主动补偿理论。文中通过理论推导、模拟分析证明该方法可以主动补偿由于温度变化引起晶体的位相延迟,从而使双折射干涉滤光器在温度波动环境中的透过率峰值波长始终保持稳定。该理论应用到空间双折射干涉滤光器可以使滤光器在卫星制造部门提供的环境温度下,不使用任何温控系统依然正常使用。由于摒弃了传统温控系统的两级温控装置,有效地减小了滤光器的体积,减轻了滤光器的质量,使其更符合空间有效载荷的使用要求。同时由于采用了 LCVR(液晶位相延迟器)摆脱了传统复杂而冗余的机械传动装置,使得设备发射升空后的可靠性得到了极大的提升。

**参考文献:**

[1] EVENS J W. The birefringent filter[J]. J. Opt. Soc. A.,1949,39:229-242.

[2] 黄佑然,许熬敖,秦志海,等. 实测天体物理学[M]. 北京:北京科学出版社,1987.
HUANG You-ran, XU Ao-ao , QIN Zhi-hai, et al. Measured astrophysics[M]. Beijing: Beijing Science Press,1987. (in Chinese)

[3] Meadowlark Optics Inc. Meadowlark. Liquid crystal variable retarders[Z]. California: Meadowlark Optics Inc. ,2003.

[4] TITLE A M, RAMSEY H E. Develop of birefringent filter for spaceflight[R]. California: Lockheed Palo Alto Research Laboratories,1976.

[5] CAO Wen-da, HARTKORN K. First light of the near-infrared narrow-band tunable birefringent filter at big bear solar observatory[J]. Solar Physics, 2006,238: 207-217.

[6] 赵凯华,钟锡华. 光学[M]. 北京:北京大学出版社,1982.
ZHAO Kai-hua, ZHONG Xi-hua. Optical[M]. Beijing:Peking University Press,1982. (in Chinese)

[7] 汤学胜,毛伟军. 近红外双折射滤光器的研究[D]. 南京:中科院南京天文光学技术研究所,2008.
TANG Xue-sheng, MAO Wei-jun. Study on the design of the near-IR tunable filter system[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology,2008. (in Chinese)

[8] AI Guo-xiang. Progress in space solar telescope [J ]. Advance in Space Reseach,1998,21:305-314.

[9] 李挺,倪厚坤. 双折射滤光器的机械结构[J]. 北京天文台台刊,1986,8:136-143.
LI Ting, NI Hou-kun. The mechanical construction of the birefringent filter [J ]. Publications of the Beijing Astronoical Observatory , 1986, 8: 136-143. (in Chinese with an English abstract)

[10] 钟宇光,张祖兴,乔学增,等. 波长可选择高双折射光纤干涉滤波器[J]. 应用光学,2011,32(2):303-307.
ZHONG YU-guang, ZHANG ZU-xin, QIAO Xue-zeng, et al. High birefringentce coherent fiber filter with selectable wavelengths[M]. Joural of Applied Optics,2011, 32(2):303-307. (in Chinese with an English abstract)