

深空组合导航中天文测速观测研究

宁宗军¹, 李东¹, 戴煜²

(1. 紫金山天文台 暗物质与空间实验室, 南京 210008; 2. 南京大学 天空学院, 南京 210093)

摘要: 深空天文测速导航方法以空间中的某颗恒星为目标, 利用航天器自身携带的光谱仪测量相对于恒星的移动速度来实时调整自行速度和路线。太阳是主要的测速导航源之一, 利用目前运行的空间卫星的光谱观测资料, 分析和研究了太阳相对于卫星的视线速度和速度误差变化情况, 为本项目中自主导航光谱提供实测证据。选取了太阳表面5个位置的光谱观测, 持续时间在一个小时左右, 通过高光谱线轮廓拟合观测数据, 得到了太阳表面5个位置的亮度变化、谱线宽度和速度, 其中主要参数速度平均值大约在10 km/s, 和速度变化在3 km/s。这是由太阳表面存在大量的微观尺度上的物质运动所导致的。

关键词: 组合导航; 高精度; 天文测速

中图分类号: V249.32+3

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2016)03-0225-4

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2016.03.005

引用格式: 宁宗军, 李东, 戴煜. 深空组合导航中天文测速观测研究[J]. 深空探测学报, 2016, 3(3): 225-227, 245.

Reference format: Ning Z J, Li D, Dai Y. Study for celestial speed detection of integrated navigation in deep space exploration [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(3): 225-227, 245.

0 引言

深空探测是我国空间科学发展的重要方向。深空导航技术则是深空探测任务成功实施的保障。深空导航是指确定探测器在空间飞行时的瞬间位置和速度。深空探测器的导航能力关乎探测任务的成败, 自20世纪90年代以来, 国外共有15次火星探测任务, 其中失败了6次。除火星气候探测者外, 其余5次均与导航有关。

近年来, 国内学者提出了基于天文光谱测速的深空自主导航方法, 该方法通过航天器自带光谱仪测量视野范围内恒星的速度来确定自己的瞬间速度信息, 达到及时调整和修正轨道的目的。本文利用目前在空间运行的卫星对太阳的光谱观测, 采用天文学常用的分析方法, 得到太阳表面不同位置的视向速度的统计规律, 包括速度平均值和偏差, 为深空导航中自行研制光谱仪和速度测量提供重要的参数和标准, 从而实现深空高精度导航。

1 卫星简介

本文使用的数据来自空间卫星太阳过渡层成像光谱仪 (IRIS)^[1], 该卫星是美国宇航局 (NASA) 在

2013年6月27日发射的一颗小型探测卫星, 其主要目的是探测太阳色球层和过渡区的动力学行为, 追踪太阳大气中能量的产生和传播过程。它发射在与极地太阳同步轨道有98°倾角的轨道上, 高度大约为620 km (近地点) 到670 km (远地点)。IRIS卫星有3种不同的曝光时间, 分别对应3个不同的探测器, 即FUV、NUV和SJI。IRIS光谱观测到的谱线包含的温度范围很宽, 从4 500 K一直到大约10 MK。这几乎包含了太阳大气的所有层次, 从光球层到色球层和过渡区并一直延伸到日冕和耀斑中。其主要的谱线包括低温的Mg II, 色球和过渡区的C II、Si IV和O IV, 以及高温的日冕谱线Fe XII和耀斑谱线Fe XXI等^[2-3]。

2 数据介绍和分析方法

IRIS卫星观测到的数据根据其预处理的程度可以分为不同的级别。从卫星遥测得到的最原始的数据被转化为图像文件, 称为Level 0的数据。Level 1的图像则是在Level 0图像的基础上重新调整, 使得波长从左到右依次增长。Level 1的数据是最低级的可供科学研究使用的数据, 但是这些数据没有经过校准处理。经过校准处理 (比如暗电流补偿的去除、平常校正、几

何失真与波长的校准、坏点和噪声的去除等)的Level 2数据才是使用最广泛的数据。

本文选取SiIV谱线为研究目标,波长在1 394 Å。图1就是IRIS卫星对该谱线的观测例子。图1中横坐标是波长方向,纵坐标是狭缝在日面空间的位置,例如沿着太阳的南北方向。狭缝的长度确定了观测范围和区域。可以看出,在1 394 Å处太阳的辐射强度明显增强(颜色黑代表辐射强度大),这说明太阳大气中SiIV谱线的辐射强。这些辐射较强处明显是依赖日面的位置,沿着纵轴方向看,有些位置辐射就弱,比如0~120。图中黑线是在狭缝178位置处的该谱线轮廓图,是一个典型的高斯曲线。蓝色曲线则是对观测曲线的拟合。其中线心位置是利用观测辐射强度较小区域(通常称之为宁静区)来测量。拟合的结果是得到谱线强度231.2 DN/s、谱线宽度33.68 km/s和谱线视向速度-7.10 km/s,负号表示是蓝移速度。黑色实曲线是光谱在蓝色短线位置处的轮廓,蓝色曲线代表了单高斯拟合的结果,具体数值见右上角。黑色虚线则给出了光谱在宁静区域(黑色短线)的谱线轮廓,用来计算静止线心。

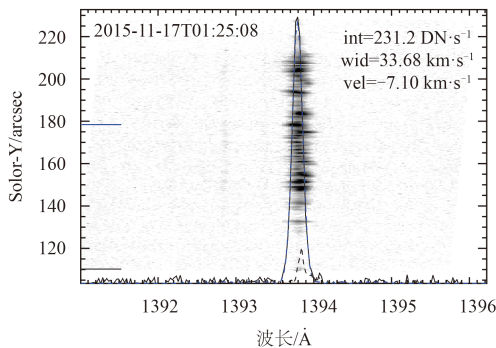


图1 IRIS在SiIV 1 394 Å窗口的光谱图(2015年11月19日01:25 UT)

Fig. 1 IRIS SiIV 1 394 Å spectral window detected at 01:25 UT at 2015 Nov. 19

3 观测实例

本文研究太阳表面的SiIV 1 394 Å光谱数据,研究其谱线强度、谱线位移(速度)和谱线宽度等随时间的演化。因此,数据选取日面中心附近,东西南北4个边界区域附近,共5组数据。这5组数据都位于太阳的宁静区域,而非活动区。图2给出了5组数据中IRIS光谱狭缝在太阳表面193 Å图像的大体位置文献[4],观测时间范围和狭缝长度等其他信息则以及得到结果列在表1中。这里五组数据的时间并不是同时的,间隔较长,图1只显示了2015年11月19日01:00 UT(日面中心的观测时间)的全日面成像图(数据来自SDO/AIA在193 Å波段的成像观测),其他四组数据的观测时间不

在这个时刻,因此它们狭缝位置只是标出日面的相对位置。

SDO/AIA AIA_2 SDO/JSOC-SDP 193 19-Nov-2015 01:00:05.840 UT

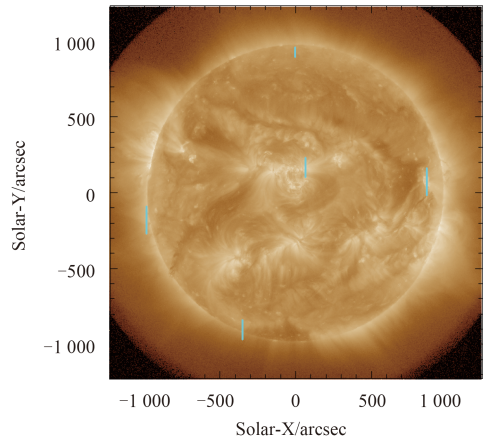


图2 SDO/AIA的全日面成像(193 Å),5条天蓝色的短线表示IRIS卫星光谱狭缝的位置,分别位于日面5个方向的附近区域,即东西南北中5个方位的附近区域

Fig. 2 The Sun detected by SDO/AIA at 193 Å. five sky-blue lines mark the positions where are detected at SiIV 1 394 Å

我们的目标是为了研究光谱信息随时间的变化情况,因此选取的是固定狭缝的观测模式,也就是狭缝相对于太阳中心位置不变。这样长时间的观测,加上太阳的自转运动,我们实际观测到的光谱并不是来自太阳的一个狭缝区域,而是太阳表面的一个区域。

图1给出了IRIS在SiIV 1 394 Å谱线轮廓拟合方法。图中(黑色实曲线)显示SiIV 1 394 Å这条谱线是比较孤立的发射线,周围没有其他发射线的影响,同时这条谱线的轮廓极似高斯函数。因此,结合文献^[5],我们使用单高斯函数叠加在一个线性背景上来拟合它。如图中蓝色曲线所示。通过单高斯拟合我们可以得到谱线SiIV 1 394 Å的积分强度、线心位置以及多普勒宽度(FWHM)。为了计算谱线的多普勒位移,我们还要选取谱线SiIV 1 394 Å的静止线心,如图中黑色虚线所示,来自光谱观测中的宁静区域(黑色短线标出的区域)。这样得到的静止线心是1 393.76 Å。拟合线心和静止线心差距可以计算出谱线速度。

图2为SDO/AIA的全日面成像。

通过上面的方法,对日面中心位置的狭缝计算结果如图3所示。图中横轴表示时间,单位是min,初始时刻在图下已经注明。纵轴是沿着狭缝的长度,单位是Mm。图中黑色的竖线是由于在那个时刻IRIS没有光谱观测数据,蓝色的横线表示图1中谱线轮廓所在的位置,“×”则给出了图1中光谱图发生的时间。为了定量地表述观测到的谱线的信息,在图3中我们还同时给出了谱线强度、谱线宽度和谱线位移的平均值

(M) 和标准方差 (σ)。在太阳表面的中心区域附近, 谱线SiIV 394 Å的平均强度和平均多普勒宽度都有较大的值, 但其平均多普勒位移的数值几乎等于零。另一方面, 无论是谱线强度、宽度以及速度, 它们的标准方差都相对比较大。这说明虽然在太阳表面的宁静区域, 也是存在很多小的活动现象, 从而使得谱线强度、宽度和谱线中心位移有较大的变化范围。

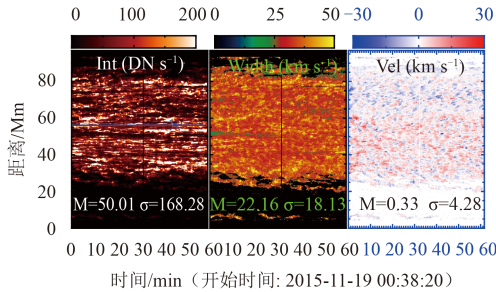


图3 日面中心附近IRIS光谱观测中SiIV线的拟合结果。从左到右依次是谱线强度、谱线宽度和谱线中心位移。“x”表示图1中谱线轮廓的观测时间和位置

Fig. 3 Time distance maps of the SiIV intensity, width and shift at the solar disk center. The profile at the position marked by 'x' is shown in Fig. 1

为了进一步看到SiIV 394 Å的谱线信息随时间的变化情况, 我们选取了某一个特定的位置(图1中蓝色横线所示)的谱线信息的演化情况, 见图4。图中分别用蓝色虚线和红色虚线标出了谱线在这个位置的平均值和标准方差。

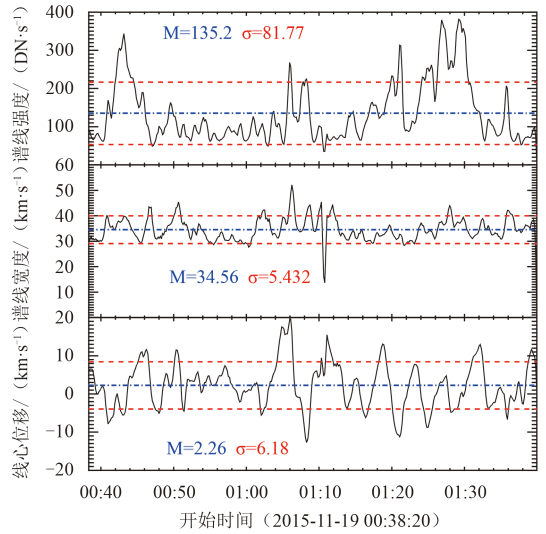


图4 谱线SiIV 394 Å在某一特定位置(图3中蓝色横线所示)的演化情况。从上到下依次是谱线强度, 宽度和线心位移。图中蓝色虚线表示曲线的平均值, 红色虚线则代表曲线的标准方差

Fig. 4 Time evolution of SiIV 394 intensity, width and line center at the position marked by the blue line in Fig. 3. The blue dot-dashed line is the mean value, while the red dashed line is the standard deviation

平均值和标准方差。

对日面上5个不同位置的观测, 使用相同的处理方法, 得到了谱线SiIV 394 Å的强度、宽度以及速度的平均值和标准偏差, 如表1所示。

表1 实测数据信息和分析结果

Table 1 List of the data and results

位置	日期	时间 (UT)	狭缝中心/°	时间分辨率/s	狭缝尺度/Mm	平均宽度和偏差/ (km·s ⁻¹)	平均速度和偏差/ (km·s ⁻¹)
日心	20151119	00:38—01:40	(58, -167)	9.4	89	22.2±18.1	0.33±4.2
东侧	20151205	17:49—18:56	(-987, -182)	9.5	130	14.5±33.7	2.2±13.2
西侧	20151231	21:07—22:03	(864, -71)	16.8	131	31.2±17.1	4.2±5.8
南侧	20151117	00:38—01:40	(-350, -906)	31.6	89	23.5±30.8	1.3±7.6
北侧	20150828	07:09—11:59	(-5, -928)	9.4	45	21.8±22.1	1.7±5.4

4 结论

结合我们对日面5个不同区域的长时间观测, 通过单高斯轮廓拟合, 得到了谱线SiIV 394埃的强度、宽度以及速度对时间的演化。计算它们的平均值以及标准方差, 我们发现由于谱线线心移动而产生的视向速度平均大约2 km/s, 而速度的标准偏差却有7.2 km/s。文献^[6]的研究发现, 这些速度偏差是由于太阳表面大气中的各种活动导致的, 它们的活动产生了物质的随机运动, 从而观测上得到了平均速度3倍以上的速度涨落。这些观测事实对深空天文测速有了更准确的认识, 为深空组合导航的设计方案提供观测依据。这些速度涨落将来直接影响航天器的导航和定位精度, 因此研发精密的光谱观测仪和发展精确的速度计算方法是课题继续研究的方向。

参 考 文 献

- [1] De Pontieu B, Title A M, Lemen J R, et al. The interface region imaging spectrograph (IRIS) [J]. Solar Physics, 2014, 289: 2733-2779.
- [2] Li D, Ning Z J, Zhang Q M. Imaging and spectral observations of quasi-periodic pulsations in a solar flare [J]. The Astrophysics Journal, 2015: 807, 72-84.
- [3] Li T, Zhang J. Quasi-periodic slipping magnetic reconnection during an X-class solar flare observed by the solar dynamics observatory and interface region imaging spectrograph [J]. The Astrophysics Journal Letter, 2015, 804: 8-15.
- [4] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) [J]. Solar Physics, 2012, 275, 17-32.
- [5] Ning Z, Innes D E, Solanki S K. Line profile characteristics of solar explosive event burstsp [J]. Astronomy and Astrophysics, 2004, 419:

An Adaptive Kalman Filter for Mars Spacecraft Acquisition Phase

NING Xiaolin¹, LI Zhuo¹, HUANG Panpan², YANG Yuqing¹, LIU Gang¹, FANG Jiancheng¹

(1. School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering, BeiHang University (BUAA), Beijing 100191, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia)

Abstract: Celestial navigation is an energy saving and efficient way of autonomous navigation for deep space probes. Kalman filter has been successfully applied in the Celestial navigation system. During the acquisition phase, due to the complex dynamic environment, unmolded acceleration error and the ephemeris error etc. may cause the statistics of process noise uncertainty. To overcome the problem, a method named AQCKF based on the trend of the innovation sequences and residual sequences to scale the process noise covariance matrix is proposed in this paper. In the first place, it calculates the scale factor based on the innovation and residual separately. Then, by comparing the trend of the two factors, the scale factor of the new method is set as the average. In addition, the navigation performance of traditional SCKF, the method only using innovation or residual to scale Q and AQCKF is also compared by simulation. The simulation results show that the new method yields better performance than the traditional methods in solving the problem caused by the uncertainty of the process noise, furthermore it also shows a good stability.

Key words: adaptive filter; celestial navigation; process noise; Kalman filter

[责任编辑: 杨晓燕]

(上接第227页)

[5] 1141-1148.

[6] Jongchul C, Wang H M, Goode P R, et al. Comparison of transient network brightenings and explosive events in the solar transition region[J]. *The Astrophysical Journal*, 2000, 528: 119-122.

作者简介:

宁宗军(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 太阳物理的多波段分析研究。

通信地址: 江苏省南京市北京西路2号紫金山天文台407(110008)

电话: (025) 83332128

E-mail: ningzongjun@pmo.ac.cn

Study for Celestial Speed Detection of Integrated Navigation in Deep Space Exploration

NING Zongjun¹, LI Dong¹, DAI Yu²

(1. Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Nanjing 210008, China;

2. School of Astronomy & Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The main idea of autonomous navigation based on velocity measurement is to detect the on-sight speed of the star in the space when the satellite sees it using the spectrograph. The Sun is one of the most important observation targets in space. In this paper, we analyze the data of the space-born spectrograph to observe the Sun at five different positions. Each data set has a period of about one hour. Using the Gaussian profile fitting, we can get the intensity, width and speed. The mean speed is about 10 km/s with a standard deviation of 3 km/s, which is caused by the small scale activities on the solar surface.

Key words: integrated navigation; high resolution; astronomy speed-detection

[责任编辑: 高莎]