

# Study on Compensating the Angular Shift Error of the Acousto-Optic Tunable Filter

Lingying Chang<sup>1\*</sup>, Mengzhu Jin<sup>1</sup>, Dawei Yao<sup>2</sup>, Yuehong Qiu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Xi'an Institute Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an Shaanxi

Email: \*sophia\_chang@126.com

Received: Nov. 16<sup>th</sup>, 2018; accepted: Nov. 28<sup>th</sup>, 2018; published: Dec. 5<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

AOTF Imaging spectropolarimeter is a type of novel photo electric sensor which integrated the functions of imaging, spectrometry and polarimetry. Non-collinear acousto-optic tunable filter (AOTF) can quickly get the whole field of different narrow-spectrum light with ordinary and extraordinary polarization state images. However, AOTF wavelength tuning, the diffraction angle will change with changes in the wavelength scanning, resulting in the same target in different spectral images relative shift occurred. This article describes the non-collinear acousto-optic tunable filter (AOTF) and the basic principles of the angular shift error of the Acousto-optic Tunable Filter. Angular shift error compensation method of polarization imaging spectrometer for acousto-optic tunable filter in recent years was summarized. The principle for rotating mirror method, the crystal surface wedge method, the prism compensation method, single crystal optical wedge compensation method, and double wedge compensation method were described, and the development trend of polarization imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter was discussed.

## Keywords

Optical, Acousto-Optic Tunable Filter, The Angular Shift Error, Compensation Method

---

# 基于声光可调谐滤波器角位移补偿方法研究

常凌颖<sup>1\*</sup>, 靳梦竹<sup>1</sup>, 姚大为<sup>2</sup>, 邱跃洪<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安邮电大学, 陕西 西安

<sup>2</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安

Email: \*sophia\_chang@126.com

收稿日期: 2018年11月16日; 录用日期: 2018年11月28日; 发布日期: 2018年12月5日

\*通讯作者。

## 摘要

基于声光可调谐滤波器的偏振成像光谱仪是一类同时具有成像、光谱测量和偏振测量功能的新型光电传感器。非共线声光可调谐滤波器(AOTF)可以快速获得全视场不同窄谱段的o光和e光偏振图像。但是, AOTF波长调谐时, 衍射角会随扫描波长的变化而变化, 造成同一目标不同谱段的图像发生相对偏移。本文介绍了非共线AOTF的工作原理, 分析了基于声光可调谐滤波器的偏振成像光谱仪角位移产生的机理, 对近些年来国内外的成像光谱偏振仪的基于声光可调谐滤波器的偏振成像光谱仪角位移补偿方法研究进行了总结分析, 对于旋转平面反射镜方法、在晶体出射面加工楔角的方法、棱镜补偿方法、单晶体光楔补偿方法、双光楔补偿方法的原理进行了阐述, 并对基于声光可调谐滤波器的偏振成像光谱仪的发展趋势进行了展望。

## 关键词

光学, 声光可调谐滤波器, 角位移, 补偿方法

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

基于声光可调谐滤波器的偏振光谱成像是当今国内外的一个热门研究课题, 自从声光可调谐滤波器的各项理论的出现, 其各项性能和设计原理逐渐被人们所熟悉, 人们也越来越对其各种优越的性能感兴趣。比之于其它形式的成像光谱仪, 它有很多优点, 首先是它除了具有一般成像光谱仪的二维空间信息与一维光谱信息外, 还有偏振信息, 可以说它是目前获取信息最多的一种光学遥感器。由于 AOTF 特殊的分光原理, 它具有其它传统分光元件所不能比拟的优点, 如: 1) 体积小, 均为固体结构, 无运动部件; 2) 衍射效率高; 3) 电可调谐, 光谱扫描速度快; 4) 调谐范围宽。其它的优点还有: 数据图像输出灵活、结构简单、光谱波段宽、分辨率高等[1] [2] [3]。

特别是应用在航天光谱成像领域时, AOTF 成像光谱仪具有光谱扫描速度快的优点, 传统的光谱分析技术中采用的分光元件(棱镜或是光栅)的光谱仪的光谱获取方式一般是通过推扫来获取目标的光谱信息, 这会产生大量的冗余信息。而 AOTF 具有灵活的光谱调谐性, 不需要光谱扫描就能对视场内进行光谱分析, 可以快速选择需要的谱段进行光谱分析, 大大减少了遥感数据传输的压力。作为一种分光元件, 非共线声光可调谐滤波器的一系列特点使其非常适合于光谱成像领域的应用。另外, 声光可调谐滤波器的波长扫描过程可以在计算机控制下进行, 操作上更加方便[4] [5] [6]。

美国、日本和欧洲的一些国家在此项技术的应用方面是比较领先的, 特别是美国, 喷气推进实验室和陆军研究实验室长期以来一直致力于声光可调谐超光谱成像仪的研究工作, 成功研制出了一系列不同探测波段及不同用途的声光可调谐超光谱成像仪, 并将其应用于军事、遥感、农业和医学等领域[7]-[12]。

## 2. 非共线 AOTF 的工作原理

AOTF 是电调谐光学调制器, 利用各向异性材料的布拉格衍射原理。通过在晶体中声光耦合对入射

光产生衍射，改变激励声波的电驱动器的频率，可以改变衍射光的波长。AOTF 的响应时间由声波渡越光学孔径的时间来决定，一般是几个微秒[13]。

AOTF 的装置通常包括一个双折射晶体以及一个粘在晶体上的压电转换器。压电转换器由压电晶体构成，并通过信号线与射频发生器相连。射频发生器发出的射频信号传输到压电转换器，则会在双折射晶体中激励起声波。光波在通过晶体时发生衍射，分解为零级光和衍射光。衍射光可用电荷耦合器件(CCD)等进行检测。

非共线 AOTF 由声光介质、电声换能器、吸声装置构成，结构如图 1 所示。

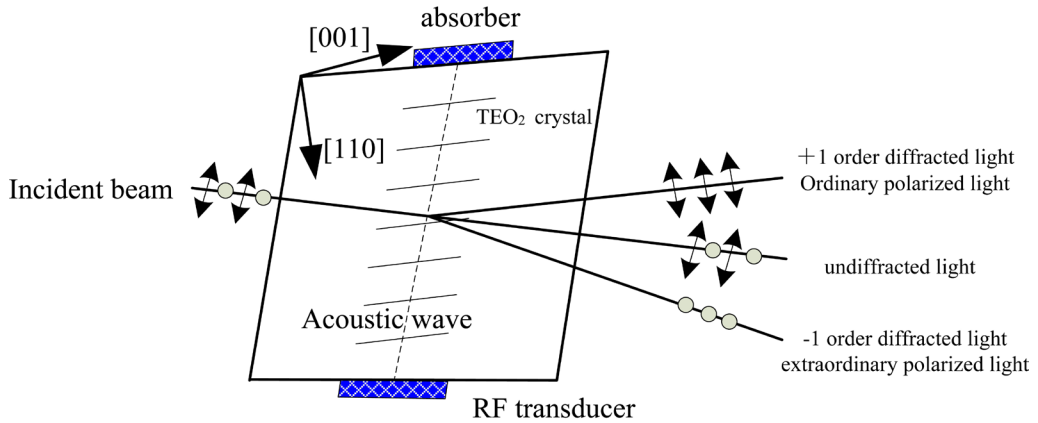


Figure 1. Schematic diagram of AOTF  
图 1. AOTF 原理图

声光可调滤波器是根据各向异性介质内的反常布拉格衍射原理制成的分光元件。声光可调滤波器的结构主要包括声光晶体和键合在其上的压电换能器。压电换能器将加载到其上的电信号转换成在声光晶体内传播的同频率的超声波，超声波在晶体中传播时与入射光波发生相互作用，当满足布拉格衍射条件时入射光将产生布拉格衍射，衍射光的波长与驱动电信号的频率之间一一对应，因而可以通过改变驱动电信号频率来改变衍射光波长。当射频信号加到换能器上时，激励出声波并射入声光介质。为了防止声波反射，透过介质的声波被吸声装置吸收。

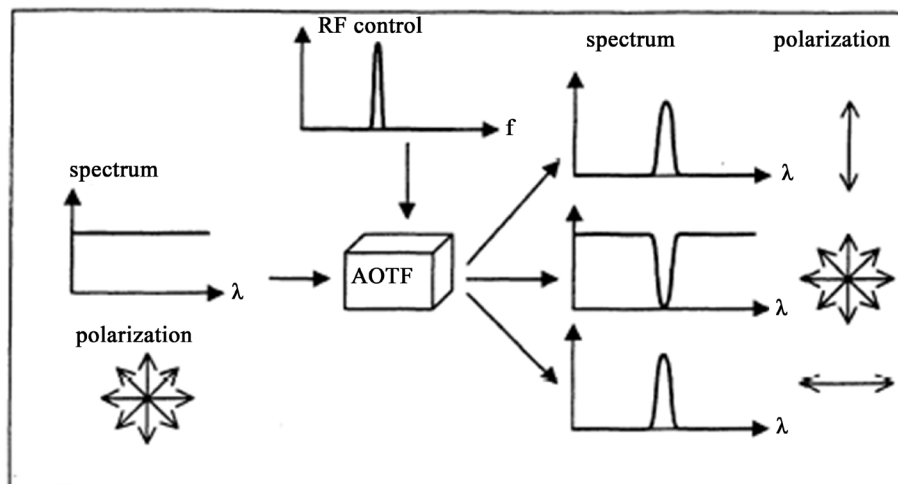


Figure 2. Schematic diagram of white light AOTF incidence  
图 2. 白光入射 AOTF 示意图

当入射光为白光时(如图 2 所示),对任一声频都将有两束衍射光同时出现,一束为正衍射光,一束为负衍射光,分别位于零级光两侧。正衍射光与负衍射光的偏振态正交。入射光是 O 光或 E 光时,只有一束衍射光输出,衍射光偏振态与入射光偏振态正交。当声波频率改变时,满足动量匹配条件的衍射光波长也将相应改变,从而构成电调谐滤波器[14]。

### 3. 声光可调谐滤波器角位移的产生

非共线声光可调谐滤波器(AOTF)  $\pm 1$  级衍射偏振光的偏转角实际上是波长的函数,随着波长的变化产生变化。在成像的应用中就会出现改变驱动频率,引起衍射波长变化和衍射角变化,造成同一目标不同谱段的图像发生相对偏移,对于  $\text{TeO}_2$  晶体,  $o$  光与  $e$  光的主折射率  $n_o(\lambda)$ 、 $n_e(\lambda)$  可由 sellmier 方程表示出:

$$n(\lambda) = 1 + \frac{A_1}{\left(\frac{1}{\lambda_1}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2} + \frac{A_2}{\left(\frac{1}{\lambda_2}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2}$$

公式中参数  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的值见表 1。

**Table 1.** Indices of refraction of  $\text{TeO}_2$

**表 1.**  $\text{TeO}_2$  晶体折射率计算参数

偏振光	$A_1$	$\lambda_1/\text{nm}$	$A_2$	$\lambda_2/\text{nm}$
O 光	$1.4351 \times 10^{-4}$	134.2	$1.6621 \times 10^{-5}$	263.8
E 光	$1.5678 \times 10^{-4}$	134.2	$2.2248 \times 10^{-5}$	263.1

从公式可以看出,由于  $\text{TeO}_2$  晶体本身固有的色散性质,  $o$  光与  $e$  光的折射率  $n_o$ 、 $n_e$  均为波长的函数。

自然光入射到光学系统,晶体受到调制器激发,满足布拉格衍射条件出相对应波长的  $o$  光及  $e$  光信号,衍射方向由下式确定:

衍射角  $\theta_d$  的计算公式:

$$\tan \theta_d = \left(\frac{n_o}{n_e}\right)^2 \cdot \tan \theta_i$$

其中,  $\theta_d$  是衍射光极角,  $\theta_i$  是入射光极角,  $n_o$  是  $o$  光折射率,  $n_e$  是  $e$  光折射率。

由衍射光极角与入射光极角的关系式,我们可以得出,对于一定方向的入射光,如果确定了  $n_e$ 、 $n_o$ 、衍射角,就可以计算出衍射光的方向。由于  $n_e$ 、 $n_o$  都是光波长  $\lambda$  的函数,所以衍射光极角  $\theta_d$  也是光波长的函数。

假设晶体内部的入射光为右旋  $e$  光,则由反常声光布拉格衍射原理可知衍射光为左旋  $o$  光。从而,入射光折射率  $n_i$  以及衍射光折射率  $n_d$  分别表示为:

$$n_i = \left(\frac{\cos^2 \theta_i}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta_i}{n_e^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$n_d = n_o$$

由相位匹配条件,可以得到超声频率与光波长的调谐关系式为

$$f_a = \frac{V_a}{\lambda_0} \left(n_i^2 + n_d^2 - 2n_i n_d \cos(\theta_i - \theta_d)\right)^{\frac{1}{2}}$$

其中,  $f_a$  为超声频率,  $V_a$  为超声声速,  $\lambda_0$  为调谐波长。超声频率与衍射光波长的变化关系如图 3 所示。

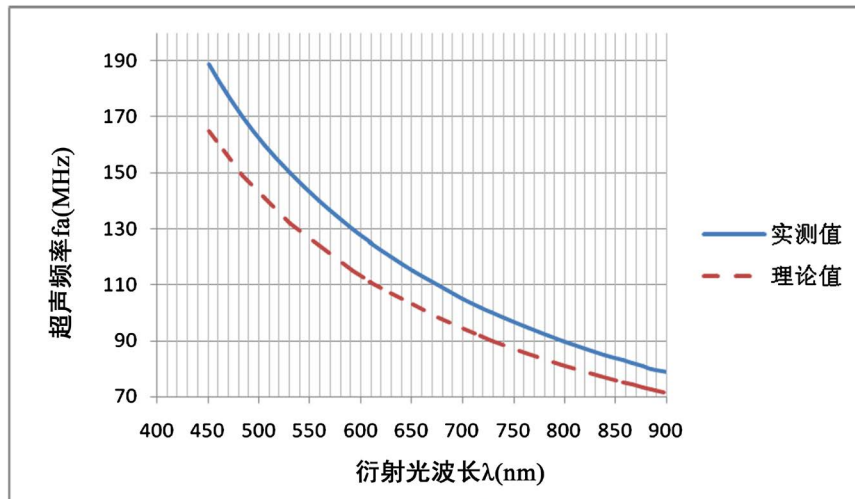


Figure 3. The curve of the relation of the ultrasonic frequency and the wavelength  
图 3. 超声频率与衍射光波长关系曲线

在成像的应用中就会出现改变驱动频率, 引起衍射波长变化和衍射角变化, 造成同一目标不同谱段的图像发生相对偏移, 因此影响数据的采集应用。

#### 4. 角位移补偿方法

##### 4.1. 旋转平面反射镜方法

1994 年, 美国 NASA 戈达德空间飞行中心的 D. A. Glenar, J. 在他们所研制的地基式望远镜中采用了独立调整两个平面反射镜的方案来补偿色散引起的图像漂移[15], 其光学系统结构图如图 4 所示。

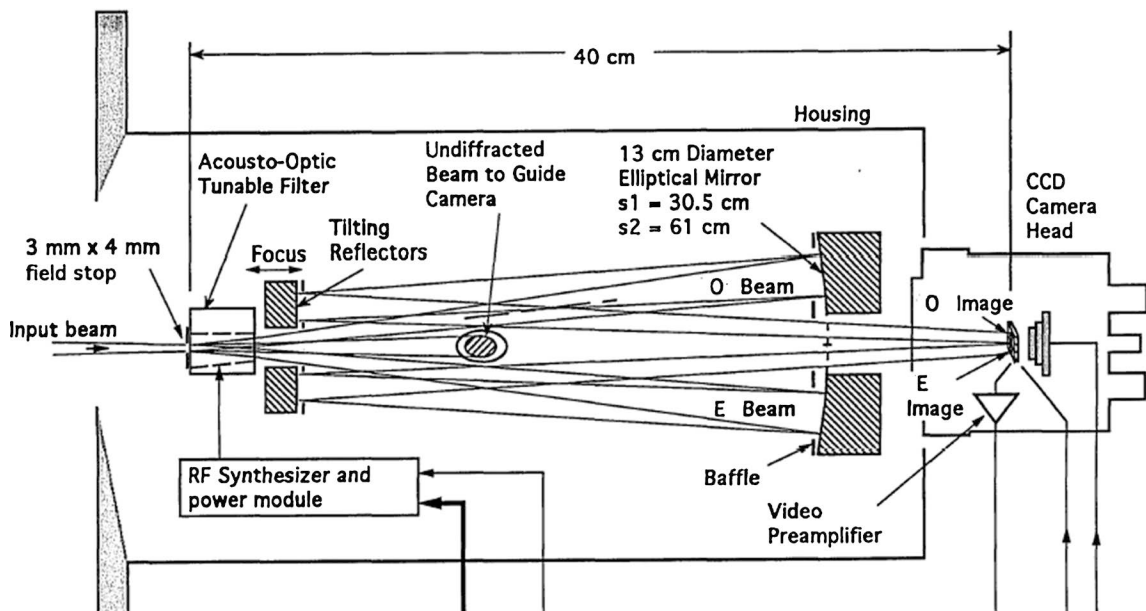


Figure 4. The optical system structure diagram of the polarization imaging spectrometer  
图 4. 偏振成像光谱仪的光学系统结构图

该方法补偿最为直接，衍射光的偏移量直接由平面反射镜调整补偿，但是实际应用时需实时精密控制平面反射镜，不同的衍射光波长需调整不同的平面反射镜的角度，这样就失去了声光可调谐滤波器实时性及无运动部件的优越性。

#### 4.2. 在晶体出射面直接加工楔角

1996年，美国宾夕法尼亚州匹兹堡西屋科技中心的 D. R. Suhre 提出在晶体出射面直接加工楔角的方法来消除晶体衍射引起的色散[16]。

消除色散的方法具体可以由图5表示出来，在晶体的出射面上加工上一个大小为 $\theta_w$ 的光楔(起作用同色散棱镜)，对衍射光的衍射角进行色散修正。当入射光垂直入射面以极角 $\theta_i$ 入射时，晶体中的衍射光的偏转角大小为 $(\theta_i - \theta_d)$ ，衍射光经晶体出射面折射后的折射角大小为 $\beta$ ，那么通过折射公式可以得出 $\beta$ 大小为：

$$\sin \beta = n_o \cdot \sin(\theta_i - \theta_d - \theta_w)$$

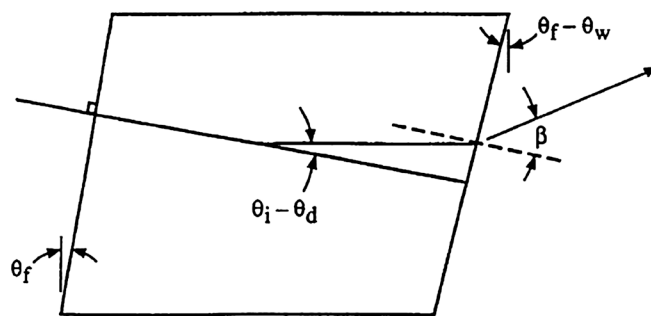


Figure 5. Schematic diagram of the incident plane parallel to the exit surface of AOTF  
图5. 入射面平行于出射面时的 AOTF 示意图

对于确定的入射角 $\theta_i$ ， $\theta_d$ 的大小只和晶体的折射率有关，而上面的关系式的右边只有 $\theta_d$ 和 $n_o$ 两个参数与波长的变化相关。如果能选择适当的光楔 $\theta_w$ 大小，则可以让两个随波长变化的参数相互抵消而消除出射变化。

这种方法对于消除图像漂移的实际效果可以通过数值模拟加以定量计算。图6给出光楔角取一系列

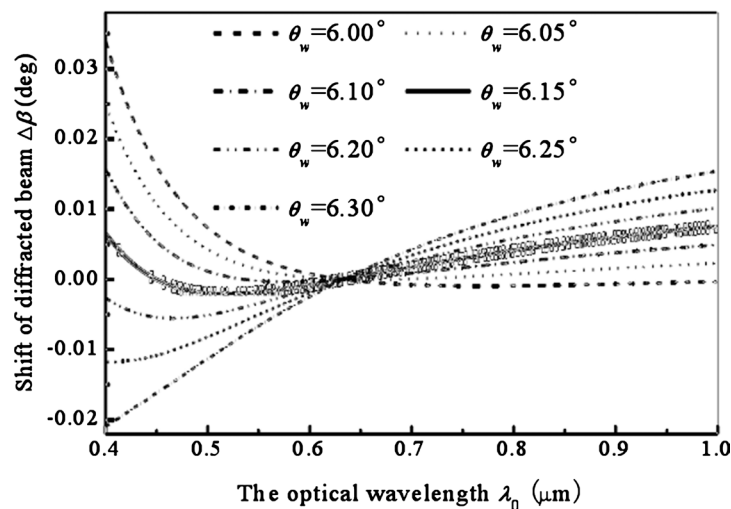


Figure 6. A wedge angle diffraction light varies with wavelength drift  
图6. 一定光楔角下介质外衍射光随波长变化的漂移情况



数值时的衍射光漂移情况。从图 6 可以看出,随着光楔角的增大,介质外衍射光的漂移先逐渐减小,接着达到一个最小值,然后逐渐增大。从图中得到,当光楔角  $\theta_w$  取  $6.15^\circ$  时,衍射光漂移最小,在波长扫描范围  $0.4\ \mu\text{m}\sim 1.0\ \mu\text{m}$  内,衍射光仅漂移  $0.00961$ 。

该方法可以实现色散的补偿,但是实际应用时不能同时经晶体衍射出的两路偏振光进行同时补偿,只适用于偏振光入射到晶体后衍射的补偿应用。

### 4.3. 棱镜补偿方法

2008 年,韩国先进科学技术研究所的 Sung Yoon Ryu 提出在光路中放置 K9 棱镜的方法来消除晶体衍射引起的色散[17]。

消除色散的方法如棱镜补偿系统图 7 中所示,由于衍射光波长与棱镜的折射率近似成反比关系,所以棱镜色散角随着折射光的波长而变小。这样,在 AOTF 后面,沿 AOTF 光轴传播方向对称放置 BK7 棱镜,由波长产生的色散现象就可以通过 AOTF 后面放置的棱镜来补偿,棱镜的底边角度 A、B 根据补偿的 O 光和 E 光设计成不同的值,最终,通过棱镜后的折射角不随波长变化而变化,在 CCD 接收面上的图像漂移现象也会减到最小。

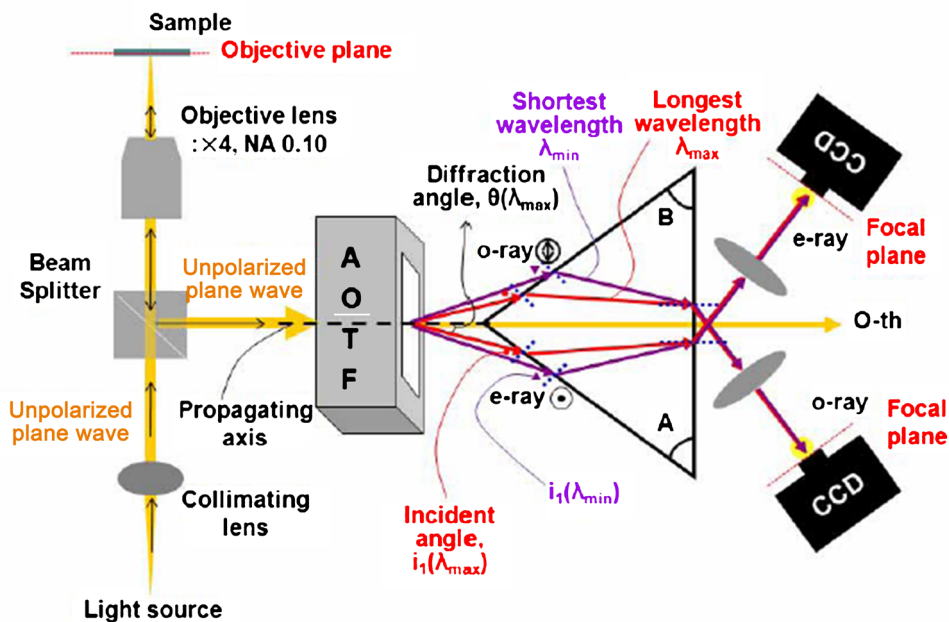


Figure 7. Principle of prism compensation system

图 7. 棱镜补偿系统的原理图

在  $473.95\ \text{nm}\sim 614.723\ \text{nm}$  的波段范围,调谐频率为  $120\ \text{MHz}\sim 180\ \text{MHz}$ ,衍射角的变化范围约  $0.562^\circ$ ,约为 244 个像元。在 A 角 =  $46.57^\circ$ , B 角 =  $46.162^\circ$  的情况下进行补偿,补偿后图像漂移约为 5~6 个像元,角度约为  $0.0012^\circ\sim 0.0015^\circ$ 。

该方法可以同时补偿 O 光和 E 光两路偏振光的色散现象,但是根据设计结果看,一是补偿的波段范围不宽,如增大波段范围后补偿的效果非常有限。二是从在 AOTF 后面放置 BK7 棱镜的方式来看,该种补偿方式只能适用于光学系统视场角非常小的情况,否则用同一块棱镜来补偿两路偏振光的色散时,两路偏振光存在混叠。三是,相对 o 光和 e 光,0 级非衍射光能量较强,经过同一块补偿棱镜后会对 o 光和 e 光产生较强的干扰,成像时会出现杂光。

#### 4.4. TeO<sub>2</sub> 单光楔补偿

2009 年, 本论文作者提出在 $\pm 1$  级光路中分别添加晶体单光楔的方法补偿非共线声光可调谐滤波器(AOTF)晶体色散引起的图像漂移。分析结果表明使用 TeO<sub>2</sub> 材料设计的光楔在楔角为 7.6° 的时候可以控制图像漂移在一个像元以内, 并在 400 nm~900 nm 的工作波段范围内满足稳定成像的要求[18]。

采用 TeO<sub>2</sub> 单光楔补偿的方法从理论上能够很好的补偿非共线声光可调谐滤波器(AOTF)晶体色散引起的图像漂移, 但采用晶体材料加工的光楔需要较大的通光口径, 这就需要很大的单晶材料, 从加工成本及可实现性等方面都存在问题。

#### 4.5. 双光楔补偿方法

2011 年, 本论文作者提出在 $\pm 1$  级光路中分别添加普通光学材料的双光楔方法补偿非共线声光可调谐滤波器(AOTF)晶体色散引起的图像漂移, 该方法 2013 年已获得了国家发明专利授权。

采用普通光学材料的双光楔方法, 即使用 ZK7 与 ZF6 的组合, 在 400 nm~900 nm 的工作波段范围内可以补偿 TeO<sub>2</sub> 晶体色散引起的图像漂移在一个像元以内, 满足了稳定成像的要求。

双光楔补偿的方法如图 8 所示, 通过 CODE V 光学设计软件程序在晶体中心设置光栅来模拟晶体的偏转及不同波长下的衍射角, 由于不同波长下的衍射角具有非线性, 存在高阶色散, 需要同时优化两个光楔的楔角来达到最优组合。经软件计算对于 o 光,  $\alpha_1 = 30.27^\circ$ ,  $\alpha_2 = 35.93^\circ$ , 对于 e 光  $\alpha_1 = 30.57^\circ$ ,  $\alpha_2 = 36.33^\circ$ , 材料为 ZK7 与 ZF6 的组合。由于衍射偏转角在短波段变化较快, 所以评价函数需在短波段加密, 并采用自定义的评价函数, 使得经过晶体调谐后具有不同衍射角的光线入射到双光楔组后, 各个波段的出射方向一致, 出射为平行光, 即满足了不同谱段的图像经过双光楔补偿后成像在 CCD 的同一位置。

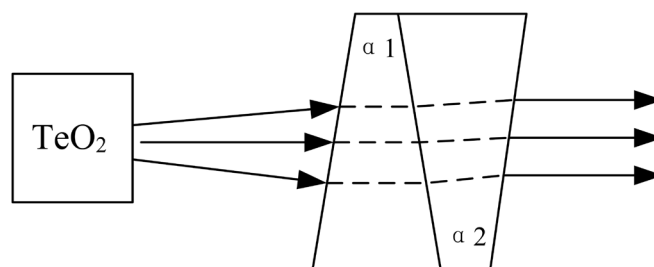


Figure 8. Schematic diagram of double optical wedge  
图 8. 双光楔补偿示意图

## 5. 结论

声光可调谐滤波器是一种电调谐光谱滤波器, 它最突出的特点是全固体部件并且具有灵活的光谱调谐性。近年来, 这种新型的色散元件越来越受到人们的重视, 并应用到航天光谱成像领域, 它作为一种新型信息获取方法, 综合了成像光谱仪和成像偏振仪的特点, 诸多优点和应用前景受到国内外研究人员的广泛关注, 目前限制声光可调谐滤波器发展的主要方面为晶体的性能及图像随谱段漂移的问题, 文章对近些年来出现的声光可调谐滤波器角位移补偿方法进行了分析总结, 并对几种重要类型的补偿方法进行了原理介绍。随着研究的不断发展深入, 必将推动基于声光可调谐滤波器的偏振成像光谱仪的创新与发展。

## 基金项目

国家自然科学基金(61475190)。



## 参考文献

- [1] Trivedi, S., Rosemeier, J., Jin, F., *et al.* (2006) Space Qualification Issues in Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF)-Based Spectrometers. *Lasers and Applications in Science and Engineering*. International Society for Optics and Photonics, 61001W-61001W-11.
- [2] Korablev, O., Bertaux, J.L., Grigoriev, A., *et al.* (2002) An AOTF-Based Spectrometer for the Studies of Mars Atmosphere for Mars Express ESA Mission. *Advances in Space Research*, **29**, 143-150. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00581-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00581-6)
- [3] Huth, J.F. (1999) History and Background of Acousto-Optical Tunable Filters (AOTFs) for Imagery Intelligence Applications. *The 27th AIPR Workshop: Advances in Computer-Assisted Recognition*, International Society for Optics and Photonics, 136-141.
- [4] Cheng, L.J., Mahoney, J.C., Reyes, G.F., *et al.* (1994) Target Detection Using an Acousto-Optic Tunable Filter Hyperspectral Imager. *SPIE's International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing*, International Society for Optics and Photonics, 251-259.
- [5] Chao, T.H., Yu, J., Reyes, G., *et al.* (1991) Acousto-Optic Tunable Filter Imaging Spectrometers. *IGARSS'91; Proceedings of the 11th Annual International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, **1**, 585-588.
- [6] Cheng, L.J., Chao, T.H., Dowdy, M.W., *et al.* (1993) Multispectral Imaging Systems Using Acousto-Optic Tunable Filter. *OE/LASE'93: Optics, Electro-Optics, & Laser Applications in Science & Engineering*, International Society for Optics and Photonics, 224-231.
- [7] Georgiev, G., Georgieva, E. and Konstantinov, L. (1999) Angular and Power Characteristics of Noncollinear Acousto-Optic Tunable Filters. *Optics and Lasers in Engineering*, **31**, 1-12
- [8] VoDinh, T., Moreau, F. and Hueber, D.M. (2002) Multispectral Imaging System Using Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF). *SPIE*, **2819**, 268-273.
- [9] Sivanayagam, A. and Findlay, D. (1984) High Resolution Non-Collinear Acousto-Optic Filters with Variable Passband Characteristics: Design. *Applied Optics*, **24**, 4601-4608. <https://doi.org/10.1364/AO.23.004601>
- [10] Chen, Z.Y., Jacob, K., Jose, L., Feng, J., Xiong, X.C., Ken, J., Sudhir, T., Jolanta, S., Marion, H. and Charles, R. (2007) Near-Infrared Spectropolarimeter Using an Acousto-Optic Tunable Filter. *Optical Engineering*, **46**, 073605.
- [11] Cheng, L.J., Chao, T.H., Dowdy, M.W., *et al.* (1993) Multispectral Imaging Systems Using Acousto-Optic Tunable Filter. *OE/LASE'93: Optics, Electro-Optics, & Laser Applications in Science & Engineering*, International Society for Optics and Photonics, 224-231.
- [12] Cheng, L.J. and Reyes, G.F. (1995) AOTF Polarimetric Hyperspectral Imaging for Mine Detection. *SPIE's 1995 Symposium on OE/Aerospace Sensing and Dual Use Photonics*, International Society for Optics and Photonics, 305-311.
- [13] Gupta, N., Dahmani, R. and Choy, S. (2002) Acousto-Optic Tunable Filter Based Visible- to Near-Infrared Spectropolarimetric Imager. *Optical Engineering*, **41**, 1033-1038. <https://doi.org/10.1117/1.1467936>
- [14] Calpe-Maravilla, J., *et al.* (2004) 400- to 1000-nm Imaging Spectrometer Based on Acousto-Optic Tunable Filters. *Journal of Electronic Imaging*, **15**, 023001.
- [15] Glenar, D.A., *et al.* (1994) Acousto-Optic Imaging Spectropolarimetry for Remote Sensing. *Applied Optics*, **33**, 7412-7424. <https://doi.org/10.1364/AO.33.007412>
- [16] Suhre, D.R. and Theodore, J.G. (1996) White-Light Imaging by Use of a Multiple Passband Acousto-Optic Tunable Filter. *Applied Optics*, **35**, 4494-4501.
- [17] Ryu, S.Y., You, J.-W., Kwak, Y. and Kim, S. (2008) Design of a Prism to Compensate the Angular Shift Error of the Acousto-Optic Tunable Filter. *Optics Express*, **16**, 17138-17147.
- [18] 常凌颖. 声光可调谐滤波器(AOTF)消色散设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(11): 2895-2899.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5450，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[oe@hanspub.org](mailto:oe@hanspub.org)