

# 钾原子滤光器在太阳高分辨率观测中的应用

张 俊<sup>1</sup> 杨 勇<sup>2,3</sup> 程学武<sup>2</sup> 杨尚斌<sup>4</sup> 龚 威<sup>1</sup>

<sup>1</sup>武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

<sup>4</sup>中国科学院国家天文台, 北京 100012

**摘要** 太阳高分辨率速度场观测系统可用于探测日震的活动信息,对太阳内部结构的研究具有重要意义。探讨了双峰钾原子滤光器在太阳光球层速度场观测中的应用方法,即利用法拉第反常色散原子滤光器(FADOF)的高光谱分辨率和光谱稳定性等优点,采用双峰钾原子滤光器分辨来自太阳光球层钾线(769.898 nm)光谱的多普勒频移,并提出用 F-P 标准具对透过原子滤光器的双峰信号进行光学选支,从而获得太阳光球层多普勒速度场图像。研制出双透射峰钾原子滤光器原理样机,经测试其谱型与理论谱型符合良好,满足太阳速度场高分辨率观测的需要。将此技术方案扩展到太阳的其他谱线,可实现对太阳大气多层次速度场的同时观测。

**关键词** 大气光学;原子滤光器;多普勒测速;太阳速度场;日震

中图分类号 O433.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0808003

## Application of K-FADOF in Solar High-Resolution Observation

Zhang Jun<sup>1</sup> Yang Yong<sup>2,3</sup> Cheng Xuewu<sup>2</sup> Yang Shangbin<sup>4</sup> Gong Wei<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

<sup>3</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>4</sup> National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract** The observation system of solar velocity field can be used to detect the activities of helioseismology, which is important for the study of the solar internal structure. The method of using K-FADOF to observe the velocity field of photosphere is studied, which takes advantage of the Faraday anomalous dispersion optical filter (FADOF), such as high spectral resolution and spectral stability. This method utilizes K-FADOF to distinguish the Doppler shift of potassium line (769.898 nm) which comes from the Sun's Photosphere, uses the F-P etalon to select the single-peak signal transmitted through the K-FADOF, and receives photosphere's Dopplergram. The prototype of K-FADOF is developed and tested. The experiments show that its experimental transmission spectrum pattern almost coincides with its theoretical pattern. It indicates that the K-FADOF meets the requirements of observing the solar velocity field of high spectral resolution. Further, it can achieve to observe simultaneously multi-layer velocity field of the solar atmosphere with this technology extended to the solar other lines.

**Key words** atmospheric optics; Faraday anomalous dispersion optical filter; Doppler velocimetry; solar velocity field; helioseismology

**OCIS codes** 120.2440; 110.2970; 230.2240; 230.3810

收稿日期: 2012-03-05; 收到修改稿日期: 2012-04-23

基金项目: 国家 973 计划(2009CB723905)和国家自然科学基金(10978003,41101334)资助课题。

作者简介: 张 俊(1984—),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: junzhang@whu.edu.cn

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

E-mail: weigong@lmars.whu.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

Leighton 等<sup>[1]</sup>首先发现太阳大气中广泛存在一种周期约 5 min 的震动,分析认为这种震动是由太阳大气中的声波和重力波引起的太阳整体震动<sup>[2]</sup>,称之为“日震”。通过对日震的观测和研究,有利于推知太阳内部物理参数,反演太阳化学组成、物态方程和预报日地空间环境等<sup>[3]</sup>。目前国内对日震的观测,基本上是利用传统的高光谱分辨率光学色散器件来实现,如双折射滤光器<sup>[4]</sup>。然而这些光学色散器件为追求高光谱分辨率和光谱稳定性,需要多个器件复合联用和温控隔离,造成整个系统复杂、维护困难和成本较高等。

原子滤光器(FADOF)是一种全新的高光谱分辨率滤光器件<sup>[5,6]</sup>,它通过光激发原子能级跃迁实现光波长的分辨力,在满足透射带宽极窄的同时保证中心透射波长极其稳定,即使在极地无人维护、无人值守的条件下,以及在太空星载环境下也能稳定运作,从而使其特别适合于太阳高光谱分辨率观测。国外自 20 世纪 70 年代,即开展了基于原子滤光的太阳高光谱分辨率观测的探索性研究<sup>[7]</sup>;伯明翰日震网 BiSON,于 20 世纪 90 年代采用钾蒸气共振散射原子泡作为滤光元件来观测太阳震荡<sup>[8]</sup>,然而其只能进行强度观测不能成像;目前仅意大利和美国联合的研制团队成功地实现原子滤光太阳高分辨率成像观测<sup>[9]</sup>,其正在开展的 MOTH 计划,将基于 Na(589 nm)、K(770 nm)原子滤光和偏振选支的速度成像仪安装在南极<sup>[10]</sup>,进行数百小时不间断太阳成像观测,并拟将增加磁场观测,但偏振选支使系统偏于复杂,且对系统的稳定性要求较高。在我国,已有单峰窄带原子滤光器用于激光雷达探测的报道<sup>[11~13]</sup>,但目前尚无将原子滤光技术应用于太阳高光谱分辨率观测的报道。

本文探讨双透射峰钾原子滤光器应用于太阳大气速度场高分辨成像观测的方法,通过测量太阳光球层钾线(769.898 nm)光谱的多普勒频移量得到太阳光球层速度场,对研究分布于该层的太阳黑子、光斑和米粒组织等结构体具有重要意义。提出的应用系统结构方案,采用 F-P 标准具对透过原子滤光器的双峰信号进行光学选支,区别于国际上采用原子泡改变双峰信号偏振状态的偏振选支方法<sup>[8]</sup>,将此技术方案扩展到太阳的其他谱线,如太阳色球层的 Na 线,实现对太阳大气多层次速度场的同时观测,为我国太阳高分辨率观测提供一种新的观测手段。

# 2 双峰钾原子滤光器在太阳速度场观测中的应用

原子滤光器依靠光激发原子的能级跃迁实现对光波长的分辨力,其应用于太阳速度场观测具有两个优点<sup>[9,10]</sup>:1)“原子”高光谱分辨率。其透射宽度与原子的精细能级结构相关,容易做到 2~3 GHz 的超窄带透射,优于传统的高光谱分辨率光学滤光器件数倍;2)“原子”光谱稳定性。原子滤光器透射中心波长基于原子能级跃迁基准,只与该元素的跃迁频率相关,与其他外在影响因素无关,实现透射中心波长的自稳定。双峰钾原子滤光器应用于太阳速度场观测,能克服传统太阳高光谱分辨光学成像系统的透射中心波长易漂移、难维护等缺点;另外,钾原子滤光器<sup>[12,14]</sup>具有透射性好、视场角大、透射谱型可调节、具有成像能力等优点,与传统的高光谱分辨率光学滤光器件相比具有结构简单、重量轻、体积小、使用维护方便等优点。

## 2.1 原子滤光器的工作原理

双峰原子滤光器结构如图 1 所示。主要由起偏器 P1、原子泡 Cell 和检偏器 P2 组成,原子泡 Cell 位于轴向磁场  $B$  和恒温热场  $K$  中,其两端分别放置偏振片 P1 和 P2,且起偏器 P1 与检偏器 P2 相互正交。其工作原理为自然光从左边入射,经起偏器 P1 成为线偏振光;当线偏振光通过位于轴向磁场  $B$  中的原子蒸气泡时,在磁场作用下将产生法拉第旋光(其旋光量与光波长有关);同时与钾原子吸收波长相同频率的入射光因共振而被吸收抑制。在法拉第旋光和共振吸收的作用下,只有共振中心两边缘波段,不仅有旋光量,且尚未完全吸收,产生两个左右旋圆偏振透射峰,其中旋光量为  $\pi/2$  奇数倍的波段能够通过与起偏器 P1 正交的检偏器 P2,最终生成线偏振双峰透射<sup>[13,15]</sup>。

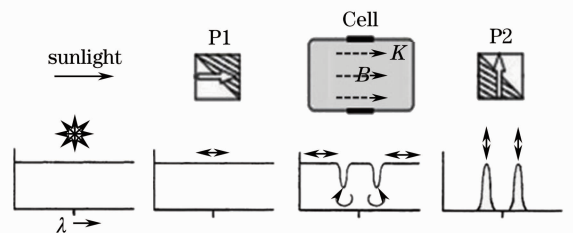


图 1 原子滤光器结构及工作原理

Fig. 1 Structure and principle of FADOF

## 2.2 基于原子滤光的太阳速度场观测原理

太阳大气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某些原

子吸收谱线(如色球层的钠线和光球层的钾线)的多普勒频移量,反演处理获得该物质视向方向的运动速度,进而推测太阳表面大气相应层段物质的运动速度。

图 2 为基于原子滤光的太阳速度场观测原理。在图 2(a)和图 2(b)中,横坐标表示频率,其零点位置为钾原子谱线无多普勒频移的中心频率  $\nu_0$ ,左侧的纵坐标表示原子滤光器透射谱的透射率,右侧的纵坐标表示原子吸收谱线的归一化强度及红翼支和蓝翼支透射信号的强度;点划线表示太阳大气中原子(如钾原子)的吸收谱线;实线表示模拟的相应原

子滤光器透射谱,其中心频率稳定在该原子的吸收中心频率  $\nu_0$  上;中间的虚线表示太阳光通过原子滤光器后得到的透射峰,其中左边的虚线为红翼支、右边的点虚线为蓝翼支。图 2(a)为假定太阳大气中 原子与原子滤光器相对静止的情形,此时蓝翼支的透射光强  $I_b$  与红翼支的透射光强  $I_r$  之比恒定;图 2(b)则显示太阳大气中 原子与原子滤光器有相对运动的情形(蓝移),此时,由于多普勒频移, $I_b$  与  $I_r$  之比减小;反之若太阳光谱红移, $I_b$  与  $I_r$  的比值将增大,即此比值对应于多普勒频移量。

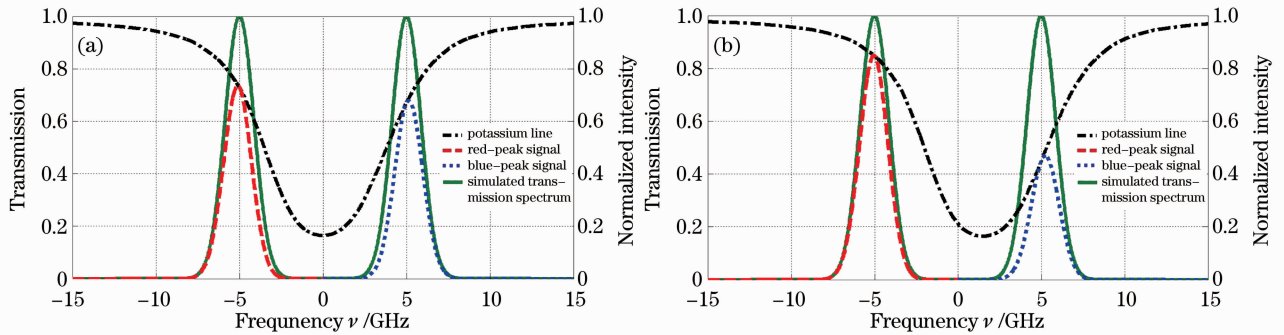


图 2 基于原子滤光的太阳速度场观测原理。(a)钾线无多普勒频移;(b)钾线多普勒蓝移

Fig. 2 Observation principle of solar velocity field based on FADOF. (a) No Doppler shift of potassium line; (b) Doppler blue-shift of potassium line

如果每次只让原子滤光器的双峰之一透射,则可获得太阳红翼支和蓝翼支单独的强度图像,图 3(a)和图 3(b)分别为模拟的基于原子滤光的红翼支和蓝翼支图像,两图中各像素强度差异代表太阳大气中 原子吸收谱线相对于原子滤光器透射中心频率的多普勒频移量,即太阳中 原子与原子滤光器

的相对运动。因此,对两幅图像进行差分处理,可获得太阳中 原子的相对运动速度  $U \approx \frac{I_b - I_r}{I_b + I_r}$ ,如图 3(c)所示,即模拟的太阳自转多普勒速度场图像;再扣除太阳自转、地球自转和日地相对运动速度等信息,可获得太阳大气中物质的视向运动速度。

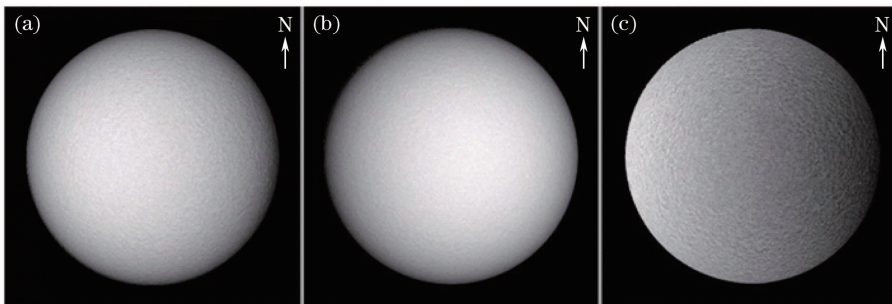


图 3 原子滤光太阳速度场观测模拟图像。(a)红翼支图像;(b)蓝翼支图像;(c)多普勒速度场

Fig. 3 Simulated images of solar velocity field based on FADOF. (a) Red-peak image; (b) blue-peak image; (c) Dopplergram

### 2.3 原子滤光太阳速度场观测系统结构方案

图 4 为原子滤光器在太阳速度场观测系统中的应用结构方案,此方案由三部分组成,依次为跟踪接收系统、滤光系统和成像控制系统。太阳光通过跟

踪系统被恒定地发射到接收光路,先经隔热元件进入由滤光片、原子滤光器和光谱选择器等组成的滤光系统,经由滤光片等粗滤光元件后进入由起偏器 P1、原子泡 Cell 和检偏器 P2 组成的原子滤光器,此

时入射光发生法拉第旋光和共振吸收并透射出具有极窄和极稳的双峰信号光。分束光学将双峰信号光均分为两部分,分别送入两路光谱选择器。光谱选择器采用由透射及抑制特性与原子滤光器匹配的 F-P 标准具光学选支器,通过驱动步进电机精密地

调整双峰信号光与标准具平面的入射角度,使双峰信号光的一支恰好通过 F-P 透射峰而另一支被抑制,最后分别由 CCD1 和 CCD2 捕获,实现红翼支和蓝翼支同时成像。

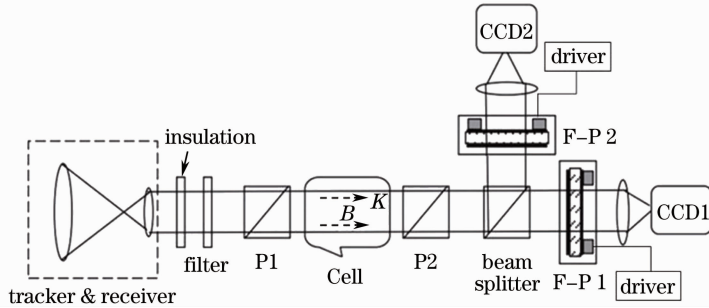


图 4 原子滤光太阳速度场观测系统结构方案

Fig. 4 Structural scheme of the observation system of solar velocity field based on FADOF

要实现稳定的 F-P 标准具选支,需要 F-P 与原子滤光器协调匹配,即 F-P 自由谱范围尽可能地大于原子滤光器的双峰间距,且透射带宽约 2 倍于原子滤光器的透射带宽。F-P 标准具光学选支原理如图 5 所示,其中横坐标表示频率,其零点位置为钾原子谱线无多普勒频移的中心频率  $\nu_0$ ,左侧的纵坐标表示 F-P 标准具的透射率,右侧的纵坐标表示透过原子滤光器的双峰信号强度和选支后透射峰信号的

强度;实线为透过原子滤光器的双峰信号,虚线为 F-P 标准具的透射谱,点划线为双峰信号光透过 F-P 标准具的透射峰信号。通过精密地调整双峰信号光与标准具平面的入射角度,标准具的透射谱发生移动。如图 5(a)所示,当移动到红翼支的中心频率时,红翼支能透射而蓝翼支被抑制,实现红翼支的选支;同理,如图 5(b)所示,当移动到蓝翼支的中心频率时,实现蓝翼支的选支。

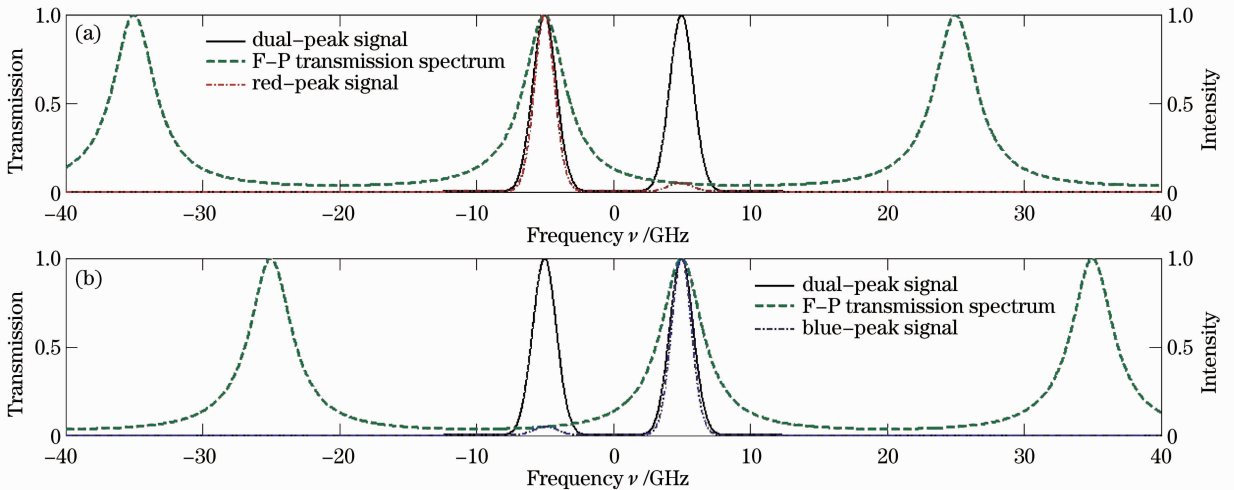


图 5 F-P 标准具光学选支原理

Fig. 5 Principle of optical filtering selected by F-P etalon

### 3 钾原子滤光器透射谱型参数的选择与样机测试

#### 3.1 透射谱型参数的选择

太阳吸收光谱钾线附近的曲线特征,尤其是曲率特征,限定了双峰钾原子滤光器的透射谱型,要求

其中心透射波长、双峰间距、透射带宽等谱型参数与钾线光谱相互匹配,从而使系统具有较高精度。图 6(a)为太阳光谱钾线附近谱线,其吸收峰波长在 769.898 nm 处,决定了钾原子滤光器透射谱型的中心波长应为 769.898 nm;又因钾吸收谱线的半峰全

宽(FWHM)(约 8.2 GHz)较钠吸收谱线(约 48.8 GHz)窄许多,决定了钾原子滤光器双峰间距较小。以太阳钾吸收谱线的吸收峰频率为中心,对钾吸收谱线求差分得其曲率如图 6(b)所示,在中心频率两侧约 3~6 GHz处的吸收谱线曲率变化剧烈,由此确定钾原子滤光器双峰间距的理想值在 6~12 GHz

之间。当钾原子滤光器双峰间距依次为 6~12 GHz 时,多普勒信号  $\frac{I_b - I_r}{I_b + I_r}$  随太阳大气物质速度的变化如图 7(a)所示,其中  $I_b$  与  $I_r$  根据钾线光谱与钾原子滤光器透射谱匹配的积分所得;再经差分计算得多普勒信号差分值随大气物质速度的变化,如图 7(b)所示。

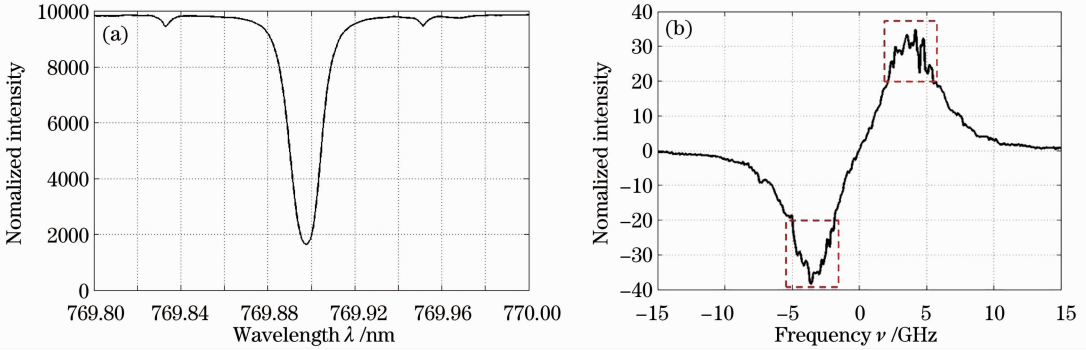


图 6 太阳钾线光谱特征。(a)钾线附近谱线;(b)钾线光谱曲率

Fig. 6 Spectral characteristics of solar potassium line. (a) Spectral line near potassium line; (b) potassium line spectral curvature

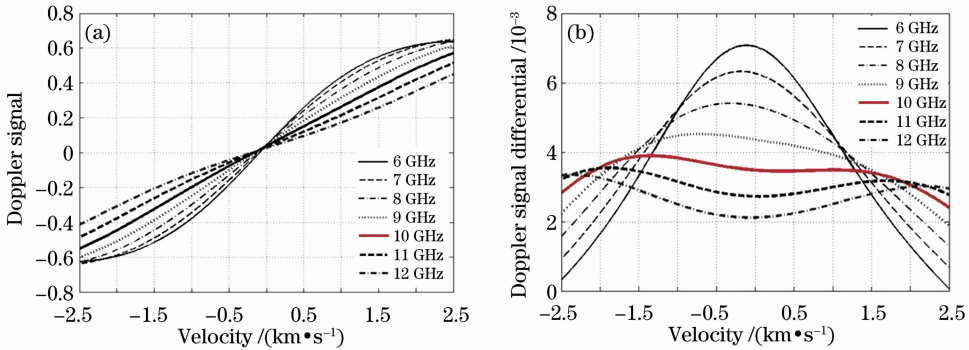


图 7 不同双峰间距下,多普勒信号的响应能力。(a)多普勒信号随大气物质速度的变化;(b)多普勒信号差分值随大气物质速度的变化

Fig. 7 Response of the Doppler signal under different bimodal intervals. (a) Doppler signal changes with the speed of atmospheric substances; (b) Doppler signal difference scores changes with the speed of atmospheric substances

已知太阳视向自转速率最大为 2 km/s、太阳大气运动的平均速率为 0.5~1.0 km/s<sup>[16]</sup>,实际数据处理时一般将太阳边缘的数据去掉。问题转化为双峰间距取何值时,多普勒信号差分值在速度 -2.5~2.5 km/s 范围内均较大。由图 7 可知,当双峰间距小于 8 GHz 时,较大速率对应的信号差分值偏小;当双峰间距大于 12 GHz 时,较小速率对应的信号差分值偏小;只有当双峰间距在 10 GHz 左右时,不同速率对应的信号差分值均较大。

另外,当双峰间距为 10 GHz 时,透射带宽依次为 1~6 GHz 对应的多普勒信号差分值随大气物质速度的变化如图 8 所示。由图 8 可得原子滤光器的透射带宽越窄,多普勒信号对太阳大气物质运动的

响应能力越强,但信号的强度却随之而降低,导致信

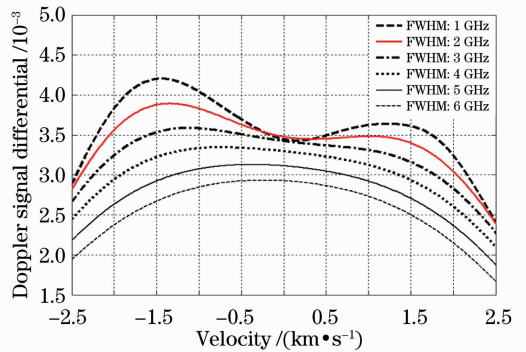


图 8 不同透射带宽下多普勒信号的响应能力  
Fig. 8 Response of the Doppler signal with different FWHM

号的信噪比降低,故用于太阳高分辨率观测的钾原子滤光器透射带宽在 2 GHz 左右较合适。

由图 8 可得用于太阳高分辨率观测的钾原子滤光器透射谱型的双峰间距(约 10 GHz)和透射带宽(约 2 GHz),其与 MOTH 仪器<sup>[10]</sup>中钾原子滤光器透射谱型的双峰间距(约 10.1 GHz)和透射带宽(约 1.3 GHz)是基本吻合的。

### 3.2 样机测试

根据上述理论模拟计算及参数需求,设计并研制出双透射峰钾原子滤光器原理样机,如图 9 所示。

采用如图 10 所示的方案测试此原子滤光器的透射谱型是否符合太阳速度场观测应用需求,单模环形染料激光器(Coherent 899-21 Ring laser)产生 770 nm 波长的激光(线宽小于 1 MHz、中心波长 769.898 nm、扫描范围 40 GHz);计算机控制激光器进行连续线性波长的激光输出,并将其波长信息

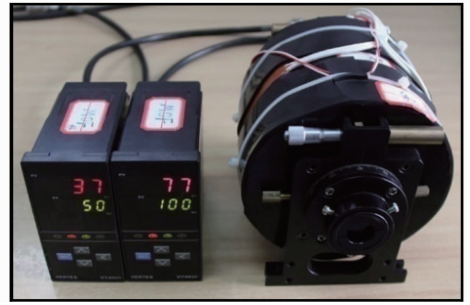


图 9 双透射峰钾原子滤光器原理样机  
Fig. 9 Prototype of K-FADOF with bimodal transmissive spectrum

反馈给示波器;输出激光经分光镜分成 3 路,第 1 路经钾原子滤光器后被送入探测器进行透射谱型测量;第 2 路经自由谱为 10.5 GHz 的 F-P 标准具后被送入探测器进行波长定标;第 3 路直接到探测器进行功率监测;三路探测信号最终由示波器进行显示与采集。

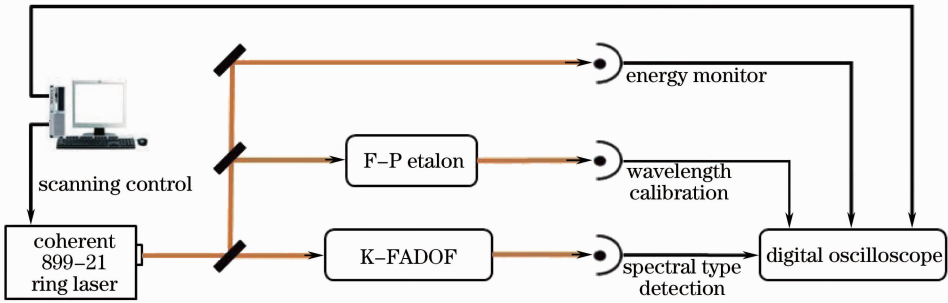


图 10 双峰钾原子滤光器透射谱型测试方案

Fig. 10 Schematic diagram of testing the transmission spectrum of K-FADOF

钾原子滤光器的理论模拟谱型与实验测试谱型对比如图 11 所示。其中虚线为理论模拟谱型,实线为实验测试谱型。测试谱型表明钾原子滤光器的双峰间距约 10.2 GHz,透射带宽约 1.8 GHz,与相应条件下钾原子滤光器的理论模拟谱型符合良好,满

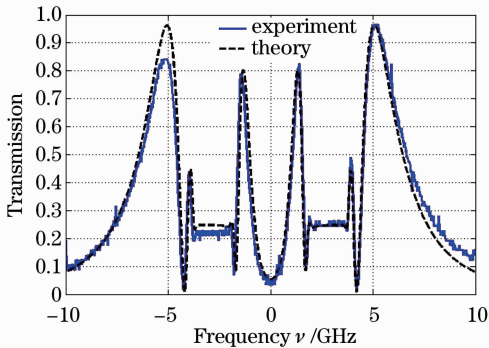


图 11 钾原子滤光器的理论模拟谱型与实验测试谱型对比

Fig. 11 Comparison of experimental results and theoretical results

足太阳速度场高分辨率观测需求。

## 4 结 论

提出一种将钾原子滤光器应用于太阳高分辨率成像观测的方法,用来测量太阳光球层速度场;探讨相关的理论基础,给出应用系统的结构方案,采用 F-P 标准具对双峰透射信号进行光学选支;研制出双透射峰钾原子滤光器原理样机,经测试其谱型与理论谱型符合良好,实现超窄带透射带宽和高稳定中心透射波长,满足太阳速度场高分辨率观测的需求。双峰钾原子滤光器的成功研制与此系统结构方案,为我国太阳高分辨率观测提供一种新的观测手段,同时也可应用于地球风场探测和物体速度测量;将此技术扩展到 Ca(423 nm)和 Na(589 nm),实现对太阳大气从光球层到色球层的多层次速度场的同时观测,为解决日震学难题、以及日地空间环境监测预报提供有力的支持。

## 参 考 文 献

- 1 Robert B. Leighton, Robert W. Noyes, George W. Simon. Velocity fields in the solar atmosphere I. preliminary report[J]. *Astrophysical Journal*, 1962, **135**: 474~499
- 2 J. W. Leibacher, R. F. Stein. A new description of the solar five-minute oscillation [J]. *Astrophysics Letter*, 1971, **7**: 191~192
- 3 Xiong Darun. Helioseismology [J]. *Progress in Astronomy*, 1988, **6**(2): 83~93  
熊大闰. 日震学[J]. *天文学进展*, 1988, **6**(2): 83~93
- 4 Ai Guoxiang. Birefringent filter and its application to astronomy [J]. *Progress in Astronomy*, 1987, **4**(5): 317~329  
艾国祥. 双折射滤光器及其在天文学中的应用[J]. *天文学进展*, 1987, **4**(5): 317~329
- 5 H. L. Chen, C. Y. She, P. Searcy *et al.*. Sodium-vapor dispersive faraday filter [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(12): 1019~1021
- 6 Yang Yong, Cheng Xuewu, Li Faquan *et al.*. A flat spectral Faraday filter for sodium lidar[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(7): 1302~1304
- 7 A. Cacciani, M. Fofi. The magneto-optical filter [J]. *Solar Physics*, 1978, **59**(11): 179~189
- 8 W. J. Chaplin, A. M. Dumbill, Y. Elsworth *et al.*. Studies of the solar mean magnetic field with the Birmingham Solar-Oscillations Network(BiSON)[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2003, **343**(3): 813~818
- 9 A. Cacciani, S. Tomczyk, K. Steniner *et al.*. An instrument to observe low-degree solar oscillations [J]. *Solar Physics*, 1995, **159**(1): 1~21
- 10 M. Haberreiter, W. Finsterle, S. M. Jefferies. On the observation of traveling acoustic waves in the solar atmosphere using a magneto-optical filter [J]. *Astronomische Nachrichten*, 2007, **328**(3-4): 211~214
- 11 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
- 12 Zhang Yundong, Jia Xiaoling, Ma Zuguang *et al.*. Optical filtering characteristic of potassium Faraday optical filter [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(3): 372~375
- 13 Cheng Xuewu, Gong Shunsheng, Li Faquan *et al.*. Daytime observation technology of lidar by using atomic optical filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 406~410  
程学武, 龚顺生, 李发泉等. 采用原子滤光的激光雷达白天探测技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 406~410
- 14 E. T. Dressler, A. E. Laux, R. I. Billmers. Theory and experiment for the anomalous Faraday effect in potassium [J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 1996, **13**(9): 1849~1858
- 15 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
- 16 Lin Yuanzhang. Introduction to Solar Physics [M]. Beijing: Science Press, 2000. 146~147  
林元章. 太阳物理导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 146~147

栏目编辑: 韩峰