

数字天顶摄影仪确定垂线偏差及其精度分析

郭金运^{1,2} 宋来勇^{1,2} 常晓涛^{2,3} 刘新^{1,2}

(1 山东科技大学测绘学院, 青岛市前湾港路 579 号, 266510)

(2 海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室, 青岛市前湾港路 579 号, 266510)

(3 国家测绘局卫星测绘应用中心, 北京市莲花池西路 28 号, 100830)

摘要: 给出了数字天顶摄影仪的基本结构和垂线偏差测量的基本算法, 结合仪器和测量过程, 分析了垂线偏差测量误差。数字天顶摄影仪的自动化程度和测量精度都高于传统的天文大地测量。

关键词: 垂线偏差; 数字天顶摄影仪; 天文大地测量; 误差分析; CCD

中图法分类号: P128.1

垂线偏差作为一类基本大地测量观测量, 在天文大地测量中具有重要作用^[1], 而垂线偏差测量的主要仪器——数字天顶摄影仪的研究在我国才刚起步。根据天文大地测量理论, 在分析数字天顶摄影仪的基本结构和测量原理的基础上, 本文给出了垂线偏差测量的误差源, 并进行了误差预计。

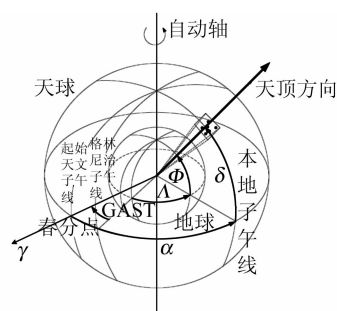


图 1 垂线偏差测量基本原理

Fig. 1 Basic Principle to Measure Vertical Deflection

1 垂线偏差的天文大地测量原理

如图 1 所示, 设在地球表面 P 点安置数字天顶摄影仪对天顶恒星场进行照相, 那么, P 点的天文坐标 (Φ, Λ) 就给出了过 P 点的铅垂线方向^[2]。根据天文学原理, P 点的天文坐标和天顶赤道坐标 (δ, α) 之间的关系为:

$$\Phi = \delta \quad (1)$$

$$\Lambda = \alpha - \text{GAST} \quad (2)$$

式中, GAST 是 Greenwich 时角。利用 GPS 技术可以精确测定 P 点的大地坐标 (φ, λ) , 那么, P 点的 Helmert 垂线偏差^[3]为:

$$\xi_H = \Phi - \varphi \quad (3)$$

$$\eta_H = (\Lambda - \lambda) \cos \varphi \quad (4)$$

1.1 测时

由式(2)计算天文经度时需要观测历元的

GAST。充分利用 GPS 的精确测时功能, 计算 GAST。GPS 时(GPST)的原点在 1980 年 1 月 6 日 0 时, 与协调世界时(UTC)一致。在天文大地测量中, 经常用到 UT1, 即经过极移改正的世界时。IERS 也公告了 UTC 与 UT1 之间的差异 dUT1, 因此,

$$\text{UT1} = \text{GPST} + (19 - n)s + \text{dUT1} \quad (5)$$

式中, n 为由 IERS 公告的闰秒参数。

由 UT1 就可以计算平恒星时 GMST^[4], 即

$$\begin{aligned} \text{GMST} = & 24\,110.548\,41s + 8\,640\,184.812\,866sT \\ & + 0.093\,104sT^2 - 6.2s \times 10^{-6}T^3 + \\ & \text{UT1}(1.002\,737\,909\,350\,795 + 5.900\,6 \times \\ & 10^{-11}T - 5.9 \times 10^{-15}T^2) \end{aligned} \quad (6)$$

收稿日期: 2011-07-18。

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(40974016, 40974004); 国家 863 计划资助项目(2009AA121405); 山东省泰山学者建设工程专项基金资助项目(TSXZ0502); 海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室开放基金资助项目(2009A02); 山东科技大学科研创新团队支持计划资助项目; 国家测绘局科技发展计划资助项目。

式中, T 为 UT1 的 0 时对应的以 J2000.0 为标准历元的儒略世纪数。

根据二分点方程, 由 GMST 计算 GAST:

$$GAST = GMST + \Delta\psi \cos\epsilon + 0.002\ 64'' \sin\Omega + 0.000\ 063'' \sin 2\Omega \quad (7)$$

式中, $\Delta\psi$ 为经向章动; ϵ 为黄赤交角; Ω 为月球升交点平经。实际作业中, 由 GPS 时间型接收机测量 GPS 时号, 由式(5)~(7)就可以得到观测历元对应的 GAST。如果再测量出赤道坐标(δ, α), 由式(1)、(2)就可以计算天文坐标, 从而确定铅垂线的方向。然后, 由 GPS 测量大地坐标, 根据式(3)、(4)就可以计算出垂线偏差。

1.2 CCD 星像亚像素定位和星像识别

如何确定式(1)、(2)中的天顶赤道坐标? 如图 1 所示, 在测站天顶恒星场中很少有正好过天顶的恒星。由于测站天顶点没有相应恒星标识, 因此, 天顶方向只能由 CCD 成像的天顶恒星通过内插得到。首先, 对 CCD 成像的恒星影像进行处理^[5], 通过与精密恒星星表进行配准, 实现恒星识别, 通过内插确定天顶赤道坐标。

精确确定星像的能量中心是 CCD 图像处理的第一步。为了提高 CCD 星像的信噪比, 采用小波滤波消除或者减弱背景噪声。采用矩分析方法或者点扩散函数拟合法^[6]对恒星影像进行处理, 通过二维修正矩方法实现亚像素精确定位, 使得恒星能量中心定位精度达到亚像素精度。同时, 计算每个恒星成像的灰度值, 根据灰度值由高到低对成像恒星进行排序。

为了识别 CCD 成像恒星, 要确定测站天顶附近的恒星场。通过 GPS 测量测站大地坐标, 由于垂线偏差数值较小, 可以近似认为测站天文坐标初值等于大地坐标, 根据曝光历元对应的 GAST, 由式(1)、(2)就可以计算天顶的近似赤道坐标(δ_0, α_0)。在恒星星表(如 UCAC 或者 Tycho-2)中, 以(δ_0, α_0)为中心, 以望远镜视场角为基础, 找到暗至 14 等的恒星, 构成天顶恒星场。然后, 将恒星场根据亮度分为两类, 暗至 10 等或者 11 等的恒星作为基本星, 其他恒星作为一般参考星。

由于基本星较为明亮, 其 CCD 影像的灰度值一般比较大, 因此, 可以根据灰度从排好序的恒星影像中选择基本星对应的星像组。为了做到恒星与成像一一对应, 可以采用 Voronoi 图法^[7]进行配准。首先, 将恒星投影到以 $Q(\delta_0, \alpha_0)$ 为切点的天球切平面上, 得到在切平面坐标系中恒星的坐标(l, m), 投影变换公式为:

$$l = \frac{\tan(\alpha - \alpha_0) \cos q}{\cos(q - \delta_0)} \quad (8)$$

$$m = \tan(q - \delta_0) \quad (9)$$

式中, $\cot q = \cot \delta \cos(\alpha - \alpha_0)$; $\delta_0 = \varphi$; $\alpha_0 = \lambda + GAST$ 。

由于垂线偏差比较小, 因此, 切平面与 CCD 像平面近似平行。在切平面中, 基本星组连接构成一个 Voronoi 图; 在 CCD 像平面上, 基本星影像组也连接成 Voronoi 图。根据图论, 通过对两个图进行对比分析, 快速实现基本参考恒星和影像之间的配准和识别。

基本星数量一般有 5~10 颗, 它们构成了一般参考星配对识别的控制, 根据切平面上基本星和一般参考星之间的关系, 很容易实现一般参考星与其 CCD 影像的一一对应。

1.3 天顶天文坐标计算

在 CCD 影像坐标系中, 成像的恒星坐标为(x, y)。恒星赤道坐标属于球坐标系, 为了建立赤道坐标与影像平面坐标之间的转换关系, 将赤道坐标投影到过天顶与天球相切的切平面上, 建立切平面坐标系(l, m), 其中, 天顶是由 GPS 测量结果导出的近似天顶。

根据摄影测量中心投影构像方程^[8], 由 CCD 影像坐标计算切平面坐标的公式为:

$$l = \frac{a_{11} + a_{12}x + a_{13}y}{1 + a_{31}x + a_{32}y} \quad (10)$$

$$m = \frac{a_{21} + a_{22}x + a_{23}y}{1 + a_{31}x + a_{32}y} \quad (11)$$

式中, a_{ij} 为坐标变换系数。由于测站天顶视场较小, 认为这些变换系数在一次成像中是不变的。在一次观测中, CCD 成像中大约有 40~100 颗暗至 14 等的恒星。对于第 j 颗恒星, 由式(8)~(11)构成观测方程, 即

$$\frac{\tan(\alpha_j - \alpha_0) \cos q_j}{\cos(q_j - \delta_0)} = \frac{a_{11} + a_{12}x_j + a_{13}y_j}{1 + a_{31}x_j + a_{32}y_j} \quad (12)$$

$$\tan(q_j - \delta_0) = \frac{a_{21} + a_{22}x_j + a_{23}y_j}{1 + a_{31}x_j + a_{32}y_j} \quad (13)$$

式中, $j = 1, 2, \dots, n$, n 为 CCD 观测的恒星数量; $\cot q_j = \cot \delta_j \cos(\alpha_j - \alpha_0)$; a_{ij} 为待求未知参数。恒星精密星历(α_j, δ_j)可以从恒星星表中精确获得, CCD 星像坐标(x_j, y_j)可通过亚像素精确定位获得。因此, 式(12)、(13)中只有 8 个未知参数, 通过线性化处理, 利用最小二乘法求解坐标变换系数。

求解出坐标转换参数后, 将已知的望远镜光轴即铅垂线在 CCD 影像坐标系中的坐标代入式(10)、(11)就可以得到铅垂线的切平面坐标, 然

后,利用式(8)、(9)的逆运算,就可以得到天顶点的赤道坐标。

上述过程中,是以 GPS 测量结果求解近似天顶建立的切平面。为了精化解算结果,以最新计算的天顶点赤道坐标作为切点 Q 的赤道坐标,重复上述过程,再次计算天顶点的赤道坐标。当相邻两次迭代计算的赤道坐标之差满足预设阈值时,最后两次计算结果取平均作为该次观测的天顶赤道坐标,代入式(1)、(2)计算天顶的天文坐标。

1.4 GPS 大地测量

GPS 作为全球导航卫星系统的代表,不仅具有全天候和连续的精密三维导航和定位能力,而且具有良好的抗干扰性和可靠性^[4]。GPS 绝对定位是以 GPS 卫星和用户接收机天线之间的距离为基础,根据已知的卫星瞬时坐标来确定用户接收机天线所对应的点位,其实质是测量学中的空间距离后方交会。GPS 绝对定位受到卫星轨道误差、钟差和信号传播等诸多因素的影响,其定位精度只有 m 级。为了提高定位精度,在测量中通常利用差分 GPS 技术,采用相对定位方法,即两个或者多个测站同步观测相同卫星,那么卫星的轨道误差、卫星钟差、接收机钟差以及电离层和对流层的折射误差等对观测的影响具有一定的相关性^[9],可以有效消除或者减弱上述误差的影响,因此,差分 GPS 定位精度达到 dm 级,甚至 cm/mm 量级。利用差分 GPS 精确测定测站的大地坐标 (φ, λ) ,代入式(3)、(4)就可以计算出 Helmert 垂线偏差。

2 基本结构

数字天顶摄影测量系统主要由 CCD 传感器、光学望远镜、置平装置、伺服马达、GPS 接收机、电源、控制单元、数据采集和数据交换单元及计算机等组成,如图 2 所示。

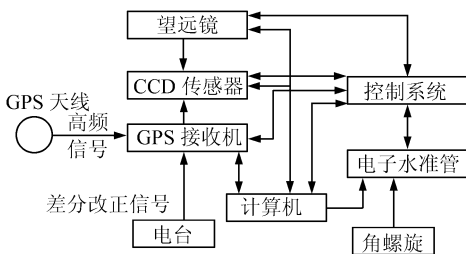


图 2 系统基本结构图

Fig. 2 Basic Frame of Digital Zenith Camera

CCD 传感器代替传统的摄影底片,位于焦平面上,是对恒星成像的主要部件。CCD 传感器具有增强的光敏性,通过望远镜和 CCD 集成可以对暗至 14 等的恒星成像。CCD 传感器安装有电子机械快门,以 GPS 时号控制曝光时间和标识曝光历元,曝光时间为 0.2~1 s。

由于 GPS 时间信号精度很高,因此,应用 GPS 测时功能可以精确标识曝光历元。在 GPS 时间尺度上,由逻辑 TTL 脉冲控制 CCD 电子机械快门。同时,采用差分 GPS 技术精确测定大地坐标。

在曝光之前,用正交安置的高分辨率电子水准管(倾斜仪)置平系统。整平之后,望远镜光轴与铅垂线之间还存在微小的偏差。曝光时,倾斜仪测量望远镜光轴相对于铅垂线的偏差,用于观测结果改正。

系统有 5 个伺服马达,其中 3 个安装在置平角螺旋上部的垂直位置,实现自动置平。置平时,两个正交安置的电子水准管测量出望远镜光轴和铅垂线之间的夹角。在计算机控制下,通过置平马达,逐渐减小该夹角,使得望远镜自动指向铅垂线方向。整平后,系统空间姿态相对于真正的铅垂线误差有 1"~3"。另外 2 个马达用于观测前的自动聚焦和观测过程中相机观测方位的变换。整个过程实现了完全自动化,可以有效减少人工操作的影响,提高观测效率。

3 测量误差分析

利用数字天顶摄影仪测量垂线偏差的基本过程为安置仪器、精平、CCD 成像、GPS 定位,最后经过数据处理计算最终结果。其随机误差主要有倾斜改正、曝光历元标识、恒星影像处理与识别、GPS 确定大地坐标等;系统误差主要有 CCD 零漂、电子水准管零漂、恒星星表和 CCD 快门延迟等。

CCD 的像素一般为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$,通过亚像素分割可以实现 0.05~0.1 像素定位精度,对应精度为 0.03"。CCD 快门控制精度为 1 ms,曝光时间为 0.2~1 s。在地球自转影响下,恒星成像可能不是圆,CCD 恒星成像还受到大气闪闪影响,采用矩分析或者点扩散函数拟合法处理,这样,单一恒星方向确定精度为 0.2"。在 CCD 一次曝光中,成像恒星大约有 40~100 颗。那么,通过内插得到望远镜主轴的精度优于 0.15"。在不理想的大气条件下,有较大的大气闪闪,内插精度会

降低,可能只有 $0.2''$ 。

大气反常折射是利用数字天顶摄影仪测量垂线偏差的主要误差来源,测站上方等密度倾斜大气层导致异常折射,即使是天顶方向也存在大气反常折射,其影响引起观测恒星场的附加角位移,幅度达到 $0.05''\sim 0.2''$ 量级^[10]。在较短时间尺度上,大气反常折射呈现系统误差特性;在较大时间尺度上,反常折射被视为随机误差。目前还没有精确的大气反常折射模型,还无法消除反常折射影响^[11]。反常折射对整晚垂线偏差测量精度影响为 $0.04''\sim 0.05''$ 。对不同晚上的观测进行平均,可以消除部分异常折射影响。

高密度、高精度星表主要有 UCAC^[12] 和 Tycho-2^[13],两个星表提供了 200 多万颗暗至 14 等的恒星,外符精度达到 $0.02''\sim 0.1''$ 。由 UCAC 星表给出的参考恒星位置精度为 $0.02''\sim 0.07''$,主要依赖于星等。UCAC 星表给出的参考恒星位置有小的系统误差,振幅大约为 $0.01''$,不影响垂线偏差测量。Tycho-2 星表没有系统误差。

用于曝光控制的 CCD 成像装置的电子机械快门连接于 GPS 接收机,采用 GPS 时号标识曝光历元。使用电子机械快门要求对其运动特性进行全面校准,它是温度的函数。历元标识过程的精度受限于快门校准而不是 GPS 测时能力,GPS 测时精度可以达到几十 ns。顾及硬件延迟,历元标识精度只有 1 ms,对应的天文经度误差为 $0.015''$ 。采用差分 GPS 技术确定的大地坐标精度可达到 dm、甚至 cm/mm 量级,对应的垂线偏差精度优于 $0.01''$,可以忽略其误差影响。

仪器水平程度是限制传统天文大地测量仪器测量精度的重要因素之一。数字天顶摄影仪中使用高分辨率的电子水准管进行精平,同时,采用这些传感器测量观测时的倾斜并进行改正,其精度达到 $0.04''\sim 0.05''$ 。为了获得较低的噪声水平,电子水准管的尺度因子通过水银盘进行精确校准,采用仿射模型计算倾斜改正,通过一定的观测策略消除零漂影响。

4 结 语

本文对基于数字天顶摄影仪的垂线偏差测量误差进行了分析,认为测量精度可以达到 $0.3''$ 。Hannover 大学研制了一套数字天顶摄影仪 TZK2-D,在 Hannover 进行了测试^[14],其结果与本文的分析结果基本一致。

参 考 文 献

- [1] 宁津生,郭春喜,王斌,等. 我国陆地垂线偏差精化计算[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(12):1 035-1 038
- [2] Hirt T C, Bürki B. Status of Geodetic Astronomy at the Beginning of the 21st Century[R]. Wiss Arb Fach Geodäsie und Geoinformatik der Univ, Hannover, 2006
- [3] Jekeli C. An Analysis of Vertical Deflections Derived from High-Degree Spherical Harmonic Models[J]. J Geod, 1999, 73(1):10-22
- [4] Leick A. GPS Satellite Surveying [M]. Hoboken: John Wiley & Sons. Inc., 2004
- [5] 曾志雄,胡晓东,谷林,等. 数字天顶摄影仪的图像处理[J]. 光子学报,2004, 33(2):248-251
- [6] Hirt C. Entwicklung Und Erprobung Eines Digitalen Zenitkamasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung[R]. Nr 253, Wissen Arb Fach Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Hannover, 2004
- [7] 孙焘,王秀坤,邵刚,等. 基于 Voronoi 图表和进化策略的图像特征点配准方法[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(3):443-448
- [8] 林君建,苍桂华. 摄影测量学[M]. 北京:国防工业出版社,2005
- [9] 郭金运,黄金维,曾子榜,等. 基于 IGS 跟踪站的高频 GPS 卫星时钟改正确定[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2008,33(7):706-710
- [10] Hirt C. Monitoring and Analysis of Anomalous Refraction Using a Digital Zenith Camera System[J]. Astronomy & Astrophysics, 2006, 459:283-290
- [11] 冒蔚,铁琼仙,杨磊. 天文大气折射[M]. 昆明:云南科技出版社,2004
- [12] Zacharias N, Urban S E, Zacharias M I, et al. The Second US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog(UCAC2)[J]. The Astronomical Journal, 2004, 127:3 043-3 059
- [13] Høg E, Fabricius C, Makarov V V, et al. The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars[J]. Astronomy and Astrophysics, 2000, 355:27-30
- [14] Hirt C, Seeber G. Accuracy Analysis of Vertical Deflection Data Observed with the Hannover Digital Zenith Camera System TZK2-D[J]. J Geod, 2008, 82:347-356

第一作者简介:郭金运,博士,教授,博士生导师,主要从事空间大地测量和天文地球动力学等研究。
E-mail:jinyunguo1@126.com

(下转第 1101 页)