

# 利用双视角消除太阳矢量磁场观测中的 $180^\circ$ 不确定性\*

周茹芸<sup>1,2</sup> 汪毓明<sup>3†</sup> 宿英娜<sup>2</sup> 毕少兰<sup>1</sup> 刘睿<sup>3</sup> 季海生<sup>2‡</sup>

(1 北京师范大学天文系 北京 100875)

(2 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(3 中国科学技术大学地球与空间科学学院 合肥 230026)

**摘要** 随着“环日轨道器”(Solar Orbiter, SO)的在轨运行,太阳磁场观测进入了双视角遥测的时代.对利用太阳磁场的双视角观测改正矢量磁图中存在的横场(垂直于视线方向的磁场分量) $180^\circ$ 不确定性进行了模拟,首先模拟了对解析解得到磁图的双视角观测,然后利用“日震学和磁学成像仪”(Helioseismic and Magnetic Imager, HMI)在不同时间观测到的一个老化黑子的磁图模拟了双视角观测.发现要改正一个磁图中横场方向的 $180^\circ$ 不确定性,在观测上只需要另外一个平行于视线方向的磁场即纵向磁场观测的协助.利用HMI的磁场观测模拟,估算显示 $30^\circ$ 的张角能够改正50 Gs磁场中的 $180^\circ$ 不确定性.更大的张角虽然更有利于更弱磁场的改正,但是考虑到投影效应的不利影响, $30^\circ$ 左右的张角应该是未来空间设备进行多视角观测太阳磁场的最佳张角.

**关键词** 航天器: 载荷, 仪器: 偏振测量, 太阳: 磁场

中图分类号: P171; 文献标识码: A

## 1 引言

磁场普遍存在于各种宇宙结构和层次的等离子体中,是宇宙间各类能量释放的主要来源之一,是研究天体特性和演化的重要物理量.因此偏振测量是探测宇宙的一个重要窗口<sup>[1-3]</sup>.对于太阳观测,如何实现高精度偏振测量始终是一个重要课题.太阳将大约十万分之一热核反应的能量转化为磁能,由此形成了一个天然的等离子体物理实验室,宇宙间普遍存在的磁对流现象和理论、磁活动、磁周期以及磁场起源等科学问题可以在其中得到深入的观测与研究.磁场和运动的相互作用造成了太阳11年活动周(或22年磁周期)的变化,磁场塑造了太阳大气丰富的空间结构,小尺度的磁能释放加热了太阳高层大气并导致了太阳风的形成和加速,大尺度磁能的释放产生了剧烈的太阳爆发,并由

2020-12-21收到原稿, 2021-02-23收到修改稿

\*中国科学院战略先导专项(XDA15017300、XDB41000000)和国家自然科学基金(NSFC41842037)项目资助

†jihs@pmo.ac.cn

‡ymwang@ustc.edu.cn

此形成了灾害性空间天气,为数众多的太阳磁场研究课题使得太阳物理与磁流体力学(MHD)、等离子体物理和空间物理发生了交叉。

太阳磁场能量的释放大都发生在日冕,因此日冕磁场的观测是非常重要的课题。但是日冕磁场很难准确测量,这一方面是由于日冕磁场很弱,另一方面,由于日冕是光学薄的,这使得我们难以确定观测到的偏振信号是来自日冕中的哪一层。我们所能得到的关于日冕磁场的知识大都来自在一定的模型下利用太阳表面磁场(光球或者色球)向上的外推。对于日冕磁场的模拟通常分为属于静力学类型的无力场模型和属于动力学类型的MHD模型<sup>[4-7]</sup>,而且MHD模型通常以无力场模型作为初始条件。由此,作为边界条件的太阳表面磁场显得尤为重要。但是,目前太阳磁场观测主要依赖“塞曼效应”来观测光的偏振,这使得我们无法确定横场的方向,即横场存在着所谓的“180°不确定性”<sup>[8-9]</sup>。我们只能利用一定的假设来解决横场的180°不确定性,目前确定横场方向依据的是最小能量原则<sup>[8]</sup>,即假设横场的方向与势场外推所得到的横场之间的夹角为锐角。这一原则存在的天生缺陷使得我们无法精确估计活动区的电流和电流螺度,进而无法精确估计活动区的非势磁能,由此带来的是外推日冕磁场与实际磁场之间存在着未知的偏差。从观测上解决180°不确定性的一个有效方法是多视角观测,其中最为有效的方法是利用3颗卫星张开一定的立体角同时观测太阳视线方向的磁场<sup>[10]</sup>,也就是纵向磁场,但是,有一颗卫星必须飞离黄道面,成本太大,实现起来很困难。折中起来考虑,从两个视角观测太阳的矢量磁场可以解决这一不确定性<sup>[10-12]</sup>。

“日地关系观测台”(STEREO)首次实现了对太阳的双视角观测<sup>[13]</sup>,随着“环日轨道器”(Solar Orbiter, SO)的发射和成功运行<sup>[14]</sup>,太阳磁场的观测正式进入了多视角观测时代。“环日轨道器”离太阳最近为0.28 au,与黄道面的倾角不断增加,在任务结束时达到34°,进而实现清晰观测太阳两极的科学目标。环日轨道器有10个载荷,包括6个遥感观测望远镜和4个原位测量仪器。其中的“偏振和日震成像仪”(The Polarimetric and Helioseismic Imager, SO/PHI)将协助“环日轨道器”实现如下核心科学目标<sup>[15]</sup>:即日球层是如何形成并受太阳影响的?“偏振和日震成像仪”是人类发射到空间的针对太阳磁场的第5台测量设备,之前有“太阳和日球层天文台”上面的“迈克耳孙多普勒成像仪”(SOHO/MDI)、“太阳动力学天文台”上面的“日震学和磁学成像仪”(SDO/HMI)以及“日出”卫星上面的“偏振光谱成像仪”(Hinode/SP)和“窄带滤光成像仪”(Hinode/NFI)<sup>[16-19]</sup>;它也是继SOHO/MDI、“太阳低频震荡探测仪”(SOHO/GOLF)、“太阳辐射变化和重力模震荡探测仪”(SOHO/VIRGO)和SDO/HMI之后专门为日震学研究提供空间资料的设备<sup>[16-17, 20-21]</sup>。非常重要的是,“偏振和日震成像仪”将第1次实现视线方向偏离日地联线的观测,也是首次飞离黄道面对太阳极区磁场开展目前最高分辨率的观测。

在“环日轨道器”时代,为了更好的科学产出,利用现有的空间设备<sup>[13, 22-24]</sup>、未来的空间设备<sup>[25-27]</sup>和地面设备<sup>[28-33]</sup>进行多视角观测的联合分析显得非常必要和迫切<sup>[12]</sup>,为此,欧洲空间局(ESA)专门成立了“模拟和数据分析工作小组”,他们正在发展与之相关的联合分析方法和程序。

在与现有的空间和地面观测设备联合观测方面,值得期待的是“偏振和日震成像仪”偏离日地联线的观测将使我们首次利用几何方法来改正磁场观测中的180°不确定性。

太阳是唯一可以进行多视角观测的恒星, 未来的多视角观测必然将改正太阳磁场观测中的 $180^\circ$ 不确定性作为其重要的科学目标<sup>[11]</sup>. 但是在轨道设计中, 两颗卫星之间张开多大角度最合适是值得研究的课题. 基于这些考虑, 本文着重利用实际观测模拟了太阳磁场的双视角观测来改正其 $180^\circ$ 不确定性. 我们提出, 视线方向矢量磁场的 $180^\circ$ 不确定性如果想通过几何方法得到改正, 只需利用偏离这个视线方向纵向磁场的观测作为限制条件, 改正原理如图1所示. 从图1中我们可以看出, 由于存在横场方向的两种可能, 单视线方向对一个矢量磁场的观测存在两种可能. 但是, 这两种可能在第2个视线方向的纵向磁场会不一样, 我们由此可以确定一个正确的方向. 唯一不能改正的情况是当被观测磁场垂直于两个视线方向所决定平面的时候, 但这样的情况非常少见, 该像素点的磁场可以通过内插得到解决.

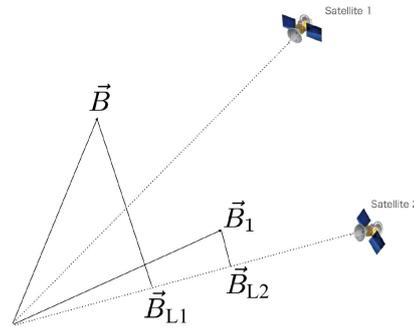


图1 这一绘图显示, 为了消除一个视线方向(卫星1)所观测到的横向磁场所存在的 $180^\circ$ 不确定性, 只需利用另外一个方向(卫星2)观测到的纵向磁场. 图中 $\vec{B}$ 为太阳活动区上假定的真实的磁场矢量, 由于存在 $180^\circ$ 不确定性, 从视线方向1(图中的卫星1)观测得到矢量磁场存在两种可能: 正确的观测 $\vec{B}$ , 错误的观测 $\vec{B}_1$ . 当磁场 $\vec{B}$ 不垂直于两个视线方向所决定的平面的时候,  $\vec{B}$ 和 $\vec{B}_1$ 在另外一个视线方向(图中的卫星2)的投影值(图中的 $\vec{B}_{L1}$ 和 $\vec{B}_{L2}$ )将存在不同. 通过卫星2对纵向磁场的观测, 我们可以轻易地舍去 $\vec{B}_1$ . 值得一提的是, 图中的线和矢量箭头不是必须在同一个平面.

Fig. 1 A sketch showing that, to correct the  $180^\circ$  ambiguity of the transverse magnetic field obtained from one view point (satellite 1), it is sufficient if we make line-of-sight (LOS) magnetic field observation from another view point (satellite 2). Let  $\vec{B}$  to be a real magnetic field vector of a solar active region, due to the existence of  $180^\circ$  ambiguity, observation from a single vantage point at satellite 1 generates two different solutions: the real magnetic field vector,  $\vec{B}$  and  $\vec{B}_1$ , a false one. They will have two different projections along the LOS of satellite 2 ( $\vec{B}_{L1}$  and  $\vec{B}_{L2}$  in the figure), if the magnetic field is not perpendicular to the plane formed by the two lines of sight. With only measurement of LOS magnetic field from satellite 2, we can easily remove the false one  $\vec{B}_1$ . It is worth mentioning that lines and arrows in the figure are not in a single plane.

在本文第2节, 我们利用数字模型和实际观测给出了模拟结果. 在模拟实际观测的时候, 首先必须将“观测坐标系”或者是“太阳投影坐标系”(Helioprojective-cartesian coordinate)得到的矢量磁场转换到“日面坐标系”(heliocentric coordinate system)中<sup>[34]</sup>. 在转换过程中, 我们可以直接使用Hagyard等人给出的一套公式<sup>[35-38]</sup>. 为了本文的完整性, 我们在附录中详细解析了这一套转换公式, 并与太阳软件包(Solar Software, SSW)<sup>[39]</sup>中HMI提供的相关程序<sup>[37]</sup>做了比较. 在第3节中, 我们给出了讨论和结论.

## 2 利用解析解和观测的模拟结果

首先, 我们利用一个无力场解析解的底边界模拟了两个视线方向的观测. 该解析解由Low给出<sup>[40]</sup>, 它描述了中性线附近的一个剪切磁场位形. 图2 (a)给出了由该解析解得到的局地磁场,  $X$ 和 $Y$ 代表太阳水平方向的尺度(任意单位)<sup>[41]</sup>, 其中水平磁场的大小和方向由箭头表示, 轮廓表示 $Z$ 方向的竖直磁场. 图2 (b)模拟了卫星1的观测到的纵向磁场(一系列等值线)和未能确定方向的横场(用没有箭头的横短线表示), 其观测视线的方位角偏离竖直的 $Z$ 方向. 图2 (c)中的轮廓模拟了卫星2的观测到的纵向(视线方向)的磁场, 其观测视线的方位角均偏离竖直的 $Z$ 方向和卫星1的视线方向. 对于图2 (b)中的磁图中的每一点来说, 其磁场方向存在两种可能, 我们将这两种可能均转换为卫星2观测到的纵向磁场, 并与图2 (c)中的模拟观测进行对比, 选取与观测值最接近时的方向. 图2 (d)给出了利用这种方法去除了 $180^\circ$ 不确定性后的磁图, 由图2可见, 利用这个方法定下的横场方向和理论值完全一致.

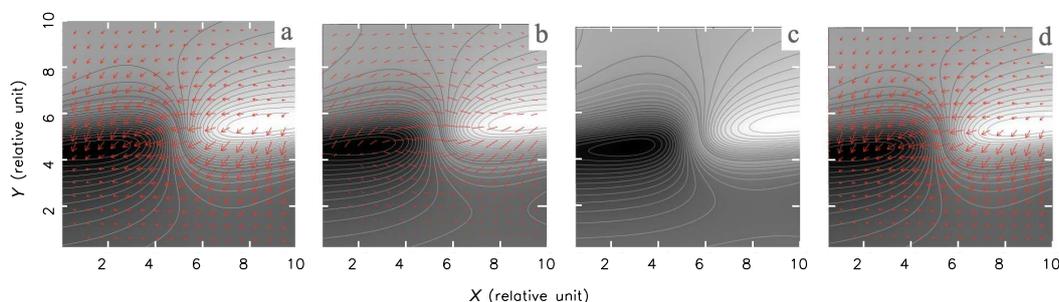


图 2 利用Low<sup>[40]</sup>给出的一个解析磁图模拟了两个视线方向的观测. (a): 局地水平磁场和竖直磁场,  $X$ 和 $Y$ 代表用相对单位表示的太阳上两个水平方向的尺度. 箭头表示水平磁场的大小和方向, 轮廓表示 $Z$ 方向的竖直磁场. (b): 卫星1从一个视线方向的观测模拟, 横向的短线表示未能确定方向的横场. (c): 卫星2从另外一个视线方向观测到的纵向磁场的模拟. (d): 利用卫星2观测到的纵向磁场, 我们得以确定图(b)中的横场的方向, 并由此重现了图(a)中给出的结果.

Fig. 2 Using a vector magnetogram generated with the analytical formula by Low<sup>[40]</sup>, we simulate observations of magnetic field from dual view points. Panel (a): Local horizontal and vertical magnetic field on the Sun, with  $X$  and  $Y$  represent the length scale in two horizontal directions in relative unit. Arrows represent the direction and strength of the horizontal magnetic field, and the contours are the vertical magnetic field in direction  $Z$ ; Panel (b): Measured vector magnetogram from one view point, satellite 1. The bars on the panel show the transverse magnetic field with no directions. Panel (c): Measured LOS magnetogram from another view point, satellite 2. Panel (d): With the information from LOS magnetogram from satellite 2, the  $180^\circ$  ambiguity on the vector magnetogram in panel (b) has been removed, which recovers the results given in panel (a).

在这个解析解的模拟之中, 两个视线方向的差别只取决于计算机的计算位数, 因而, 两颗卫星之间只需很小的张角就能够去除 $180^\circ$ 不确定性, 只要计算机的计算精度能够识别即可. 为了模拟真实的观测, 我们选了HMI对活动区12480中的一个成熟黑子的磁场在不同时间的观测来模拟两个视角的观测. 图3给出了2016年1月11日和12日由HMI所观测到的视线方向的全日面磁图, 12480活动区是一个双极型活动区, 其中有一个成熟的黑子(170个黑子面积单位). 按照McIntosh分类, 该活动区属于Eso类型, 按照Hale分类, 该活动区属于 $\beta$ 型. 可以看出, 该黑子在1 d之内基本保持了稳定. 由于太阳的自转, 我们可以将这1–2 d内不同时间的磁场观测假设为两颗卫星同时的观测, 并由此进行多视线观

测模拟.

我们选择了2016年1月11日零时至12日零时之间HMI观测到的矢量磁图, 共121幅, 这些矢量磁图均来自HMI提供的hmi.sharp\_720s数据. 我们以1月11日零时的“矢量”磁图作为卫星1的观测到的磁图, 目标是利用其后不同时间的纵向磁图来确定该黑子磁图上的横向磁场方向. 我们依据黑子位置将1月11日零时以后的纵向磁图与需要改正的磁图对齐, 然后在所有的磁图上切出包含该黑子的同样大小的块, 如图4所示, 它们的像素数目为 $61 \times 61$ . 我们对该黑子的纵向磁场的演化进行了分析, 图5 (a)–(c)给出了3个不同时刻该黑子的纵向磁场与1月11日零时的纵向磁场的散点相关图, 从中我们可以看出所有的点都维持在 $45^\circ$ 线左右, 但黑子的缓慢演化也很清楚, 其相关系数在缓慢变化之中. 图5 (d)给出了相关系数随着张角的变化, 其相关系数维持在0.95以上. 据此, 我们可以认为在1月11日这1 d内保持相对稳定. 由此, 我们可以利用这个黑子不同时刻的磁图来模拟对同一个黑子在不同视线方向的同时观测.

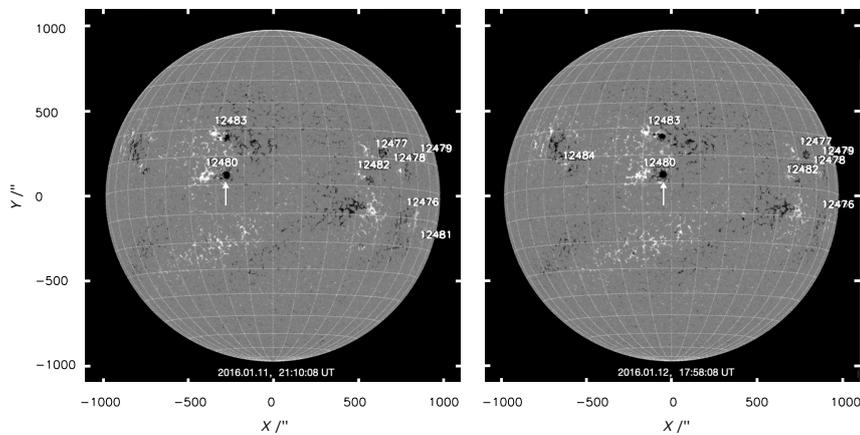


图3 HMI在2016年1月11日和12日所观测到全日面纵向磁图, 其中的箭头指出了活动区12480中的一个选中的成熟黑子在这2 d的磁场. 磁图来自网站<https://www.solarmonitor.org/>.

Fig. 3 The figure gives two full disk LOS magnetograms observed on January 11 and 12 of 2016 by HMI, where the arrows point to the magnetic field of the selected mature sunspot on the two days. The two magnetograms are from the website <https://www.solarmonitor.org/>.

图4 (a)给出了去掉横向磁场方向的1月11日零时的黑子矢量磁图, 图4 (b)给出了利用最小能量原则确定了横场方向的黑子矢量磁图, 横坐标和纵坐标分别是利用HMI处理软件所得到的经度和纬度. 由于该黑子的竖直磁场为负, 因而, 图4 (b)中的大多数横场方向看上去是可信的. 其中图4 (c)给出了该黑子在2016年1月12日零时的纵向磁图. 由于不同的投影效应, 其经度和纬度范围均发生了不同程度的变化(每个像素点的经度、纬度可由HMI提供的程序读出<sup>[37]</sup>).

对于图4 (a)中每一点的磁场, 我们依次选择两个相反的横向磁场方向(对应于卫星1“观测坐标系”的磁场矢量)作为可能的方向, 然后利用附录中的(7)式将其转换到“日面坐标系”中的矢量磁场. 再利用(7)式的逆变换将“日面坐标系”中磁场矢量转换到卫星2“观测坐标系”中的视线方向磁场. 通过与卫星2的观测比较, 由此确定一个横场方向. 其最终结果在图4 (d)中显示, 即其中的横场方向直接来自图4 (a)和图4 (c)的联合分析. 通过

和图4 (b)中的横场比较, 我们发现绝大多数反演结果与图4 (b)中的结果是一致的. 但确实也有一些地方的横场方向与图4 (b)的结果不一致. 我们认为, 这是由于黑子中这些地方的磁场变化较大, 不适合模拟不同视线方向的同时观测.

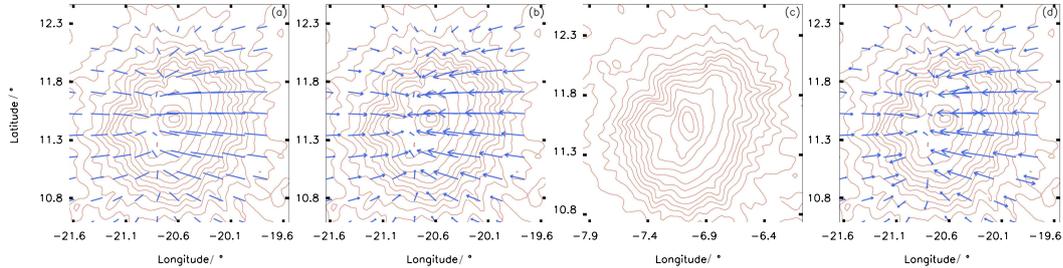


图 4 (a)给出了1月11日零时HMI观测到的黑子矢量没有横场方向的磁图, 模拟一个视线方向的观测. 横坐标是经度, 纵坐标是纬度. (b)给出了与(a)同样但给出了横场方向的磁图, 其中的横场方向是利用最小能量的原则确定. (c)给出了该黑子在2016年1月12日零时的纵向磁图, 模拟另外一个视线方向的观测. (d)给出了利用(b)中两个视线方向的观测去除了(a)中 $180^\circ$ 不确定性后的磁图. 图中最强的纵场是 $-2600$  Gs, 最强的横场是 $1700$  Gs, 相邻纵场等值线相差 $200$  Gs.

Fig. 4 Panel (a) gives a vector magnetogram observed at 00:00:00 UT by HMI on January 11 with unknown directions for transverse magnetic fields, simulating observations from one view point. Abscissa gives longitude while ordinate gives latitude. Panel (b) gives the same magnetogram as panel (a) with directions of the transverse magnetic being determined by the principle of minimum energy. Panel (c) gives the measured LOS magnetogram observed at 00:00:00 UT on January 12, simulating observations from another view point. Panel (d) shows that, with the information from LOS magnetogram in panel (b), we have removed the  $180^\circ$  ambiguity for the transverse magnetic field in panel (a). The strongest LOS and transverse magnetic field are  $-2600$  and  $1700$  Gs, respectively. Adjacent contours represent a  $200$  Gs increment in LOS magnetic field.

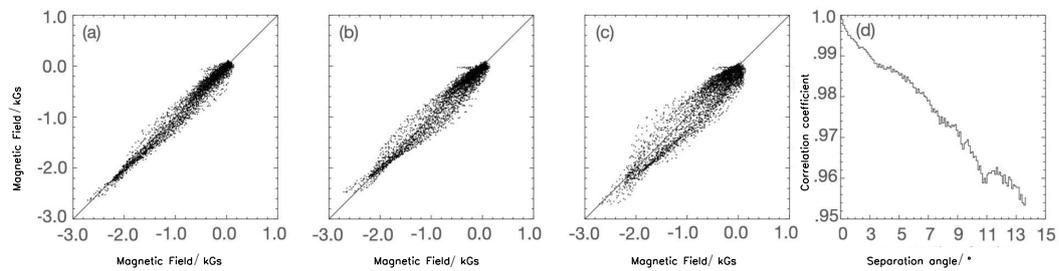


图 5 图(a)–(c)给出了1月11日零时的纵向磁场与之后3个不同时刻该黑子的纵向磁场的散点相关的示意图. 图(d)给出了其相关系数随着模拟张角的变化.

Fig. 5 Panels (a)–(c) give three sample scatter plots of the LOS magnetic field between 00:00:00 UT on January 11 and three different times aftermath. Panel (d) shows the variation of the correlation coefficient with the simulated separation angle.

### 3 讨论和结论

通过对实际观测的模拟, 至此我们可以得出结论: 要去除磁图横场方向的 $180^\circ$ 不确定性, 除了理论模型之外, 在观测上只需要另外一个视线方向纵场观测的协助. 因此, 单从解决横场方向 $180^\circ$ 不确定性考虑, 我们可以将卫星1设计为绕地飞行的卫星甚至地面

观测, 将卫星2设计为偏离日地连线的卫星, 这是一种成本最低的配置, 由于远离地球的卫星2只需要视线方向的纵场观测, 数据量可以降低到 $1/3$ , 由此还能提高磁图的时间分辨率.

至于两个视线方向至少需要张开多大的角度, 通过由公式模型所得到的磁图模拟我们发现, 两个视线方向张开的角度只取决于计算机的计算精度. 对于实际观测来说, 这取决于磁场望远镜的偏振测量精度. 为了回答在真实观测过程中能有效去除 $180^\circ$ 不确定性所需的两个视线方向的最小夹角值, 我们依次使用1月11日零时之后一个老化黑子的121幅观测磁场图像与1月11日零时的观测磁场图像来模拟立体观测. 如果以图4 (b)给出横场方向作为标准, 我们发现随着张角的越来越大, 越来越多像素点的横场方向得到了正确的改正, 如图6所示, 图中的结果充分显示了这一点. 从中我们可以看出, 横场方向得到正确改正的像素点百分比从最初 $0^\circ$ 时候的50%上升到 $12^\circ$ 时候的80%之多. 但是, 由于黑子中的磁场存在变化, 我们不可能得到100%的正确改正. 我们发现, 当两颗卫星之间的张角达到 $8^\circ$ 以上时, 得到正确改正的像素点百分比开始缓慢上升. 因此, 对于该小黑子, 两颗卫星之间呈 $8^\circ$ 的张角即能够满足改正横场 $180^\circ$ 不确定性的需要. 该小黑子磁图纵向磁场绝对值的中间值为385 Gs, 偏离 $8^\circ$ 视角所引起的视线方向的磁场改变值约为4 Gs. 对于50 Gs左右的纵向磁场, 这相当于需要偏离 $30^\circ$ 左右的视角. 更大的张角虽然可以改正更弱磁场区的 $180^\circ$ 不确定性, 但是边缘效应已凸显. 我们的模拟表明, 就“环日全景探测计划”来说<sup>[11]</sup>, 每组卫星之间的夹角为 $30^\circ$ 是一个合适的角度. 这里值得一提的是, 不同设备之间的不同视角的观测可以配合起来改正矢量磁图上的 $180^\circ$ 不确定性, 但不同望远镜之间的磁场观测存在着交叉定标的问题, 利用同样的设备进行多视角观测显然是一个最佳选择, 这也是“环日全景探测计划”的一个优势所在. 另外, 由于张角不一样, 两颗卫星观测到的是不同光学深度的太阳磁场, 由此所引起的磁场变化对于改正 $180^\circ$ 不确定性的影响值得进一步定量研究. 然而, 通过在不同角度观测不同光学深度的太阳磁场和速度场(包括跟踪目标所得到的横向速度), 我们由此会得到太阳磁场和速度场在垂直方向的梯度, 这将是立体观测太阳的另外一个优势所在.

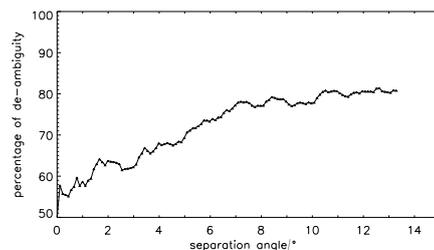


图6 横轴是黑子自2016年1月11日零时之后所走过的角度, 由此模拟了两颗卫星立体观测所张开的角度. 以图4 (b)给出了横场方向作为标准, 纵轴给出了横场方向不断得到正确改正的像素点百分比.

Fig. 6 Abscissa is the angle traveled by the sunspot after 00:00:00 UT on January 11, 2016, simulating the angle formed between two lines of sight from the assumed stereoscopic observations. Ordinate is the percentage of pixels with right correction of the  $180^\circ$  ambiguity with respect to the transverse field in Fig. 4 (b) which are taken as a standard.

## 参 考 文 献

- [1] Stenflo J O. SSRv, 2017, 210: 5
- [2] 艾国祥, 胡岳风. 天文学报, 1986, 27: 173
- [3] Severny A. SSRv, 1964, 3: 451
- [4] Wiegmann T. SoPh, 2004, 219: 87
- [5] Wiegmann T, Sakurai T. LRSP, 2012, 9: 5
- [6] Feng X S, Jiang C W, Xiang C Q, et al. ApJ, 2012, 758: 62
- [7] Jiang C W, Wu S T, Feng X S, et al. ApJ, 2014, 786: L16
- [8] Metcalf T R, Leka K D, Barnes G, et al. SoPh, 2006, 237: 267
- [9] Leka K D, Barnes G, Crouch A D, et al. SoPh, 2009, 260: 83
- [10] Ji H S, Wang Y M, Wang J X. SSPMA, 2019, 49: 059605
- [11] Wang Y M, Ji H S, Wang Y M, et al. ScChE, 2020, 63: 1699
- [12] Rouillard A P, Pinto R F, Vourlidis A, et al. A&A, 2020, 642: A2
- [13] Kaiser M L, Kucera T A, Davila J M, et al. SSRv, 2008, 136: 5
- [14] Müller D, Cyr O C S, Zouganelis I, et al. A&A, 2020, 642: A1
- [15] Solanki S K, del Toro Iniesta J C, Woch J, et al. A&A, 2020, 642: A11
- [16] Scherrer P H, Bogart R S, Bush R I, et al. SoPh, 1995, 162: 129
- [17] Schou J, Borrero J M, Norton A A, et al. SoPh, 2012, 275: 327
- [18] Tsuneta S, Ichimoto K, Katsukawa Y, et al. SoPh, 2008, 249: 167
- [19] Lites B W, Akin D L, Card G, et al. SoPh, 2013, 283: 579
- [20] Gabriel A H, Grec G, Charra J, et al. SoPh, 1995, 162: 61
- [21] Fröhlich C, Romero J, Roth H, et al. SoPh, 1995, 162: 101
- [22] Pesnell W D, Thompson B J, Chamberlin P C. SoPh, 2012, 275: 3
- [23] De Pontieu B, Title A M, Lemen J R, et al. SoPh, 2014, 289: 2733
- [24] Fox N J, Velli M C, Bale S D, et al. SSRv, 2016, 204: 7
- [25] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. RAA, 2019, 19: 156
- [26] Deng Y Y, Zhang H Y, Yang J F, et al. RAA, 2019, 19: 157
- [27] Krucker S, Hurford G J, Grimm O, et al. A&A, 2020, 642: A15
- [28] Goode P R, Coulter R, Gorceix N, et al. AN, 2010, 331: 620
- [29] Cao W, Gorceix N, Coulter R, et al. AN, 2010, 331: 636
- [30] Liu Z, Xu J, Gu B Z, et al. RAA, 2014, 14: 705
- [31] Schmidt W, von der Lühe O, Volkmer R, et al. AN, 2012, 333: 796
- [32] Scharmer G B, Bjelksjo K, Korhonen T K, et al. Proceedings of SPIE 4853, Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics. Waikoloa: SPIE, 2003: 341
- [33] Keil S L, Rimmele T R, Wagner J, et al. Solar Polarization, 2011, 6: 437
- [34] Thompson W T. A&A, 2006, 449: 791
- [35] Hagyard M J. SoPh, 1987, 107: 239
- [36] Gary G A, Hagyard M J. SoPh, 1990, 126: 21
- [37] Sun X. arXiv:1309.2392
- [38] Guo Y, Cheng X, Ding M D. ScChD, 2017, 60: 1408
- [39] Freeland S L, Handy B N. SoPh, 1998, 182: 497
- [40] Low B C. SoPh, 1982, 77: 43
- [41] Ji H S, Song M T, Li X Q, et al. SoPh, 1998, 182: 365



## 附录

## 矢量磁场从“太阳投影坐标系”到“日面坐标系”转换公式的详细解析

HMI提供的hmi.sharp\_720s类数据(简称为sharp数据)是直接全日面图像上截取下来的原始数据,没有坐标的改变,没有内插,这保证了在数据处理的时候更多的机动性.我们观测到的矢量磁场是“太阳观测坐标系”(native coordinate)中定义的,在分析太阳活动区的时候将这一观测磁场需要转换到“日面坐标系”(heliographic coordinate system)之中.这两个坐标系定义如下(参见图7):

- “观测坐标系”就是CCD像素所定义的二维数组网格,是从三维太阳表面投影到二维图像的结果,这一转换在天文上称作“投影成图”(remapping/map projection).由于这种数据是来自远处视角的投影成图,由此也定义为“太阳投影坐标系”(Helioprojective-cartesian coordinate)<sup>[34]</sup>.这个坐标系的单位矢量具体如下: $+\hat{\xi}$ 为CCD的 $+x$ 方向(右边), $+\hat{\eta}$ 为CCD的 $+y$ 方向(上边), $+\hat{\zeta}$ 指向图像平面之外,即视线方向.
- “日面坐标系”也就是磁场所在的局地坐标系,该坐标系的单位矢量是随位置变化的.在“日面坐标系”中,基本的单位矢量如下: $\hat{r}$ 轴指向当地的天顶(亦即太阳的径向方向), $\hat{\lambda}$ 轴与通过该点的太阳子午圈相切并指向太阳的北极方向, $\hat{\phi}$ 轴指向太阳的西边.

对于这一转换,已经有很多的英文文献给出了解析<sup>[35-38]</sup>.为了本文的完整性以及为了中文地区太阳物理初学者的便利,本附录给出了较为详细的解析.在这两个坐标系的转换的过程之中,我们需要如下第3个坐标系作为中介,这个坐标系称做为“日心地球指向的赤道坐标系”(Heliocentric Earth Equatorial, HEEQ),其定义如下(参见图7):

- “日心地球指向的赤道坐标系”是基于太阳自转所定义的坐标系, $\hat{z}_s$ 轴为太阳自转轴, $\hat{x}_s$ 方向通过太阳赤道,并通过与地球(或者空间望远镜)相望的太阳子午圈, $\hat{y}_s$ 轴遵循 $(\hat{x}_s, \hat{y}_s, \hat{z}_s)$ 顺序中的右手螺旋法则.

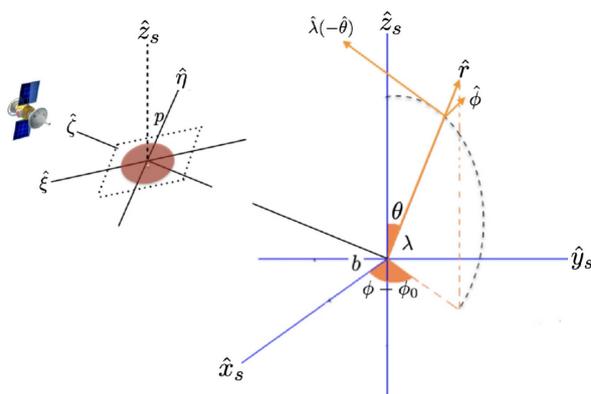


图 7 观测坐标系 $(\hat{\xi}, \hat{\eta}, \hat{\zeta})$ 、太阳日面坐标系 $(\hat{\phi}, \hat{\lambda}, \hat{r})$ 和日心地球指向的赤道坐标系 $(\hat{x}_s, \hat{y}_s, \hat{z}_s)$

Fig. 7 Native coordinate  $(\hat{\xi}, \hat{\eta}, \hat{\zeta})$ , heliographic coordinate system  $(\hat{\phi}, \hat{\lambda}, \hat{r})$  and HEEQ  $(\hat{x}_s, \hat{y}_s, \hat{z}_s)$

假设磁场位于卡林顿经度为 $(\phi - \phi_0)$ 纬度为 $\lambda$ 的某一点, 其余纬度为 $\theta = 90^\circ - \lambda$ . 这里,  $\phi_0$ 是与太阳望远镜相交的太阳子午圈的卡林顿经度. 磁场矢量从HEEQ到“日面坐标系”中的转换公式如下(这里 $\phi' = \phi - \phi_0$ ):

$$\begin{pmatrix} B_\phi \\ B_\lambda \\ B_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \phi' & \cos \phi' & 0 \\ -\sin \lambda \cos \phi' & -\sin \lambda \sin \phi' & \cos \lambda \\ \cos \lambda \cos \phi' & \cos \lambda \sin \phi' & \sin \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{sx} \\ B_{sy} \\ B_{sz} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

sharp数据提供磁场强度 $B$ 、倾斜角 $\gamma$ 和方位角 $\psi$ , 方位角 $\psi$ 是和 $+\hat{\eta}$ 方向的夹角, 逆时针为正. 由此我们得到“太阳投影坐标系”上的磁场矢量:

$$\begin{cases} B_\xi = -B \sin \gamma \sin \psi, \\ B_\eta = B \sin \gamma \cos \psi, \\ B_\zeta = B \cos \gamma, \end{cases} \quad (2)$$

在像平面上, 日轮中心就是视线方向与日面的交点, 假设这一交点在HEEQ坐标系中的纬度为 $b$ , 则 $b$ 大致相当于是空间磁场望远镜在HEEQ坐标系中的纬度. 对于偏离黄道面的观测(譬如solar orbitor),  $b$ 时刻在变化之中. 关于 $\hat{\zeta}$ 在HEEQ坐标系中的方位, 我们有:

$$\hat{\zeta} = \cos b \hat{x}_s + \sin b \hat{z}_s, \quad (3)$$

对于太阳极轴 $z_s$ 在太阳投影坐标系中的方位, 需要通过观测得知. 观测值为 $z_s$ 在像平面上的投影与 $\hat{\eta}$ 方向(即像平面的竖直朝上的方向)之间的夹角值, 这一投影值就是所谓的 $p$ 角. 不难得到太阳投影坐标系中的其他两个方向在HEEQ坐标系中的方位, 即:

$$\begin{pmatrix} \hat{\xi} \\ \hat{\eta} \\ \hat{\zeta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin b \sin p & \cos p & \cos b \sin p \\ -\sin b \cos p & -\sin p & \cos b \cos p \\ \cos b & 0 & \sin b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}_s \\ \hat{y}_s \\ \hat{z}_s \end{pmatrix}. \quad (4)$$

其逆变换为:

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_s \\ \hat{y}_s \\ \hat{z}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin b \sin p & -\sin b \cos p & \cos b \\ \cos p & -\sin p & 0 \\ \cos b \sin p & \cos b \cos p & \sin b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\xi} \\ \hat{\eta} \\ \hat{\zeta} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

这一变换可以看出,  $z_s$ 在像平面上的投影与 $\hat{\eta}$ 方向(即像平面的竖直朝上的方向)之间的夹角为 $p$ . 由(5)式得到如下转换公式:

$$\begin{pmatrix} B_{sx} \\ B_{sy} \\ B_{sz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin b \sin p & -\sin b \cos p & \cos b \\ \cos p & -\sin p & 0 \\ \cos b \sin p & \cos b \cos p & \sin b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_\xi \\ B_\eta \\ B_\zeta \end{pmatrix}. \quad (6)$$

由于镜面效应(即处理资料的视线方向和观测的视线方向是反向的), 测量到的 $p$ 角是实际 $p$ 角的负值, 将把 $p$ 角换成 $-p$ 角, 再结合(1)式, 最终将观测到的矢量磁场转换到了活动区的矢量磁场, 转换公式如下:

$$\begin{pmatrix} B_\phi \\ B_\lambda \\ B_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_\xi \\ B_\eta \\ B_\zeta \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_{11} = -\sin b \sin p \sin \phi' + \cos p \cos \phi', \\ a_{12} = \sin b \cos p \sin \phi' + \sin p \cos \phi', \\ a_{13} = -\cos b \sin \phi', \\ a_{21} = \sin \lambda (-\sin b \sin p \cos \phi' - \cos p \sin \phi') - \cos b \sin p \cos \lambda, \\ a_{22} = \sin \lambda (\sin b \cos p \cos \phi' - \sin p \sin \phi') + \cos b \cos p \cos \lambda, \\ a_{23} = -\sin \lambda \cos b \cos \phi' + \sin b \cos \lambda, \\ a_{31} = \cos \lambda (\sin b \sin p \cos \phi' + \cos p \sin \phi') - \cos b \sin p \sin \lambda, \\ a_{32} = -\cos \lambda (\sin b \cos p \cos \phi' - \sin p \sin \phi') + \cos b \cos p \sin \lambda, \\ a_{33} = \cos \lambda \cos b \cos \phi' + \sin \lambda \sin b, \end{cases} \quad (8)$$

对比SSW提供的相关的IDL程序(`hmi_b2ptrV.pro`), 其中的( $B_p$ ,  $B_t$ ,  $B_r$ )分别是西向、子午方向和径向, 对应于本附录中的( $B_\phi$ ,  $-B_\lambda$ ,  $B_r$ ). 处理磁场资料的时候, 一般习惯于把北放在上方, 即 $B_\lambda$ 方向, 这也是为什么必须将IDL程序(`hmi_b2ptrV.pro`)输出后的 $B_t$ 乘以 $-1$ 的原因.