

OTA图像天体测量结果的WCS-SIP 参数表达*

平一鼎^{1,2†} 张 晨^{1,2,3‡} 鲁春林^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室 南京 210008)

(3 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 为了在OTA (Optical Telescopes Array)巡天项目中发现特定源的位置或者光度的变化, 需要将观测图像中的目标与星表或不同历元的历史数据进行交叉比对, 这就需要知道图像中目标的天球坐标. 一种基于矩阵计算的方法被用于将OTA已有的底片常数变换至WCS (World Coordinate System)和SIP (Simple Imaging Polynomial)参数, 并将这样的映射关系记录到OTA的FITS (Flexible Image Transport System)图像中以便于利用. 在此过程中改进了OTA的天体测量方法. 在此基础上对OTA天体测量中的一些问题进行了讨论.

关键词 天体测量学, 巡天, 技术: 图像处理

中图分类号: P129; **文献标识码:** A

1 引言

目前有很多以超新星、地外行星系统掩星、空间碎片等为主要科学目标的时域天文项目, 如ASAS (All Sky Automated Survey)^[1]、WASP (Wide Angle Search for Planets)^[2]等. 这些项目的共同特点是望远镜基本都是小口径的折射镜, 利用小口径望远镜易于实现大视场的特点, 用多个望远镜组成超大视场, 从而实现极高的巡天效率, 这样的项目一般被称为超大视场光学巡天(Ultra-Wide-Field Optical Survey)^[3]. 紫金山天文台位于云南、新疆和黑龙江的3个OTA (Optical Telescopes Array)也是这样的大型时域天文观测项目, 设计时主要着眼于空间碎片的探测, 其大视场、高天区覆盖和高时间分辨率的特点, 也适用于超新星探测等其他科学目标. 此外, 紫金山天文台还有目前正在建设的TST (Twelve Small Telescopes)项目, 由12台可变指向的28 cm口径望远镜组成, 每个望远镜的视场覆盖可达50平方度, 预计将于2017年建成并在姚安观测站投入观测.

在超大视场光学巡天项目中, 为了发现特定位置或者源的变化, 需要将观测图像中的目标与不同历元的观测或星表等已知数据进行交叉比对. 因此, 以较高的天体测量精

2016-11-10收到原稿, 2016-12-29收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11373071、11673070、11603082)资助

[†] ydping@pmo.ac.cn

[‡] zhangchen@pmo.ac.cn

度和简单方便的方式获取图像中目标的天球坐标是必不可少的. 此外, 例如利用天体测量软件SCAMP^[4]进行图像叠加的处理也必需图像坐标转换至天球坐标的先验信息. 通常在FITS (Flexible Image Transport System)图像文件中用一组关键字记录下反映这样的映射关系的参数, 使用通用的天文软件, 可以方便地从图像获取天球坐标. WCS (World Coordinate System)标准^[5-6]的一个目的就是记录表示图像坐标与天球坐标之间的映射关系, 通过一组预定义的FITS头关键字记录映射所需的参数.

目前常用的通用天体测量软件, 如WCSTools^[7]和SCAMP, 它们的天体测量结果都以WCS的形式进行表达, 同时软件也包含了一系列使用这些WCS信息的工具. 但是由于历史遗留问题, 这些软件对现行的WCS标准支持得并不好, 相互之间的标准也并不一致, 其差异主要表现在畸变的表达方面. WCSTools自定义了只有自己使用的CO_X_X参数组; 而SCAMP使用的PV_i_ma来源于2000年之前的WCS标准草稿, 目前与部分投影的参数冲突. 另一方面, 通用的天体测量软件为了保证大多数应用场景的有效性, 往往在极端条件下适应性比较差. 例如在本文中, OTA因其极端的大视场、欠采样、星场密度, WCSTools和SCAMP就难以胜任. 尤其在图像边缘, OTA从WCSTools和SCAMP获得的WCS参数的符合精度就非常差. 为了满足OTA的天体测量需求, 我们研究实现了一种高效的匹配算法, 并采用20常数的底片模型来表达实际图像与切平面坐标的偏离, 能够以较高的精度实现OTA的天体测量. 现在, 为方便利用OTA数据进行其他科学目标的研究, 本文按照现在较通行的规范, 将底片常数转换成的WCS保存在FITS图像中.

在OTA的天体测量中, 很重要的一个部分是高阶畸变的表示. WCS对图像畸变的表达有多种标准, 包括标准的Table Lookup Distortion^[8], 以及非标准的如ZPX¹、TNX²、SIP^[9] (Simple Imaging Polynomial). 经过比较, 我们选用了SIP畸变表达形式. SIP最早用于Spitzer的图像处理, 尽管并非WCS标准, 但由于其应用广泛, 包括WCSLIB³、astLib⁴、SAOImage DS9^[10]、Astrometry.net^[11]、Drizzle^[12]等软件都支持它, 可被认为是事实上的标准. SIP使用简单的多项式来表征天球坐标特定投影与实际图像坐标的转换关系, 计算和使用相对直观, 同时提供正反两组拟合参数, 可以快速进行正逆向映射计算, 因此是一个很好的选择.

本文利用矩阵运算将OTA的底片常数变换到SIP参数, 在此过程中对OTA的天文定位方法做了优化和改进, 同时通过SIP参数还考察了OTA图像的畸变并讨论了存在的问题. 在第2节中我们简要回顾了底片常数和SIP参数的定义; 第3节则描述了两种参数间变换的数学表示; 第4节详细论述了算法在OTA上的具体实现, 并对WCS-SIP参数的应用进行了讨论和分析; 第5节则是一个简短的总结和对将来工作的展望.

2 底片常数和SIP约定的定义

天文图像的天体测量本质上就是建立一个模型, 实现天球坐标与图像坐标间的对应关系. 首先通过心射投影, 将天球投影到一个以图像中心为切点的切平面上, 定义切点 (α_0, δ_0) 为切平面坐标原点, 以赤纬在切平面上的投影为 η 轴, ξ 轴与之垂直. 于是任意

¹ <http://fits.gsfc.nasa.gov/registry/zpxwcs.html>

² <http://fits.gsfc.nasa.gov/registry/tnx.html>

³ <http://www.atnf.csiro.au/people/mcalabre/WCS/>

⁴ <http://astlib.sourceforge.net/>

星像在切平面上的坐标^[13]

$$\begin{cases} \xi = \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \sin \delta + \cos \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0)} \\ \eta = \frac{\cos \delta_0 \sin \delta - \sin \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \sin \delta + \cos \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0)} \end{cases} \quad (1)$$

称为理想坐标. 随后建立理想坐标 (ξ, η) 和图像坐标 (x, y) 之间的关系, 该关系受到各种线性或非线性因素的影响, 其中有零点差、比例尺、旋转、底片倾斜、光学畸变等, 还有一些与星等和颜色相关的项. 在实际应用中, 一般将理想坐标与图像坐标建立一个多项式关系, 如下式:

$$\begin{cases} \xi = \sum_{p,q} a_{pq} x^p y^q \\ \eta = \sum_{p,q} b_{pq} x^p y^q \end{cases}, \quad p + q \leq N, \quad (2)$$

其中 a_{pq} 和 b_{pq} 为底片常数, p 和 q 分别为 x 和 y 的阶数, N 则为多项式阶数. 一般 N 越大, 拟合时内符合越好. 但是过高的阶数也会引入额外的模型误差, 使得模型对底片畸变的描述能力下降. 在OTA中, 我们采用了3阶即20常数的底片模型, 这一方面是因为OTA的大视场折射光学系统带来较为严重的畸变, 需要有较高阶的模型才能描述. 另一方面, 由于OTA的CCD拖尾问题(见第4节讨论), 图像定位精度在 $2''$ 至 $3''$ 左右, 因此并不能从更高阶数的底片常数中获得天体测量精度的收益.

在图像中得到参考星的测量坐标 (x, y) , 并将其与理想坐标 (ξ, η) 一起代入(2)式, 可拟合得到底片常数的值, 进而可以计算图像中任意位置所对应的天球坐标. WCS定义中的天球坐标的原点位于CRVAL1和CRVAL2, 相当于(1)式中的 (α_0, δ_0) , 所对应的图像坐标系的原点为CRPIX1和CRPIX2. 图1为WCS定义的世界坐标和像素坐标间的标准变换关系, 图中右侧为WCS标准中对各坐标的字母表示方法, 可以看到与我们常用的差别较大, 如用 (x, y) 来表示中间世界坐标, 即理想坐标, 这给我们的理解和应用带来了不便. 因此本文采用常见的表示方法, 对图像中任意一点的坐标以 (x, y) 表示, 理想坐标以 (ξ, η) 表示, 用

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{CD1.1} & \text{CD1.2} \\ \text{CD2.1} & \text{CD2.2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad (3)$$

定义从图像坐标到天球坐标的变换关系, 其中CD1.1等4项组成的**CD**矩阵表示底片的旋转、比例尺和倾斜, 相当于底片常数中的1阶项, X 、 Y 则为畸变改正后的图像坐标. 畸变用SIP参数表示, 定义 $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 为2阶及更高阶的畸变项, 则有^[9]:

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{CD1.1} & \text{CD1.2} \\ \text{CD2.1} & \text{CD2.2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x + f(x, y) \\ y + g(x, y) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} f(x, y) = \sum_{p, q} A_{p, q} x^p y^q, & 2 \leq p + q \leq A_ORDER \\ g(x, y) = \sum_{p, q} B_{p, q} x^p y^q, & 2 \leq p + q \leq B_ORDER \end{cases} \quad (5)$$

式中A_ORDER和B_ORDER是SIP约定中表示多项式阶数的关键字, 在SIP约定中可取值2至9, $A_{p, q}$ 和 $B_{p, q}$ 则为 $x^p y^q$ 的参数, 同时也是SIP约定中表示这些参数的关键字. 因此, **CD**矩阵和高阶畸变项一起, 定义了任一底片的图像坐标与理想坐标间的对应关系.

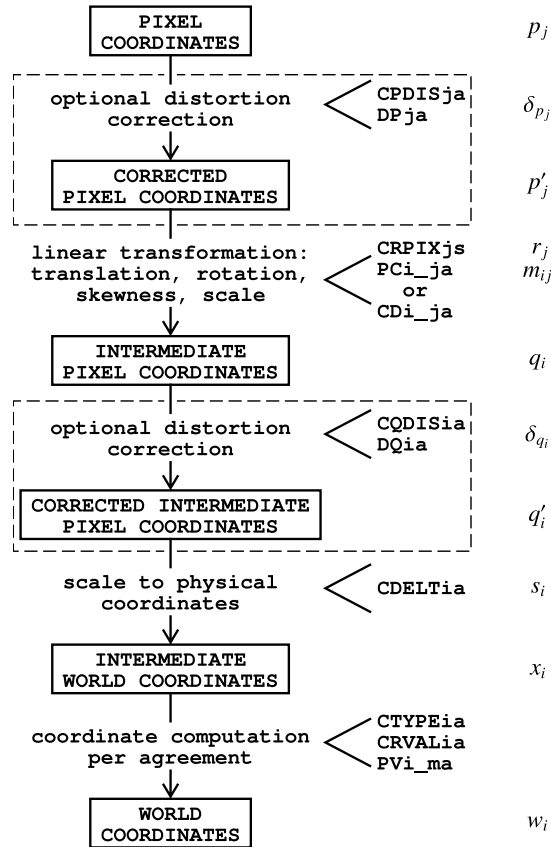


图 1 WCS标准定义下的从像素坐标到世界坐标的几个步骤^[5]

Fig. 1 Steps of conversion from the pixel coordinates to the world coordinates defined by the WCS standard^[5]

由底片常数和WCS-SIP关键字的定义可以看出: 两者都是用多项式来表示两个坐标系间的对应关系, 不同的是WCS-SIP中**CD**矩阵只包含了线性项, SIP则定义了2阶及更高阶的项. **CD**矩阵实际上定义的是一个修正过畸变后的图像与理想的切面投影的线性变换关系, 因此与畸变无关, 而在底片常数中, 这两者则是相关的. 此外, 底片常数中一般会有零阶项, WCS-SIP规范中则没有, 零阶项被吸收到了CRVAL1、CRVAL2和CRPIX1、CRPIX2这两组关键字中.

3 底片常数与SIP的变换

以下建立底片常数与SIP的变换关系. 将(2)式展开后得到:

$$\begin{cases} \xi = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + \cdots + a_{pq}x^p y^q \\ \eta = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y + \cdots + b_{pq}x^p y^q \end{cases}. \quad (6)$$

忽略零阶项, 因为这可以通过坐标平移被 (ξ, η) 吸收, 则上式变为:

$$\begin{cases} \xi = a_{10}x + a_{01}y + \cdots + a_{pq}x^p y^q \\ \eta = b_{10}x + b_{01}y + \cdots + b_{pq}x^p y^q \end{cases}, \quad p + q \leq N. \quad (7)$$

将其矩阵化后可得:

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{10} & a_{01} \\ b_{10} & b_{01} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \mathbf{PC} \times \mathbf{XY}^T, \quad (8)$$

其中向量 $\mathbf{XY} = (y^2 \ y^3 \ xy \ xy^2 \ x^2 \ x^2y \ x^3)$, $\mathbf{PC}$ 则为与 $\mathbf{XY}$ 对应的底片常数组成的矩阵. 将(4)式展开后得到:

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{CD1.1} & \text{CD1.2} \\ \text{CD2.1} & \text{CD2.2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{CD1.1} & \text{CD1.2} \\ \text{CD2.1} & \text{CD2.2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f(x, y) \\ g(x, y) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

通过比较易知, $\mathbf{CD}$ 矩阵与底片常数的线性项有简单的对应关系:

$$\mathbf{CD} = \begin{pmatrix} \text{CD1.1} & \text{CD1.2} \\ \text{CD2.1} & \text{CD2.2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{10} & a_{01} \\ b_{10} & b_{01} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

因此, 我们可以通过改进底片常数的计算过程将零阶项吸收到 (ξ, η) 和 (x, y) 的坐标原点设置中去, 进而得到 $\mathbf{CD}$ 矩阵的值. 而对于高阶项来说, 通过比较可得:

$$\mathbf{CD} \times \mathbf{SIP} \times \mathbf{XY}^T = \mathbf{PC} \times \mathbf{XY}^T, \quad (11)$$

其中 $\mathbf{SIP} = \begin{pmatrix} \text{A.0.2} & \text{A.0.3} & \text{A.1.1} & \text{A.1.2} & \text{A.2.0} & \text{A.2.1} & \text{A.3.0} \\ \text{B.0.2} & \text{B.0.3} & \text{B.1.1} & \text{B.1.2} & \text{B.2.0} & \text{B.2.1} & \text{B.3.0} \end{pmatrix}$, 等式两边同乘 $\mathbf{CD}$ 的逆矩阵 $\mathbf{CD}^{-1}$ 可得:

$$\mathbf{SIP} = \mathbf{CD}^{-1} \times \mathbf{PC}. \quad (12)$$

这样, 我们就可以将底片常数通过消除零阶项和矩阵运算得到 $\mathbf{CD}$ 矩阵和 $\mathbf{SIP}$ 矩阵.

4 OTA的天体测量和SIP计算以及分析

OTA的天体测量由我们自己开发的工具处理, 程序的基本流程包括:

(1)恒星星表位置到站心视位置的变换, 并做大气折射的改正;

(2)由第(1)步结果以及望远镜的指向、旋转、比例尺等已知信息,估计参考星的图像位置;

(3)将第(2)步得到的结果与图像的场星进行匹配,出于实时性考虑,采用相近原则;

(4)利用匹配后的参考星J2000坐标系下的理想坐标和图像坐标拟合底片常数.

程序可给出从底片图像坐标至J2000天球坐标的底片常数,且这部分工作由观测软件实时完成. 通过以上讨论可知: 为实现底片常数到WCS-SIP参数的变换,必须使零阶项为0. 因此,我们改进了天文定位的算法,在已有的底片常数计算完成后,由(5)式以及

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 + \arctan\left(\frac{\xi \sec \delta_0}{1 - \eta \tan \delta_0}\right) \\ \delta = \arctan\left[\frac{\eta + \tan \delta_0}{1 - \eta \tan \delta_0} \cos(\alpha - \alpha_0)\right] \end{cases} \quad (13)$$

计算得到底片中心即图像坐标原点的天球位置. 将该位置作为初始量代入(1)式重新计算切平面坐标,并重新进行上述计算流程. 循环执行该过程,直至底片常数的零阶项 a_{00} 、 b_{00} 小于某个设定的小量. 此时,图像原点(CRPIX1, CRPIX2)对应的天球坐标即可认为是其所对应的图像天球坐标的原点(CRVAL1, CRVAL2). 实际计算中,以上过程一般迭代五六次即可收敛.

此外,利用这些循环,我们还可以利用切平面坐标到图像坐标的逆变换

$$\begin{cases} x = a'_{00} + a'_{10}\xi + a'_{01}\eta + \cdots + a'_{pq}\xi^p\eta^q \\ y = b'_{00} + b'_{10}\xi + b'_{01}\eta + \cdots + b'_{pq}\xi^p\eta^q \end{cases} \quad (14)$$

来提高参考星的图像位置预测精度及其与场星的匹配准确率,从而提高底片常数的精度. 如不进行迭代过程,总会有错误匹配的结果进入参数拟合的样本,降低拟合精度.

在得到零阶项为0的底片常数后,我们即可通过(10)式的定义由底片常数的一阶项得到**CD**矩阵. 同时由(12)式,将**CD**矩阵的逆矩阵叉乘**PC**矩阵可得到**SIP**矩阵,将CRVALn系数、CRPIXn系数、CD系数和SIP系数写到FITS文件头中,即完成了一幅图像的WCS-SIP参数的计算和设置. 一个典型的OTA图像的SIP参数头如表1.

这样,对于图像中任意一个目标,只要通过任意图像处理软件得到其图像坐标,即可利用(3)式得到目标的切平面坐标,或是由

$$\mathbf{PC} = \mathbf{CD} \times \mathbf{SIP} \quad (15)$$

得到底片常数并计算切平面坐标. 随后可由(13)式得到其天球坐标. 这样的图像文件不但可以在SAOImage DS9中自动将图像坐标实时地变换为天球坐标,还受到SWarp、Drizzle等图像处理软件包的支持,因此可以给OTA巡天的目标搜索、比对和其他研究工作带来很大方便.

由以上讨论可以看出, SIP的精度事实上就是底片常数计算的精度. 长期的实时观测结果表明: OTA实时的底片常数拟合的内符合精度大约为 $2''-3''$. 考虑到 $20''/\text{pixel}$ 的低分辨率,这样的精度可以满足空间碎片定位的需要. 但是如果要进行其他天文目标的交叉比对,则还存在其他的定位精度问题,原因如图2. 从图中可以看到, OTA星像存

在严重的拖尾问题. 这是由于OTA所用相机为快门常开的全帧CCD相机, 其工作机制决定了CCD会在行转移和CCD清零时持续对恒星露光, 从而产生拖尾现象. 拖尾的亮度是行转移速度和恒星亮度的函数, 因此有两个效应: 一是露光时间越短, 拖尾越明显, 如OTA典型的露光时间为数百毫秒, 此时每一行转移的时间相对露光时间就不是小量了; 二是恒星越亮, 造成的拖尾就越强烈, 此时不但其自身的定位精度会受到很大影响, 更会对其拖尾痕迹上的其他星像的定位精度造成影响.

表 1 一组典型的保存于OTA的FITS文件中的WCS-SIP参数

Table 1 A typical set of the WCS-SIP coefficients saved in the OTA's FITS file

Keyword	Value	Keyword	Value
CTYPE1	'RA—TAN-SIP'	CTYPE2	'DEC—TAN-SIP'
CRVAL1	83.8714335073705	CRVAL2	16.1890557575429
CRPIX1	1024.5	CRPIX2	1024.5
CD_1.1	0.0020086509250521903	CD_2.1	-0.00507876182622787
CD_1.2	-0.0050981480368199	CD_2.2	-0.00201636125652575
A_ORDER	3	B_ORDER	3
A_0.2	$-4.1730955514514 \times 10^7$	B_0.2	$4.73679128806086 \times 10^7$
A_0.3	$1.99311379052302 \times 10^9$	B_0.3	$3.83079438118896 \times 10^9$
A_1.1	$3.98438962011002 \times 10^7$	B_1.1	$9.13108231203593 \times 10^7$
A_1.2	$3.86832437002312 \times 10^9$	B_1.2	$-1.17246412634033 \times 10^9$
A_2.0	$-2.79893848825741 \times 10^7$	B_2.0	$1.85326133429729 \times 10^7$
A_2.1	$-1.00452696195867 \times 10^9$	B_2.1	$1.62298185567068 \times 10^9$
A_3.0	$6.54100405968168 \times 10^9$	B_3.0	$-9.66839449191326 \times 10^{10}$

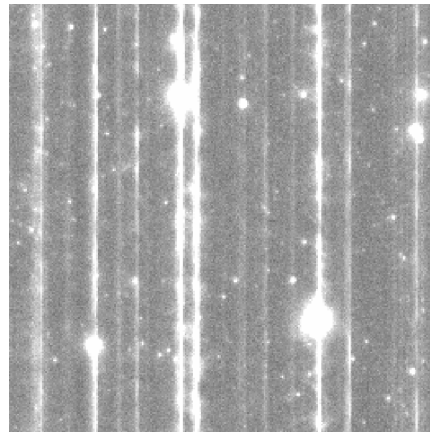


图 2 OTA的CCD图像拖尾

Fig. 2 A smeared CCD image of OTA

尽管有很多方法可以有效处理拖尾^[14-15], 但是精度的损失难以避免, 尤其是亮星. 因此, 我们在进行OTA天文定位时, 都会避免选用这些亮星或是受其影响的其他星作为标准星, 且有大量参考星参与拟合, 因此天体测量精度及WCS-SIP参数的精度可以达到较好的水平. 但是由于恒星星像有非常高的概率受到自身或是其他恒星的拖尾影响, 对于单个目标最终定位精度大约只能保证优于 $10''$. 因此, 在应用WCS-SIP参数将OTA数据与星表或历史数据进行交叉比对时, 必须考虑这一点而放大门限, 并非常小心.

SIP参数表征了图像的畸变, 因此我们还可以利用其来考察OTA图像的畸变情况, 由(5)式可得到任意点在图像坐标两个方向上的畸变量. 将 $2k \times 2k$ 的图像以 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 进行分割, 得到大小为 32×32 的网格, 利用SIP计算每个网格单元内的平均畸变量, 如图3, 其中图3a中的箭头表示该位置图像畸变的方向, 其线段的长度表示畸变的大小, 我们放大了畸变量的比例以便更清晰地观察. 图3b中用不同颜色表示图像中各位置的畸变的大小, 右侧的色棒单位为角秒, 并在图中画出了等高线. 从图中可以看到畸变基本呈中心对称分布, 且随至图像中心的距离变大而变大. 尤其是在图像角部畸变量增长得很快, 最大可达 $20''$ 左右. 需要注意的是: 图中的畸变并不仅仅是光学系统产生的, 还包含了大气折射的效应, 由于OTA的超大视场, 该效应无法忽略. 因此, 从图3b的等高线形态中可以较清楚地看到存在一个上下拉长的效应.

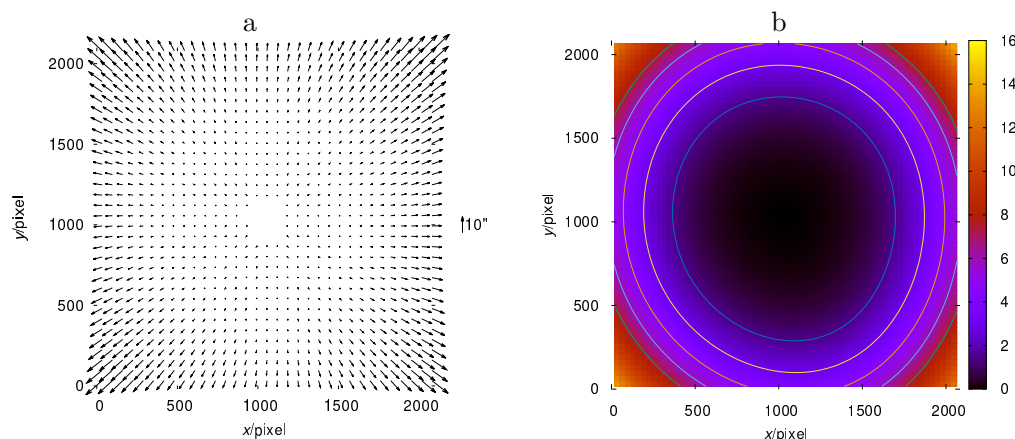


图 3 OTA 的图像畸变

Fig. 3 The image distortion of OTA

5 结论和展望

通过本文的工作, 我们可以将在OTA运行过程中产生的底片常数变换为WCS-SIP参数, 并将它们写入到OTA存储的FITS文件头中. 这样, 在利用OTA图像进行与星表的交叉比对、新目标搜索的过程中, 需要对感兴趣目标定位时, 可以方便地得到天体的天球坐标, 不再需要重复进行天体测量的工作. 在此过程中, 我们还改进了参考星与图像中星像的匹配方法, 通过有限的几次迭代提高匹配的正确性, 并由此提高了底片常数和WCS-SIP参数的精度. 此外, 本文的方法对其他天文图像, 尤其是大视场巡天设备的图像也适用. 这样其他研究者在使用这些图像时可以通过WCS-SIP关键字直接利用

已有的天体测量结果, 从而避免重复工作. 由于SIP关键字最高可扩展到9阶, 可以保证在应用这些图像时获得足够高的天体测量精度, 当然, 这需要提高底片常数的阶数并扩充(12)式中的**SIP**矩阵和**PC**矩阵. 在本文的工作过程中我们还发现: OTA图像中亮星的拖尾对其自身和在其拖尾上的其他目标的定心精度的影响非常大. 因此对于OTA的观测目标来说, 最终影响其定位精度的关键是其是否受拖尾影响. 这对于目标的比对, 新目标的发现, 乃至天体测量精度, 都有非常大的影响. 在后续的工作中, 我们也将尝试各种图像处理方法来提高星像的定心精度, 从而提高OTA图像的天体测量精度.

参考文献

- [1] Pojmanski G. *AcA*, 2002, 52: 397
- [2] Kane S R, Horne K, Street R A, et al. *Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2003, 294: 387
- [3] Brett D R, West R G, Wheatley P J. *MNRAS*, 2004, 353: 369
- [4] Bertin E. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2006, 351: 112
- [5] Greisen E W, Calabretta M R. *A&A*, 2002, 395: 1061
- [6] Calabretta M R, Greisen E W. *A&A*, 2002, 395: 1077
- [7] Mink D J. *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1997, 125: 249
- [8] Calabretta M R, Valdes F, Greisen E W, et al. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIII*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2004, 314: 551
- [9] Shupe D L, Moshir M, Li J, et al. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2005, 347: 491
- [10] Joye W A, Mandel E. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XII*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2003, 295: 489
- [11] Lang D, Hogg D W, Mierle K, et al. *AJ*, 2010, 139: 1782
- [12] Fruchter A S, Hook R N. *PASP*, 2002, 114: 144
- [13] Tang Z H, van Altena W F. *From Measures to Celestial Coordinates* // van Altena W F. *Astrometry for Astrophysics: Methods, Models, and Applications*. New York: Cambridge University Press, 2013: 277-296
- [14] 孙荣煜, 赵长印, 平一鼎, 等. *天文学报*, 2012, 53: 80
- [15] Sun R Y, Zhao C Y, Ping Y D, et al. *ChA&A*, 2012, 36: 340

The Representation of OTA Images' Astrometric Results with WCS-SIP Coefficients

PING Yi-ding^{1,2} ZHANG Chen^{1,2,3} LU Chun-lin^{1,2}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2 Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(3 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT Cross-matching the sources extracted from observed images with reference catalogs or earlier records is a necessary procedure for seeking the variation of sources in terms of position or brightness for the Optical Telescopes Array (OTA) survey. Knowing the celestial positions of these objects on images is prerequisite therefore. A method based on matrix manipulation is applied to transform the existing calculated plate constants of OTA images into World Coordinate System (WCS) coefficients and Simple Imaging Polynomial (SIP) coefficients, which map image positions into celestial positions so as to facilitate the mining of the FITS (Flexible Image Transport System) images of OTA. An improvement of OTA's astrometry coming with this method, as well as the discussion about some problems of OTA's astrometry are also presented.

Key words astrometry, surveys, techniques: image processing