



数字化天顶望远镜观测图像及数据处理

王博*, 田立丽, 王政, 尹志强, 刘卫东, 乔琪源, 王红旗, 韩延本

中国科学院国家天文台, 北京 100012

* 联系人, E-mail: bwang@bao.ac.cn

2013-07-12 收稿, 2013-11-06 接受, 2014-03-26 网络版发表

摘要 中国科学院国家天文台与山东科技大学合作, 于 2011 年底成功研制出了中国第一台数字化天顶望远镜样机(DZT-1). 与经典天体测量望远镜相比, DZT-1 具有体积小、自动化程度高和测量精度高的优点. 可用于经典的天体测量观测和大地测量领域的垂线变化及垂线偏差观测, 在天文学及地球科学相关领域具有重要意义. DZT-1 的测量原理和方法与经典的照相天顶筒有某些类似, 但又有较大区别. 本文主要介绍 DZT-1 观测恒星位置图像及数据的处理原理、方法和过程, 介绍利用观测资料实时归算出天文经纬度的应用软件, 以及该应用软件的特点和使用方法. 最后介绍了该仪器的试观测情况及试观测结果. 试观测结果表明, 该仪器的单次观测精度可达 $0.2''\sim 0.3''$, 单组观测精度为 $0.07''\sim 0.08''$. 所编写的数据处理软件满足 DZT-1 观测图像及数据处理的要求, 为仪器的自动化及高精度测量提供了保证.

关键词

天体测量
垂线变化
垂线偏差
DZT-1
天文经纬度

20 世纪 80~90 年代, 随着空间测地技术的发展, 经典的地面光学测地技术在提供地球自转参数(ERP)服务方面的作用被 VLBI(甚长基线干涉测量)^[1~5], SLR(卫星激光测距), LLR(激光测月)及 GPS 等新技术所取代^[6], 世界上多数经典地面光学测地望远镜先后退役, 我国的情况也是如此. 各种地面光学测地技术的基本原理是通过恒星方向的测量确定测站铅垂线在天球坐标系中的指向, 而 VLBI 等新技术的基本原理则是测量天体到测站的距离或同一天体到两测站的距离差. 后者的测量精度比前者约提高 2 个数量级, 但这些技术与测站铅垂线无关. 然而地面点的垂线方向的变化信息是对地球内部物质分布变化的反应, 这些信息在天文学与地球科学的交叉研究与应用中有重要意义^[7~13]. 鉴于多数经典光学测地仪器比较笨重, 观测效率低, 同时因它们的自动化程度不高, 其观测结果在一定程度上还与观测者有关(即存在所谓的“人差”)^[12], 难以广泛应用. 因此我们的目标确定为研制出 1 种小型、高自动化、高精度、易操

作和低成本的地面光学测地望远镜, 使其可以在天文学与地球科学的交叉研究中发挥独特的作用^[11,12].

地面光学测地望远镜观测的主要误差源是难以精确模型化的大气折射效应, 并且其误差随着观测目标的天顶距的增大而增大. 由于照相天顶筒(PZT)观测的是运动到天顶附近的恒星, 最大限度地减少了大气折射的影响, 因而其测量精度是相对最高的^[7,14], 历史上一直是测量 ERP 的重要设备. 因此, 我们研制新型地面光学测地望远镜即借鉴了 PZT 的天顶观测模式.

前些年, 德国 Hannover 大学^[15]和瑞士 ETH Zurich 的 GGL(Geodesy and Geodynamics Laboratory)^[16]对已有的模拟天顶摄影仪 TZK2 和 TZK3 进行了改造, 用 CCD 传感器代替摄影底片, 分别研制了数字式天顶相机系统 TZK2-D 和 DIADEM. 奥地利 Vienna 技术大学^[17]也研制了小型的 CCD 天顶相机系统 ZCG1. 这些仪器主要通过观测天顶附近恒星的视运动获得测点的天文经纬度, 结合 GPS 的大地经纬度测量结

引用格式: 王博, 田立丽, 王政, 等. 数字化天顶望远镜观测图像及数据处理. 科学通报, 2014, 59: 1100–1107

英文版见: Wang B, Tian L L, Wang Z, et al. Image and data processing of digital zenith telescope (DZT-1) of China. Chin Sci Bull, 2014, 59: 1984–1991
doi: 10.1007/s11434-014-0277-7

果,快速获取垂线偏差资料.由于曝光历元的记录和水平读数的全自动化,该新型仪器在很大程度上减小了人为因素对观测结果的影响.并极大地简化了观测过程,有效地提高了观测效率.这种自动化仪器在欧洲和美洲的许多国家被用于局部和区域大地水准面确定和其他地球物理学研究^[18-20],可惜价格昂贵.

为适应我国天文学和地球科学某些研究和应用领域的需要,中国科学院国家天文台与山东科技大学测绘学院于 2009 年底开始合作研制类似国外的 CCD 数字天顶望远镜,并于 2011 年底将样机研制成功(称作 DZT-1)^[12].通过一段时间的试观测,表明 DZT-1 具有可远程控制、自动置平、自动观测、数据自动处理及观测结果远程传输的功能. DZT-1 的测量原理和方法虽然与经典的照相天顶筒有类似,但在由其观测得到的恒星位置图像及数据来确定天文经纬度的原理、方法与过程等方面也存在较大的区别.这是 DZT 成功地实现整个系统的高自动化、高精度、高性能的关键技术之一.由于 DZT-1 在国内为首次研制,尚没有现成的恒星位置图像及数据归算的应用软件,目前可参考的是德国学者在其论文中关于这方面知识的简要介绍^[15,16,18-24].本文在介绍 DZT-1 观测图像及数据处理原理和方法的基础上,介绍了作者编写的利用观测资料实时归算出天文经纬度的应用软件,该软件的特点和使用方法,以及用该软件处理资料获得的 DZT-1 的试观测结果.

1 DZT-1 观测原理及观测过程

1.1 观测原理

DZT-1 观测的基本原理是对运行至天顶附近进入望远镜视场的一些恒星进行天文照相观测,将它们的照相位置与利用星表计算的视位置做比较,计算得到观测点的铅垂线在天球上的视方向.当世界时 UT1(或测站天文经纬度)已知时可解算出观测点的天文经纬度(ϕ, λ) (或 UT1).

以解算天文经纬度为例,对 1 颗位于天顶方向的恒星,通过视位置计算可以获取其在瞬时地球参考系中的赤道坐标(α, δ).而观测点的瞬时天文经纬度(ϕ, λ)是观测点的铅垂线在瞬时地球参考系中的空间指向.它们的关系可由图 1 表示.

格林尼治视恒星时 GAST 可将瞬时地球坐标系与瞬时天球坐标系联系在一起.其值可通过观测瞬

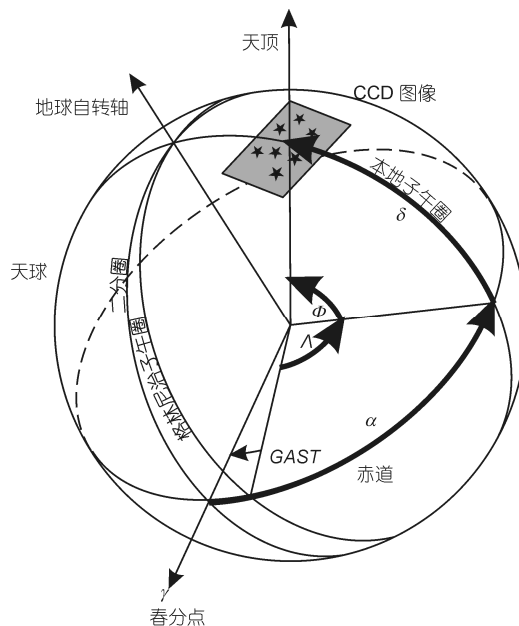


图 1 DZT-1 观测原理示意图

间的国际标准时间及世界时 UT1 计算得到.对处于天顶位置的恒星的天文经纬度(ϕ, λ)和赤道坐标(α, δ)有以下对应关系:

$$\phi = \delta, \lambda = \alpha - \text{GAST}. \quad (1)$$

在实际观测过程中很难保证总有恒星精确通过天顶, DZT-1 是对天顶附近天区的诸多恒星拍摄成像,利用恒星的位置内插得到天顶的赤道坐标,进而利用公式(1)获取天顶的天文经纬度. DZT-1 的结构和性能将另文介绍^[25].

1.2 观测过程

(i) 仪器精确置平. 天顶筒实现对铅垂线指向观测的必要前提是通过物理方法将铅垂线体现出来.经典 PZT 以水银面实现测站的地平面,其法线即为铅垂线. DZT-1 用高精度倾斜仪与平面反射镜相结合取代水银盘,所以在观测前将平面反射镜高精度置平是必要的.由 3 个置平电机加高精度倾斜仪组成的仪器精确置平系统可在短时间里将仪器的水平状态调整到 2"以内(PZT 要求 10"以内).

(ii) 自动观测及数据采集. 仪器精确置平后即可进行观测.在观测控制程序的控制下,由精度至 1 ms 的 GPS 时号控制 CCD 快门对天顶附近天区的恒星成像,该曝光历元及恒星图像被自动记录下来. DZT-1 的视场为 $1.33^\circ \times 0.88^\circ$,在曝光时间为 0.5 s 时,

天气晴好的情况下有数 10 颗恒星在 CCD 芯片上成像. 标示仪器水平状态的倾斜仪读数也被精确记录. 为消除望远镜准直差的影响, 观测过程中要将望远镜旋转 180° , 重复上述观测和数据采集过程. 这样即完成了 1 次观测, 图像及有关数据将被数据处理软件读取并进行计算处理. 为了得到高精度的结果, 每晚需要进行多次观测, 以减少偶然误差的影响.

2 DZT-1 观测图像及数据处理

PZT 的观测方式为: 每颗星中天前后各观测 2 次, 在此 2 次之间仪器的物镜-底片架都转动了 180° . 因而在底片上, 每颗星都有 4 个对称星像. 将 1 张底片上的恒星按每颗星 4 个星像的度量坐标进行归算, 用最小二乘法求解出钟差和纬度^[14]. 由于观测模式的不同(DZT 不需要进行选星观测), DZT-1 数据处理过程与经典 PZT 有很大差别, 其数据处理过程主要包括: 星像提取及星像质心计算、恒星视位置计算、星图识别、天顶点位置计算及仪器倾斜改正, 最终获取观测点的精确天文经纬度. 主要流程如图 2 所示.

2.1 星像提取及星像质心计算

CCD 图像上恒星的星像是由亮度值相近的若干相邻像素组成. 从图像中提取星像采用区域生长分割方法^[26]. 这种方法的基本思想是在整幅图像中搜索亮度值大于某一阈值的像素. 该阈值 g_s 定义为^[27]

$$g_s = B + 3\sigma. \quad (2)$$

式中 B 为图像背景值, σ 为标准差.

提取出星像像素区域后, 需要计算星像质心的 CCD 图像量度坐标, 即质心定位. 对于星像质心定位已经发展了许多经典的算法^[28]: 高斯拟合法^[29]、矩方法(包括修正矩方法^[27,30,31])、中值法和寻导法^[32,33]等. 本文采用修正矩方法, 按每个像素点的亮度值 g_i 做线性加权平均, 得到各星像质心的 CCD 图像量度坐标 (x, y) ^[27,29].

2.2 星表及恒星视位置计算

星表是有关恒星的各类参数目录, 这些参数包括: 恒星的标识、位置、自行、视差、视向速度、星等、光谱型等^[8]. 1989 年依巴谷天体测量卫星升空, 卫星上的天体测量望远镜在太空进行高精度天体测量. ESA(European Space Agency)据其观测数据于 1997 年发布了依巴谷星表, 该星表包含 12 万颗恒星, 位置精度为 1 mas. 随后利用地面观测数据对依巴谷星表做了补充, 发布了 Tycho-2 星表和 UCAC 星表. Tycho-2 星表包括近 250 万颗暗完备至 11 等的恒星的参考位置, 平均位置精度为 ± 60 mas, 平均自行精度为 ± 2.5 mas/a^[34]. UCAC2 星表包括 4800 多万颗 R 星等为 8~16 等的恒星, 10~14 等星的平均位置精度为 ± 20 mas, 自行精度为 $\pm (1\sim 3)$ mas/a^[8]. 对于暗星(暗于 10 等)UCAC2 星表的精度优于 Tycho-2 星表, 因此我们以 UCAC2 星表为主星表, 亮星(亮于 10 等)利用 Tycho-2 星表补充, 编制了适于 DZT-1 使用的星表.

为了便于从星表中选取合适的参考星进行星图识别, 用 GPS 观测所得的大地测量坐标 (ϕ, λ) 作为观测点的近似天文坐标 (Φ_0, Λ_0) (两坐标的差别为垂线偏差, 一般为 $3''\sim 5''$). 利用 GAST 对 (Φ_0, Λ_0) 做变换, 得到天顶点的近似赤道坐标 (α_0, δ_0) :

$$\begin{cases} \delta_0 = \Phi_0, \\ \alpha_0 = \Lambda_0 + GAST. \end{cases} \quad (3)$$

为方便星图识别, 提高识别速度, 仅选取天顶附近区域的恒星作为候选参考星. 被选恒星位置 (α, δ) 满足如下关系式:

$$\begin{cases} \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}, \\ \delta_{\min} < \delta < \delta_{\max}. \end{cases} \quad (4)$$

$\alpha_{\min}$, $\alpha_{\max}$, $\delta_{\min}$, $\delta_{\max}$ 由天顶点的近似赤道坐标 (α_0, δ_0) 及 FOV(望远镜视场)确定:

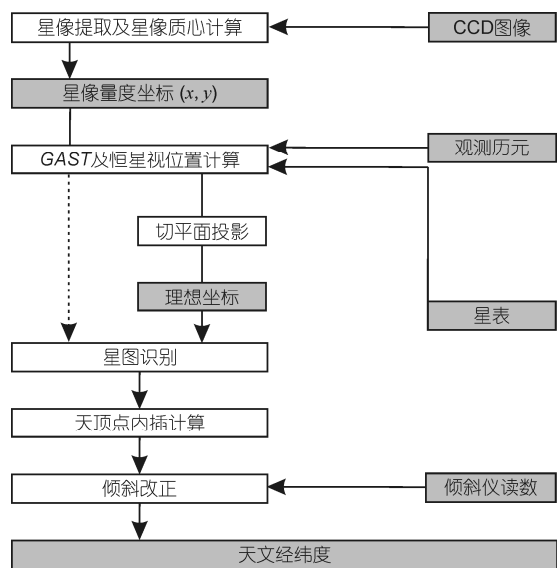


图 2 DZT-1 观测数据处理流程图

$$\begin{cases} \alpha_{\min} = \alpha_0 - \frac{FOV}{2}, & \alpha_{\max} = \alpha_0 + \frac{FOV}{2}, \\ \delta_{\min} = \delta_0 - \frac{FOV}{2}, & \delta_{\max} = \delta_0 + \frac{FOV}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

星表中给出的是恒星在 J2000.0 历元下的平位置, 在计算中要根据诸多时变因素的影响(主要包括恒星自行、岁差、章动、光行差、视差等)将该平位置转换为观测历元平位置、真位置、视位置. Kaplan 等人^[35,36]对如何计算恒星视位置做了全面介绍. 美国海军天文台开发的 NOVAS-F 程序包可以直接用来计算恒星视位置, 计算结果的精度为 1 mas^[35]. 因此本文所涉及的恒星视位置计算由 NOVAS-F 程序实现.

2.3 参考星理想坐标计算

2.2 节中所得恒星视位置是天球坐标系下的球面坐标, 而 CCD 图像中星像的位置是平面坐标. 为确定星表参考星与星像之间的联系, 通常建立参考星的理想坐标系, 将参考星的赤道坐标投影到在天顶位置与天球相切的平面上(图 3).

1985 年 Green^[37]给出了理想坐标的计算公式:

$$\begin{cases} \cot q = \cot \delta \cos(\alpha - \alpha_0), \\ X = \frac{\tan(\alpha - \alpha_0) \cos q}{\cos(q - \delta_0)}, \\ Y = \tan(q - \delta_0), \end{cases} \quad (6)$$

q 为辅助量, (α_0, δ_0) 为天顶点的近似赤道坐标. 公式(6)的逆公式为

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 + \tan^{-1} \frac{X}{\cos \delta_0 - Y \sin \delta_0}, \\ \delta = \frac{\tan^{-1}(Y + \tan \delta_0) \cos(\alpha - \alpha_0)}{1 - Y \tan \delta_0}. \end{cases} \quad (7)$$

2.4 星图匹配

在建立星像 CCD 图像量度坐标 (x, y) 与参考星理想坐标 (X, Y) 之间的函数转换模型之前, 需要进行星图识别, 确定星表中与 CCD 图像中星像对应的参考星. 本文根据 CCD 图像中星像分布与星表中参考星的分布具有相似的几何特征进行星图识别.

(1) 首先利用四边形星图识别算法匹配出 4 颗亮星.

(2) 计算 CCD 图像量度坐标系与理想坐标系之间的初始转换模型,

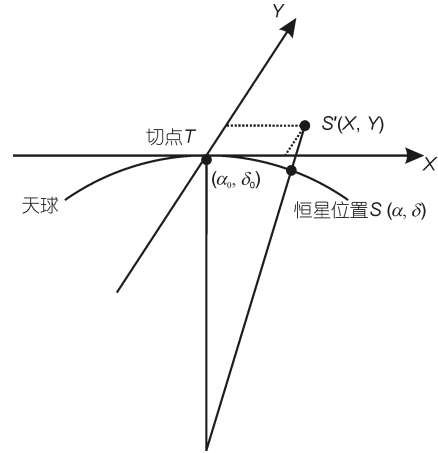


图 3 切平面投影原理图

$$\begin{cases} X = a_1 + b_1 x + c_1 y, \\ Y = a_2 + b_2 x + c_2 y. \end{cases} \quad (8)$$

由于 DZT-1 的有效视场约为 1° , 因此选用六参数底片模型. 利用最小二乘法可求解参数 $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$.

(3) 根据公式(8)所得的坐标转换模型、CCD 图像中星像坐标及参考星理想坐标完成所有星的匹配. 若满足:

$$\begin{cases} |X_i - a_1 - b_1 x_i - c_1 y_i| < \varepsilon, \\ |Y_i - a_2 - b_2 x_i - c_2 y_i| < \varepsilon, \end{cases} \quad (9)$$

则 CCD 图像中星像 (x_i, y_i) 与参考星 (X_i, Y_i) 匹配. 其中 ε 为一小量.

(4) 利用完成匹配的所有星的 CCD 图像量度坐标及参考星的理想坐标, 重新计算坐标转换模型.

(5) 为保证坐标转换模型的精度, 需剔除残差较大的星, 重新计算坐标转换模型. 剔除准则为

$$\begin{cases} |X_i - a_1 - b_1 x_i - c_1 y_i| > 2.6\sigma_X, \\ |Y_i - a_2 - b_2 x_i - c_2 y_i| > 2.6\sigma_Y, \end{cases} \quad (10)$$

σ_X, σ_Y 分别为 X, Y 方向的标准差.

2.5 天顶点的天文坐标计算

首先, 假设天顶点在 CCD 图像上的像点位于 CCD 图像中心, 即其图像量度坐标为 $(0,0)$; 分别利用公式(8)及(7)计算 CCD 图像中心对应的理想坐标及赤道坐标; 结合 GAST 按公式(1)计算 CCD 图像中心对应的天文坐标, 记为 $(\Phi_1, A_1), (\Phi_2, A_2)$; 根据 2 幅 CCD 图像的旋转对称性, 真实天顶点在 CCD 图像上的位置位于 2 幅图像中心点连线的中点, 即:

$$\begin{cases} A = \frac{A_1 + A_2}{2}, \\ \Phi = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2}. \end{cases} \quad (11)$$

公式(6)中以天顶点的近似赤道坐标(α_0 , δ_0)代替天顶点的真实赤道坐标, 为减小因切点位置误差带来的影响, 将公式(11)的天顶点的天文坐标反算至赤道坐标, 重新计算参考星的理想坐标及 CCD 图像量度坐标系与理想坐标系之间的转换模型, 迭代计算天顶点的天文坐标, 直至连续 2 次计算的天文坐标之差小于某一给定值(如 0.001"). 一般 2~3 次迭代即可收敛.

2.6 仪器倾斜改正

仪器在观测过程中并不是处于严格的水平状态, 而是有微小的倾斜, 使得仪器光轴指向偏离天顶点, 即 2.5 节中所得的天文坐标包含仪器倾斜误差. 因此, 要得到天顶点的精确坐标须进行倾斜改正. 仪器在观测过程中的倾斜由高精度二维倾斜仪 Lippmann HRTM 精确测定, 其测量精度为 0.04"~0.05". 倾斜改正公式如下^[38,39]:

$$\begin{cases} \Phi' = \Phi + \Delta\Phi, \\ A' = A + \Delta A, \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \Delta\Phi = \cos(A + \beta)n_1 - \sin(A + \beta)n_2, \\ \Delta A = \sin(A + \beta)n_1 + \cos(A + \beta)n_2 / \cos\Phi, \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} n_1 = \frac{n_1^I - n_1^{II}}{2}, \\ n_2 = \frac{n_2^I - n_2^{II}}{2}, \end{cases} \quad (14)$$

式中(n_1^I , n_2^I), (n_1^{II} , n_2^{II})是 2 幅 CCD 图像观测时刻的倾斜仪读数; A 为 CCD 图像的方位角(CCD 图像量度坐标轴与东西或南北方向的夹角), $A = \tan^{-1}(c_1/b_1)$ 或者 $\tan^{-1}(c_2/b_2)$, b_1 , c_1 , b_2 , c_2 为公式(8)中参数; β 为倾斜仪轴与 CCD 图像量度坐标轴的夹角(图 4).

2.7 恒星位置图像及数据处理应用软件

根据上述数据处理方法, 利用 Fortran 程序语言编写了观测图像及数据自动处理软件 DZTPRO (Digital Zenith Telescope Data Processing). 该软件包含用于数据归算的可执行程序及输入接口文件. 输入接口文件用于输入程序运行设置、观测人员、观测地点、观测时间及观测环境(天气情况, 温度、气压等)等信

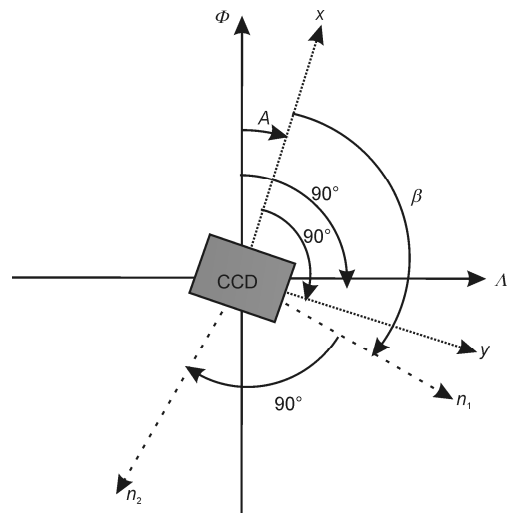


图 4 倾斜改正坐标系

(x , y): CCD 图像量度坐标系; (n_1 , n_2): 倾斜仪坐标系; (Φ , A): 天文坐标

息. 数据处理结束后, 这些信息将被记录于数据处理结果报表文件中. 目前, 该软件具有以下特点:

(1) 实时处理功能; (2) 全自动化; (3) 自动星像提取及星像中心计算; (4) Tycho-2、UCAC2 星表参考星视位置自动计算; (5) 自动星图识别; (6) 观测点天文经纬度自动归算; (7) 观测结果精度分析及输出观测结果报表.

在实际观测中, 利用望远镜控制程序每完成 1 次观测(拍摄 2 幅图像)调用该数据处理程序对观测图像及数据进行处理实时获取观测点的天文经纬度. 对 1 次观测(2 次曝光)处理时间小于 4 s, 保证了数据处理的实时性. 由于数据处理的实时性, 可以快速获取观测结果, 并通过多次重复观测的内符合精度检验观测质量, 有效提高了仪器的观测效率.

3 试观测及结果分析

2012 年 8 月 9 日至 9 月 18 日期间, 利用 DZT-1 在国家天文台办公楼楼顶进行了 17 天的试观测, 共计 4277 次单次观测. 利用 DZTPRO 对试观测图像及数据进行了处理. 为了减小观测噪声(主要包括 CCD 图像测量误差和大气折射)的影响, 对观测结果进行了分组取均值(约 15 min 的观测). 取 2012 年 9 月 14 日观测数据为例, 解算得到的结果如图 5.

为检验 DZT-1 的精度, 对每晚单次观测及单组观测标准差做了统计, 并与德国汉诺威大学的

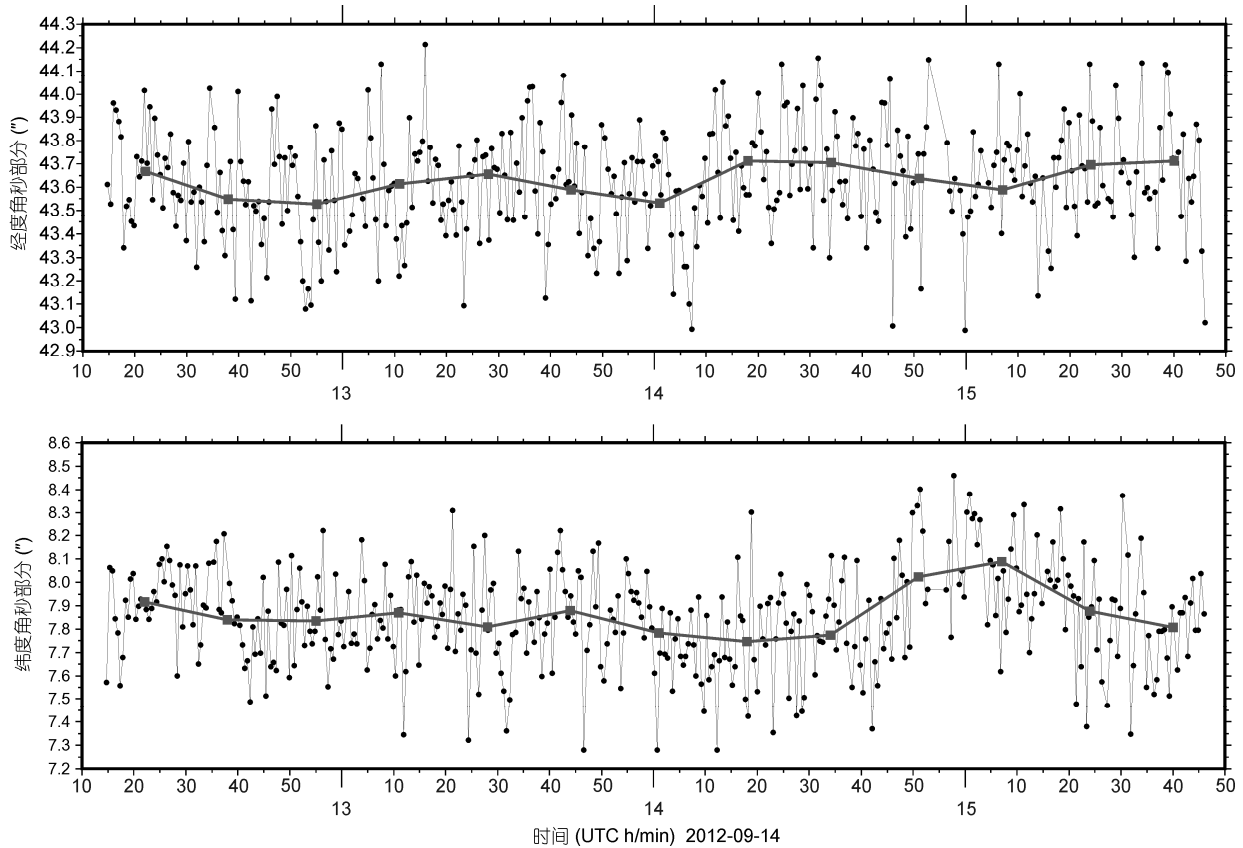


图5 2012年9月14日DZT-1观测数据
黑色圆点及曲线为单次测量值，灰色方块及曲线为分组平均处理结果

TZK2-D 观测精度比较(表 1).

由表 1 的观测结果可知, DZT-1 与 TZK2-D 观测精度相当, 1 组内单次平均观测精度可达 $0.2''\sim0.3''$, 单组观测精度为 $0.07''\sim0.08''$, 已经达到经典地面天体测量仪器的观测精度. 由于试观测地点位于高层建筑顶层, 建筑物的晃动会对观测结果产生影响, 若在正式的观测基墩上进行观测, 应该可以得到更高的观测精度.

4 结语与讨论

本文重点介绍了 DZT-1 观测数据处理方法, 及编写的数据处理软件. 该数据处理软件可以实时地对 DZT-1 观测图像及数据进行自动处理, 快速获取观测点的天文经纬度, 对观测结果进行精度分析监测仪器的观测质量. 利用该数据处理软件对 DZT-1 试观测数据进行处理, 处理结果达到甚至优于经典地面天体测量仪器的观测精度. 表明 DZT-1 的研制是成功的. 因此, 该数据处理软件满足 DZT-1 观测图

表 1 DZT-1 与 TZK2-D 观测精度比较

	DZT-1	TZK2-D
单次观测精度	$0.25''$	$0.2''$
单组观测精度	$0.07''\sim0.08''$	$0.08''$

像及数据处理的要求, 为 DZT-1 的全自动化、高精度及高效率提供了保证, 是 DZT-1 成功研制不可或缺的一部分. 另外, 该数据处理软件的处理结果为天文经纬度. 天文经纬度反映地方铅垂线的方向, 对其进行定点连续观测, 可以研究地方铅垂线变化与地震的关系. 结合 GPS 可进行垂线偏差测量, 垂线偏差是研究地球重力场及大地水准面的重要物理量. 所以, 该处理软件对 DZT-1 在天文学、地球科学等相关领域的应用具有重要意义. 但是, 该软件仍有其不足之处: 为了节省开发时间, 没有为该软件开发可视化界面, 程序运行设置及其他相关信息的输入通过修改接口文件来完成. 如果对该软件加入可视化界面, 将会使人机交互界面更加友好, 便于对该软件进行操作.

致谢 感谢中国科学院紫金山天文台李东明研究员在数据处理方面给予的悉心指导与帮助, 以及中国科学院国家天文台季洪钦副研究员对经典天顶筒资料处理方法的介绍.

参考文献

- 1 Chen M, Liu Q H, Wu Y J, et al. Relative position determination of a lunar rover using the biased differential phase delay of same-beam VLBI. *Sci China Phys Mech Astron*, 2011, 54: 2284–2295
- 2 Huang Y, Hu X G, Zhang X Z, et al. Improvement of orbit determination for geostationary satellites with VLBI tracking. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 2765–2772
- 3 Xu M H, Wang G L, Zhao M. Direct estimation of the Solar acceleration using geodetic/astrometric VLBI observations. *Sci China Phys Mech Astron*, 2012, 55: 329–332
- 4 Li P J, Hu X G, Huang Y, et al. Orbit determination for Chang'E-2 lunar probe and evaluation of lunar gravity models. *Sci China Phys Mech Astron*, 2012, 55: 514–522
- 5 Huang Y, Hu X G, Li P J, et al. Precise positioning of the Chang'E-3 lunar lander using a kinematic statistical method. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 4545–4551
- 6 王博, 尹志强, 韩延本. 地震前天文时纬观测异常现象的研究进展. *科学通报*, 2011, 57: 2043–2050
- 7 李东明, 金文敬, 夏一飞. *天体测量方法*. 北京: 中国科学技术出版社, 2006
- 8 赵铭. *天体测量学导论*. 北京: 中国科学技术出版社, 2006
- 9 马文章. *球面天文学*. 北京: 北京师范大学出版社, 1995
- 10 韩延本, 田静. 用于垂线变化研究和测震的北京天文时纬预测网. *地球物理学进展*, 1996, 11: 97–102
- 11 王红旗, 韩延本, 郭金运, 等. 用于测量铅垂线变化的小型天体测量仪器. 见: 中国地球物理学会, 主编. 中国地球物理学会第二十七届学术年会, 2011 10.17–21, 长沙. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011. 528
- 12 韩延本, 王红旗, 尹志强, 等. 建立华北及西北地区垂线变化试验监测网的意义和可行性. *地球物理学进展*, 2012, 27: 1287–1293
- 13 胡辉, 李正心, 李辉, 等. 云南垂线的年际变化——天体测量和重力测定资料的比较研究. *自然灾害学报*, 2003, 12: 25–27
- 14 张承志, 夏一飞. *天体测量学*. 北京: 高等教育出版社, 1986
- 15 Hirt C. Automatic determination of vertical deflections in real-time by combining GPS and digital zenith camera for solving the GPS-height-problem. In: *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation*, 2001 Sep 10, Alexandria, VA. Salt Lake City, 2001. 2540–2551
- 16 Bürki B, Müller A, Kahle H G. DIADEM: The new digital astronomical deflection measuring system for high-precision measurements of deflections of the vertical at ETH Zurich. In: *Proceeding of IAG GGSM 2004*, Porto, Portugal, 2004
- 17 Gerstbach G, Pichler H. A small CCD zenith camera (ZC-G1)-developed for rapid geoid monitoring in difficult projects. *Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade*, 2003, 75: 221–228
- 18 Hirt C, Seeber G. High-resolution local gravity field determination at the sub-millimeter level using a Digital Zenith Camera System. In: Tregoning P, Rizos C, eds. *Proceedings of Dynamic Planet*, 2005 Aug 22–26, Cairns. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2006. 316–321
- 19 Hirt C, Seeber G. Accuracy analysis of vertical deflection data observed with the Hannover Digital Zenith Camera System TZK2-D. *J Geodesy*, 2008, 82: 347–356
- 20 Somieski A E. Astrogeodetic geoid and isostatic considerations in the North Aegean Sea, Greece. Doctor Dissertation. Zurich: ETH, 2008
- 21 Hirt C, Bürki B. The Digital Zenith Camera—A new high-precision and economic astrogeodetic observation system for real-time measurement of deflections of the vertical. In: Tziavos I, ed. *Proceedings of the 3rd meeting of the International Gravity and Geoid Commission of the IAG*, 2002 Aug 26–30, Thessaloniki. Thessaloniki: Editions Ziti, 2003. 161–166
- 22 Hirt C, Reese B, Enslin H. On the accuracy of vertical deflection measurements using the high-precision Digital Zenith Camera System TZK2-D. In: Jekeli C, Bastos L, Fernandes J, eds. *Proceedings of GGSM 2004 IAG International Symposium*, 2004 Aug 30–Sep 3, Porto. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2005. 197–201
- 23 Bürki B, Somieski A E, Sorber P, et al. The Digital Astronomical Deflection Measuring System (DIADEM). *Swiss National Report on the Geodetic Activities in the Years 2003–2007*, Swiss Geodetic Commission. 2007
- 24 Hirt C, Bürki B, Somieski A E, et al. Modern determination of vertical deflections using digital zenith cameras. *J Survey Eng*, 2010, 136: 1–12
- 25 田立丽, 郭金运, 韩延本, 等. 我国的数字化天顶望远镜样机. *科学通报*, 2014, 59: 1103–1108
- 26 Haralick R M, Shapiro L G. *Computer and Robot Vision*. Massachusetts: Addison Wesley, 1993

- 27 Stone R C. A comparison of digital centering algorithms. *Astron J*, 1989, 97: 1227–1237
- 28 李展, 彭青玉, 韩国强. CCD 图像数字定心算法的比较. *天文学报*, 2009, 50: 340–348
- 29 Auer L H, Van Altena W F. Digital image centering. II. *Astron J*, 1978, 83: 531–537
- 30 Peng Q Y, Han Y B, Zhang C L, et al. Image-processing techniques in precisely measuring positions of Jupiter and its Galilean satellites. *Astron Astrophys*, 2003, 401: 773–779
- 31 Peng Q Y, Vienne A, Lainey V, et al. New evidence of precision premium for Galilean satellites from CCD imaging. *Planet Space Sci*, 2008, 56: 1807–1811
- 32 Chiu L T G. Astrometric techniques with a PDS microdensitometer. *Astron J*, 1977, 82: 842–848
- 33 Stetson P B. Photographic stellar photometry with the PDS microdensitometer. *Astron J*, 1979, 84: 1056–1066
- 34 Hog E, Fabricius C, Makarov V V, et al. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. *Astron Astrophys*, 2000, 355: L27–L30
- 35 Kaplan G H, Hughes J A, Seidelmann P K, et al. Mean and apparent place computations in the new IAU system. III - Apparent, topocentric, and astrometric places of planets and stars. *Astron J*, 1989, 97: 1197–1210
- 36 Jekeli C. Geometric reference systems in geodesy. Lecture notes of Division of Geodesy and Geospatial Science, School of Earth Science, Ohio State University. 2006
- 37 Green R M. Spherical Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 1985
- 38 Hirt C, Kahlmann T. Hochpräzise neigungsmessung mit dem elektronischen pendelneigungssensor HRTM. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 2004, 129: 266–276
- 39 Hirt C. Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamarasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung. Doctor Dissertation. Wissen. Arb. der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Hannover Nr. 253, 2004