

双透射峰钠原子滤光器在太阳速度场观测中的应用

邹照伟¹ 程学武^{2*} 杨 勇² 龚 威¹

¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079
² 中国科学院武汉物理与数学研究所波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071

摘要 法拉第反常色散原子滤光器作为一种精密光谱仪器, 具有光谱分辨力高、光谱稳定性好等优点。探讨了利用双透射峰钠原子滤光器进行高分辨力太阳多普勒观测的方法, 在此基础上开发了原子滤光器透射谱型理论模拟软件, 研制出双透射峰钠原子滤光器样机并对其进行了透射谱型测试。测试结果表明, 理论模拟的透射谱型与实验测试结果符合良好, 在双峰间距、透射带宽等参数方面基本满足太阳多普勒观测的要求, 为太阳观测提供另一种有效手段。

关键词 遥感; 日震学; 太阳速度场观测; 多普勒效应; 原子滤光器; 双峰透射

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0523002

Application of Dual-Peak-Transmission Sodium FADOF in Solar Velocity Field Observation

Zou Zhaowei¹ Cheng Xuewu² Yang Yong² Gong Wei¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Survey, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

² Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

Abstract Faraday anomalous dispersion optical filter (FADOF) is a precision spectrometer with high spectral resolution and spectral stability. This article analyzes the method using dual-peak-transmission FADOF for solar Doppler observation, which develops FADOF transmission spectrum calculating software, and carries out the prototype experiment of sodium atoms FADOF with bimodal type transmission spectrum. Experiment shows good agreement between experimental results and theoretical ones, and the parameters meet the requirement of solar Doppler observation.

Key words remote sensing; helioseismology; solar velocity field observation; Doppler; Faraday anomalous dispersion optical filter; dual-peak transmission

OCIS codes 230.2240; 020.7490; 350.1260

1 引 言

20 世纪 60 年代初 Leighton 等^[1]发现太阳表面任何一点都存在周期大约为 5 min 的上下振动现象, 其大气平均运动速度为 0.5~1.0 km/s, 称之为太阳 5 min 振动。之后 Ulrich 等^[2,3]对太阳大气振

动现象进行了理论分析与建模。由此带动了太阳观测和研究的迅速发展^[4], 形成了太阳物理中一个新分支——日震学。日震学通过观测和研究太阳振动特征, 来推测太阳内部结构, 反演太阳的化学组成、物态方程以及对流层厚度, 有利于深入了解太阳剧

收稿日期: 2011-10-19; **收到修改稿日期**: 2011-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(10978003)资助课题。

作者简介: 邹照伟(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事基于原子滤光的太阳成像观测方面的研究。

E-mail: zouzhaowei@whu.edu.cn

导师简介: 龚 威(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学及激光遥感等方面的研究。

E-mail: weigong@lmars.whu.edu.cn

* **通联系人**。E-mail: lidar@wipm.ac.cn

烈活动的发生、发展规律。

多普勒太阳速度场观测是日震学研究的基础,通过长期多普勒观测可识别太阳表面大气振动特征进而建立详细的太阳内部形态与动态模型。传统的高分辨率光学色散器件,如双折射滤光器常被用于多普勒太阳观测。双折射滤光器由诸多双折射晶体构成,利用偏振光干涉作用进行波长选择,利用多个晶体的联用以达到极窄带透射的目的^[5]。因此,要求晶体的一致性和稳定性非常高,这导致了双折射滤光器的系统复杂、造价昂贵。

原子滤光器(FADOF)通过光激发原子能级跃迁实现超窄带滤光能力。由于原子跃迁频率只与原子固有的特性相关,因此原子滤光器具有滤光中心频率极稳定、滤光带宽极窄等优点,特别适用于特定波长的多普勒频率鉴别,如太阳大气速度场观测、大气风场测量等。此外,原子滤光器还有结构简单、体积小、重量轻以及使用维护方便等特点,不仅适于地基观测,也可用于星载观测等。为高光谱分辨率下的速度场观测提供另外一种较好的观测手段^[6~8]。

本文分析了利用原子滤光器进行太阳多普勒观测的原理、方法,在此基础上研制了双峰透射型钠原子滤光器样机,并对其进行了透射谱型的测试。

2 主要研究内容与结果

2.1 基于原子滤光的太阳多普勒观测原理

对于物质运动速度的测量,主要是基于多普勒频率鉴别原理,即通过探测太阳大气中原子特征吸收谱线的多普勒频移量,通过反演处理即可获得该物质视向方向的运动速度,从而推测出太阳表面大气相应大气层段的物质运动速度。

2.1.1 双透射峰钠原子滤光器在太阳多普勒观测中的应用

多普勒太阳速度场测量通过观测太阳吸收线光谱谱线多普勒频移来获得平行于视向的太阳原子运动速度。如图1所示,双峰钠原子滤光器中心波长锁定588.995 nm,对应钠D2线;左、右双峰透射谱关于中心波长对称,分别得到红翼支与蓝翼支光强度。

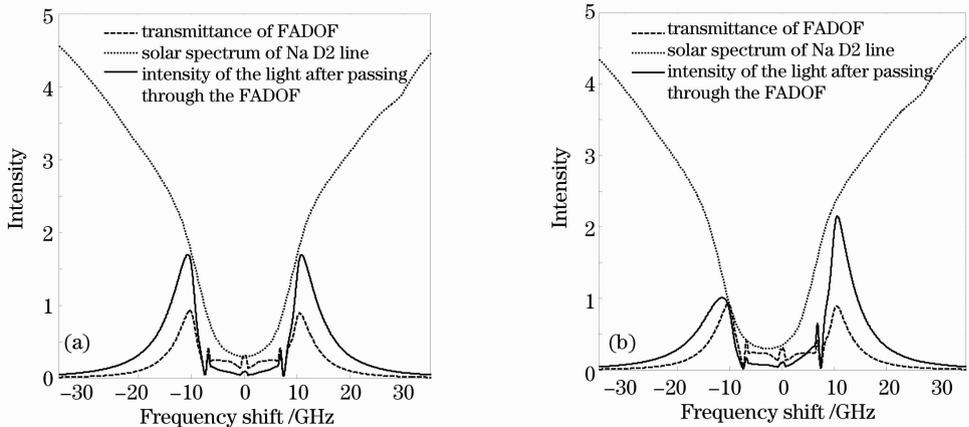


图1 基于多普勒技术的太阳大气运动速度测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of Doppler measurement of solar atmosphere velocity

假定太阳大气相对原子滤光器静止,此时红翼透射光强 I_r 与蓝翼透射光强 I_b 相等,如图1(a)所示;当太阳大气与原子滤光器有相对运动,发生频率红移导致 I_r 减小 I_b 增大^[9,10],如图1(b)所示。其中,三条曲线按图例顺序依次为理论模拟的双透射峰钠原子滤光器透射谱型,太阳大气中钠D2线附近的吸收光谱线以及通过双透射峰钠原子滤光器后红翼支与蓝翼支的光强度,其左侧为红翼支光强 I_r ,右侧为蓝翼支光强 I_b 。太阳光谱数据来自巴黎天文台,双峰钠原子滤光器数据来自原子滤光器理论模拟软件^[11]公式可表示为^[12]

$$v = k \frac{I_b - I_r}{I_b + I_r} + v_0, \quad (1)$$

式中 I_r 与 I_b 分别为红翼支、蓝翼支光强度,通过各自探测器上接收光子数确定; k 为校准常数,一般取经验值 $k \approx 8500$ m/s; v_0 为系统速度,是地球自转、日地相对运动以及太阳引力场红移等因素导致的系统速度偏差,可通过观测得到; v 即为通过公式求得的视向速度^[13]。

红翼支与蓝翼支两者强度差异代表太阳大气原子吸收谱线相对原子滤光器原子透射谱线多普勒频移。对红、蓝翼强度像中对应像素按(1)式进行处理,可得图2(a)所示多普勒速度像。

通过日面坐标系解算,得到原始多普勒图像中每个像素所对应点的日面坐标;然后利用太阳较差自转公式进行速度校正,得到太阳原子运动图像。太阳较差自转公式为^[12]

$$\omega = A + B\sin^2\varphi + C\sin^4\varphi, \quad (2)$$

式中 ω 是以 $(^\circ)/d$ 为单位的角速度, φ 为太阳对应点纬度, A 、 B 、 C 为测量得到的常数,通常取值 $A = 14.713^\circ/d$, $B = -2.396^\circ/d$, $C = -1.787^\circ/d$ 。利用(2)式计算得到太阳表面不同位置的自转角速度,并与相应位置处原始多普勒速度进行矢量计算,进而扣除多普勒图像中太阳较差自转影响^[12]。可得图2(b)中校正后多普勒速度图像即太阳大气原子运动速度像。

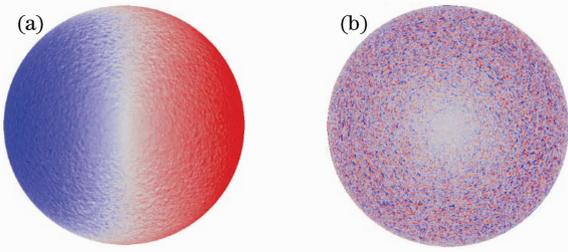


图2 多普勒速度图像

Fig. 2 Doppler velocity images

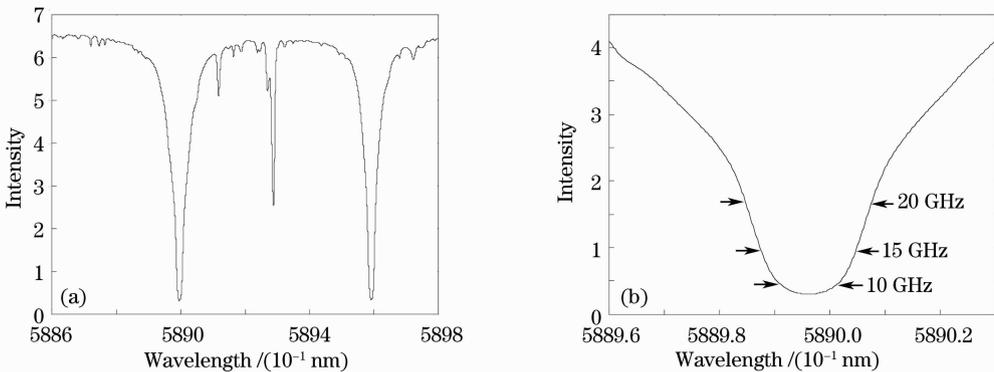


图3 太阳光谱曲线

Fig. 3 Curve of the solar spectrum

原子滤光器双透射峰对应位置处太阳光谱曲线斜率越大则多普勒测量信噪比越高,对应测量精度也越高,对钠D2线光谱曲线求导得图4。其中双峰间距10、15、20 GHz处对应斜率分别为:1.35、3.4和3.8。根据曲线趋势,若双峰间距小于10 GHz,由于曲线斜率较小,单位多普勒频移所引起的强度值变化减小,导致系统对多普勒频移的敏感度降低,使得测量精度不高。

图2中无视向运动的区域呈现为白色,远离观测者运动的区域为红色,接近观测者运动的区域为蓝色,颜色深浅程度与视向速度的大小成正比。图像数据来自SOHO/MDI^[14]。

2.1.2 双透射峰钠原子滤光器双峰间距的确定

传统的原子滤光器作为高效滤光器件,具有中心单峰透射的谱型特征,其主要应用领域为激光雷达大气探测、激光通信中的背景噪声抑制。而太阳多普勒速度场观测则需要原子滤光器具有多普勒频移鉴别能力,因此需要采用双峰透射谱型的原子滤光器。钠D2线附近的太阳吸收光谱曲线特征则要求原子滤光器具有大间距、两边透射的双峰谱型且其双峰间距、峰值透射率和透射带宽等参数必须满足多普勒观测的要求。

太阳光谱中钠原子吸收谱线如图3(a)所示,两个较大的吸收峰分别对应钠原子的D1线589.594 nm和D2线588.995 nm。图3(b)为放大的钠D2线光谱曲线,其上标注了不同双峰间距对应太阳光谱曲线的位置。双透射峰钠原子滤光器中心波长锁定为588.995 nm,因为太阳多普勒信号为关于中心波长对称位置透过光强的差分值,要求原子滤光器谱型特征为极窄、极稳的双峰透射谱型,为提高测量精度,双峰之间还应有合适的间距^[15,16]。

2.2 双透射峰钠原子滤光器谱型理论计算与样机测试

研制具有大间距、两边透射谱型的原子滤光器有很大挑战性。因此,必须对原子滤光器的透射谱型进行重新计算与理论模拟,找到适合多普勒观测的透射谱型,并用其理论参数来指导滤光器实验样机制作;同时将样机测试结果与理论模拟结果进行比较,不断优化与完善理论。最终得到适用于太阳多普勒观测的双透射峰钠原子滤光器。

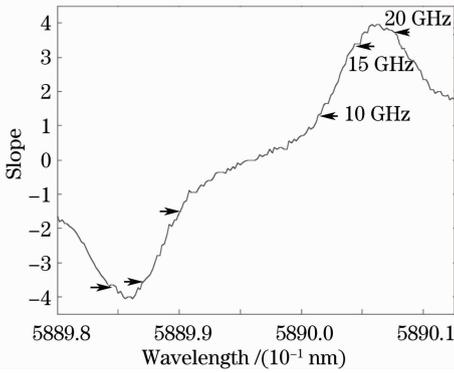


图 4 钠 D2 线光谱曲线斜率图

Fig. 4 Slope curve of the solar spectrum near sodium D2 line

2.2.1 原子滤光器工作原理

原子滤光器工作原理基于法拉第偏振旋光理论。如图 5 所示,光从左边入射,经起偏器变成水平

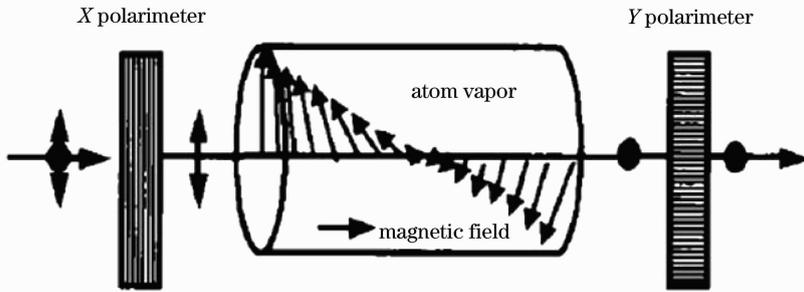


图 5 原子滤光器的工作过程

Fig. 5 Work principle of FADOF

2.2.2 双透射峰钠原子滤光器透射谱型的理论计算

双峰钠原子滤光器透射谱型计算过程:首先计算出给定纵向磁场强度下,有超精细结构存在时,滤光工作跃迁上下能级结构的变化,并确定其中所有塞曼子能级间可能的电偶极跃迁的偏振状态、谱线中心频率和谱线强度。然后按照共振法拉第效应的理论框架和法拉第反常色散滤光器的透射谱公式即可得到透射谱型。

假设从左边有一振幅为 E_i 的线偏振光沿轴向磁场 B 方向在 $z=0$ 处开始进入钠原子泡,那么,在距离 z 处,电场矢量方程为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{E}_0 [\hat{e}_+ \exp(ik_+ z) + \hat{e}_- \exp(ik_- z)] \times \exp(-i\omega t), \quad (3)$$

式中复波矢 $K_{\pm} = \frac{\omega}{c} \hat{n}_{\pm} = \frac{\omega}{c} n_{\pm} + \frac{i}{2} a_{\pm} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\pm} + \frac{i}{2} a_{\pm}$, n_{\pm} 是 \hat{n}_{\pm} 的实部, a_{\pm} 是简正模的吸收系数。

由于法拉第磁旋光效应,线偏振光经过距离

线偏振光,轴向磁场使原子蒸汽泡中工作物质发生赛曼分裂^[5]。在此情况下,偏振光经过原子蒸汽泡会产生法拉第旋光,且旋光量同波长密切相关。在合适的原子滤光器参数条件下,只有与泡中碱金属原子产生共振且绕轴向磁场旋转 $(n\pi + \pi/2)$, $n=0, 1, 2, \dots$ 的波长才能透过检偏器,其他波长则被检偏器阻挡,无法透过原子滤光器^[6,17]。

原子滤光器由原子泡、恒温炉、轴向磁场、偏光元件等组成。中心为原子泡,泡中充入一定量碱金属,泡体置于由电热丝组成的恒温炉中,通过温控器精确控制原子泡温度,使泡中饱和蒸汽压满足原子滤光器的要求,整个原子泡还必须置于均匀的轴向磁场中,且磁场的大小在一定范围内可调。原子泡两端放置严格正交的两偏光元件(分别起到起偏和检偏的作用),以获得最佳带外抑制能力^[6]。

$z=L$ 后,偏振面旋转为

$$\mathbf{E}_t = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{E}_0 \hat{y} [\exp(ik_+ L) - \exp(ik_- L)] \exp(-i\omega t). \quad (4)$$

因此,法拉第透射率 T 可表示为

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{|\mathbf{E}_t|^2}{|\mathbf{E}_0|^2} = \frac{1}{4} \exp(-\bar{a}L) [\cosh(\Delta aL) - \cos(2\rho L)], \quad (5)$$

式中 \bar{a} , Δa 和 ρ 分别表示平均吸收系数、圆二向色性和磁旋本领。

根据以上理论,编写了原子滤光器透射谱型的模拟计算软件,其软件界面如图 6 所示。软件界面右边部分可以手动设置部分参数,如碱金属原子种类、磁场、温度、扫描范围、扫描步长以及原子泡长度等。点击右边部分的“开始计算”,即可获得软件界面中间部分的图形,即为原子滤光器的理论透射谱型。其中,横坐标为频率,纵坐标为透射率。

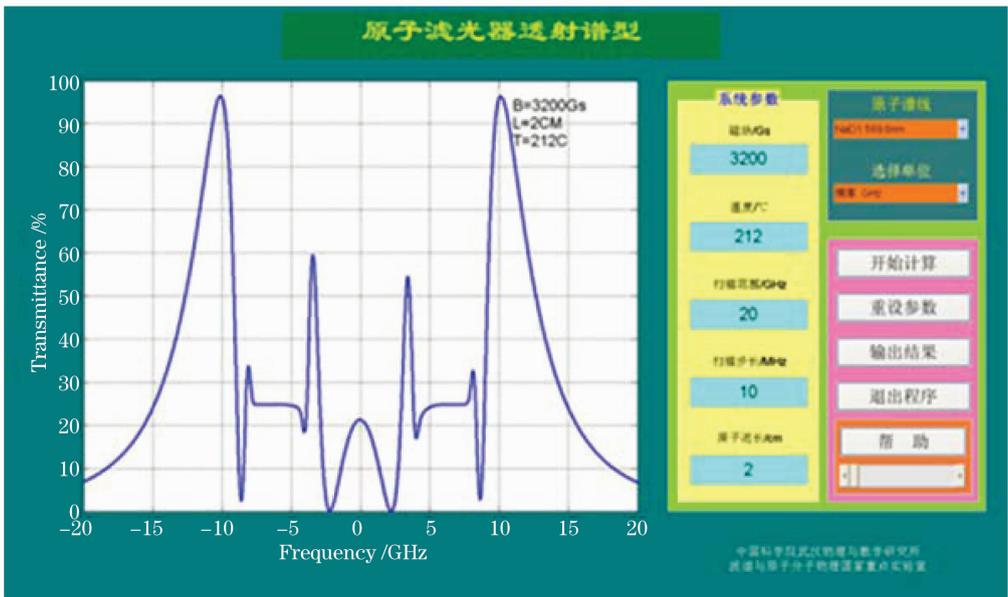


图 6 原子滤光器谱型理论模拟软件

Fig. 6 Software of FADOF transmission spectrum calculating

2.2.3 双透射峰钠原子滤光器样机测试

根据上述原子滤光器理论计算结果和所需参数,设计并研制出双透射峰的钠原子滤光器原理样机,如图 7 所示。

为了测试此原子滤光器的透射谱型,采用了图 8 所示的原理对其进行了测试。激光器为单模连续光激光器,线宽小于 1 MHz,中心波长为 588.995 nm,扫描范围为 40 GHz;计算机控制激光器连续线性进行波长扫描,输出激光分 3 路,一路经原子滤光器后送入探测器;另一路经波长定标后送入探测器;第三路为功率监测,三路信号都送入示波器采集与显示,并将其波形保存到计算机中进行分析和处理^[18~20]。

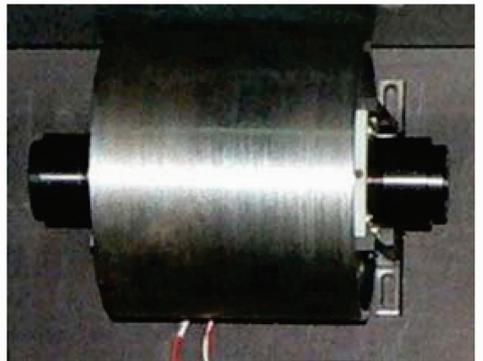


图 7 双透射峰钠原子滤光器样机

Fig. 7 Prototype of sodium atoms FADOF with dual-peak transmission

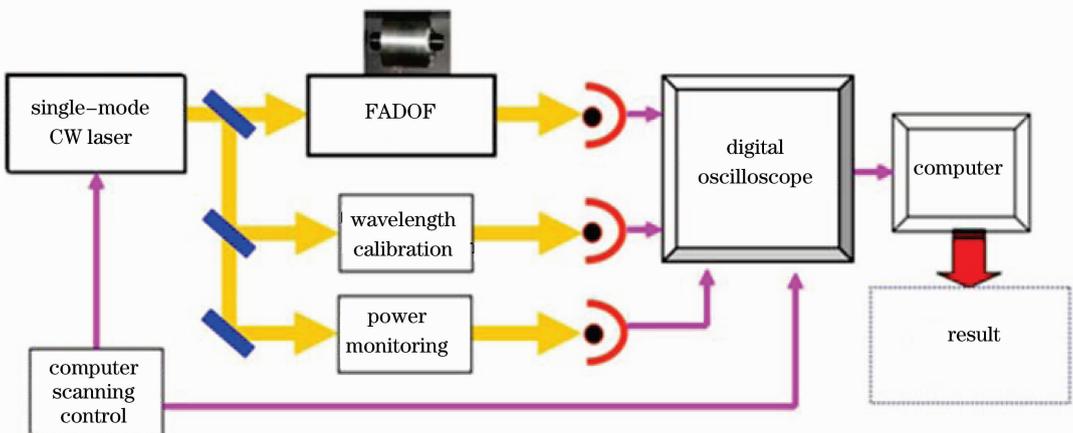


图 8 双透射峰钠原子滤光器测试原理图

Fig. 8 Schematic diagram of testing sodium atoms FADOF with bimodal type transmission

原子滤光器的测试谱型与理论计算谱型对比如图 9 所示。虚线表示理论计算谱型,实线为实验测得谱型。获得了双峰间距约 11 GHz 的透射谱型,其透射带宽约为 2.2 GHz,峰值透射率高于 90%。与相应条件下原子滤光器透射谱型模拟软件计算结果符合良好,且其参数初步满足多普勒太阳速度场测量要求。

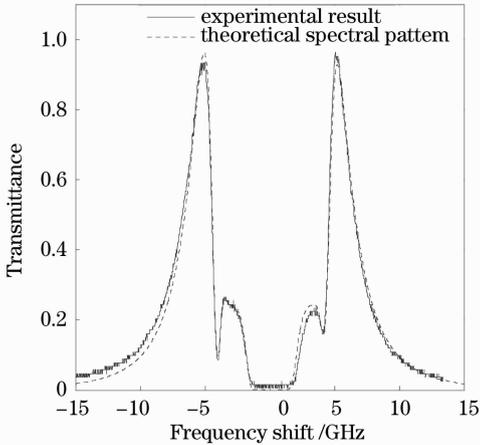


图 9 测试谱型与理论透射谱型对比

Fig. 9 Comparison of experimental transmission spectrum and theoretical one

此外,还正致力于研制出双峰间距约 18 GHz,峰值透射率高的双峰原子滤光器,为提高太阳观测精度打下良好基础。

3 结 论

原子滤光器作为一种精密光谱仪器,具有透射带宽极窄,透射峰自稳定无漂移的优点。将其应用于太阳多普勒成像观测,可克服现有太阳光学成像系统中心带宽易漂移、维护困难等缺点,在极地无人维护、无人值守条件下以及星载应用条件下具有突出优势。本文通过系统研究原子滤光器透射理论,编写了原子滤光器透射谱型模拟计算软件,利用该软件模拟不同复杂参数条件下原子滤光器的透射谱型,为原子滤光器的研制提供理论依据和改进方向。在理论计算的基础上制作并测试了双透射峰钠原子滤光器样机,其实验测试值与软件计算值符合良好,且双峰间距、透射带宽等参数均可满足太阳多普勒成像观测的要求。该双峰钠原子滤光器的研制成功,将为研制基于原子滤光的太阳多普勒成像观测系统打下良好基础。

参 考 文 献

1 R. Leighton, R. Noyes, G. Simon. Velocity fields in the solar

- atmosphere[J]. *Astrophys. J.*, 1962, **135**: 474~499
- 2 R. K. Ulrich. The five-minute oscillations on the solar surface [J]. *Astrophys. J.*, 1970, **162**: 993~1001
- 3 J. W. Leibacher, R. F. Stein. A new description of the solar five-minute oscillation[J]. *Astrophys. Lett.*, 1971, **7**: 191~192
- 4 F. L. Deubner. Observations of low wavenumber nonradial eigenmodes of the sun[J]. *Astron. & Astrophys.*, 1975, **44**(2): 371~375
- 5 Sun Yingzi, Wang Dongguang, Zhang Hongqi *et al.*. Method and precision analysis for measuring retardation of infrared waveplate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 685~688
- 孙英姿, 王东光, 张洪起等. 红外波片相位延迟的测试方法及精度分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 685~688
- 6 Cheng Xuewu, Li Faquan, Lin Zhaoxiang *et al.*. Properties and applications of Faraday anomalous dispersion optical filter [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2003, **1**(1): 41~43
- 程学武, 李发泉, 林兆祥等. 法拉第原子滤光器的特性及应用 [J]. *光学与光电技术*, 2003, **1**(1): 41~43
- 7 A. Cacciani, M. Fofi. The magneto-optical filter [J]. *Solar Phys.*, 1978, **59**(1): 179~189
- 8 Z. L. Hu, X. P. Sun, Y. P. Liu *et al.*. Temperature properties of Na dispersive Faraday optical filter at D1 and D2 line [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(4-6): 289~293
- 9 C. Denker, J. Ma, J. Wang *et al.*. An imaging magnetograph for high resolution solar observations in the near-infrared [J]. *Astronomische Nachrichten*, 2003, **324**(4): 332~333
- 10 A. Cacciani, S. M. Jefferies, W. Finsterle *et al.*. Mapping the sound speed structure of the sun's atmosphere [J]. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement*, 2003, **2**: 190~194
- 11 Yang Yong, Cheng Xuewu, Li Faquan *et al.*. Spectral Pattern Calculation Software for Faraday Anomalous Dispersion Optical Filter [P]. China: 2010SR036694, 2010
- 杨勇, 程学武, 李发泉等. 原子滤光器透射谱型计算软件 [P]. 中国: 2010SR036694, 2010
- 12 Lin Yuanzhang. Introduction to Solar Physics [M]. Beijing: Science Press, 2000. 10~12
- 林元章. 太阳物理导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 10~12
- 13 A. Cacciani, S. Tomczyk, K. Strelan *et al.*. An instrument to observe low-degree solar oscillations [J]. *Solar Phys.*, 1995, **159**(1): 1~21
- 14 P. H. Scherrer, R. S. Bogart, R. I. Bush *et al.*. The solar oscillations investigation-michelson doppler imager [J]. *Solar Phys.*, 1995, **162**(1): 129~188
- 15 W. Finsterle, S. M. Jefferies, A. Cacciani *et al.*. Seismology of the solar atmosphere [J]. *Solar Phys.*, 2004, **220**(2): 317~331
- 16 A. Cacciani, R. Briguglio, F. Massa *et al.*. Precise measurement of the solar gravitational red shift [J]. *Celestial Mech. & Dynam. Astron.*, 2006, **95**(1-4): 425~437
- 17 H. L. Chen, C. Y. She, P. Searcy *et al.*. Sodium-vapor dispersive Faraday filter [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(12): 1019~1021
- 18 Gong Shunsheng, Cheng Xuewu, Li Faquan *et al.*. Applications of atomic spectra filtering and atomic frequency discrimination in optoelectronic system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 042301
- 龚顺生, 程学武, 李发泉等. 原子滤光及鉴频技术在光电探测中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 042301
- 19 Liu Binbin, Li Liyan, Yang Jun *et al.*. Optical circuit integrated method of single-frequency polarization laser interferometer for nanometer measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2582~2587
- 刘彬彬, 李立艳, 杨军等. 用于纳米测量的单频偏振激光干涉仪的光路集成方法 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2582~2587
- 20 Li Faquan, Wang Yuping, Cheng Xuewu *et al.*. Faraday anomalous dispersion optical filter atomic frequency-stabilized semiconductor laser through optical feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1317~1320
- 李发泉, 王玉平, 程学武等. 半导体激光器的原子法拉第反常色散光学滤波器光反馈稳频 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1317~1320

栏目编辑: 何卓铭