

引用格式: 刘娜, 高玉平, 蔡宏兵, 等. 骊山观测站数字天顶望远镜的初步观测结果分析[J]. 时间频率学报, 2021, 44(1): 33-44.

# 骊山观测站数字天顶望远镜的初步观测结果分析

刘娜<sup>1,2,3</sup>, 高玉平<sup>1,2,3</sup>, 蔡宏兵<sup>1,2</sup>, 张鹏飞<sup>1,2,3</sup>, 王平利<sup>1,2,3</sup>, 李琳<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 数字天顶望远镜 (DZT) 是一种新型的光学测量装置, 测站大气扰动的影响是主要的误差源之一。通过骊山观测站上两台仪器的并址观测避免了观测环境差异的影响, 对仪器的初步观测结果进行了分析。同步观测试验结果表明两台仪器的一致性较好, 当测站观测环境较理想时 DZT 单次观测精度纬度方向为  $0.16''$ , 经度方向为  $0.18''$ ; 纬度及经度方向 20 min 一组的单组观测标准差为  $0.05''\sim 0.06''$ ; 两仪器观测 UT0 组间标准差分别为 3.8 ms 和 3.5 ms。

**关键词:** 数字天顶望远镜; 天文经纬度; 世界时; 误差分析

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-01-0033-12

## Preliminary observation results of digital zenith telescope at Li-Shan observatory

LIU Na<sup>1,2,3</sup>, GAO Yu-ping<sup>1,2,3</sup>, CAI Hong-bing<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng-fei<sup>1,2,3</sup>,  
WANG Ping-li<sup>1,2,3</sup>, LI Lin<sup>1,2,3</sup>

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Digital Zenith Telescope (DZT) is a new type of optical instrument. One of the main errors of DZT is the atmospheric turbulence at the observational station. In this paper, the effects of observation environments can be effectively cancelled by co-location observations of two instruments at the Li-Shan station. The performance of the two instruments are evaluated. The simultaneous observations of two instruments show good consistency. When the observation environment of the station is well, the standard deviation of the derived station position using one scan data is about  $0.16''$  in the latitude direction and  $0.18''$  in the longitude direction. Combining 20-min observations, yields precision of  $0.05''$  to  $0.06''$  for measurements of station's latitude and longitude. The standard deviations of UT0 derived by the two instruments are 3.8 ms and 3.5 ms, respectively.

**Key words:** digital zenith telescope; astronomical latitude and longitude; universal time; error analysis

收稿日期: 2020-04-25; 接受日期: 2020-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (91736207); 中国科学院国家授时中心“青年创新人才”资助项目 (国授发字 [2017] 48 号); 科技大数据湖北省重点实验室开放基金资助项目 (20KF011015)

## 0 引言

世界时 (universal time, UT1) 是中国科学院国家授时中心时间服务内容之一。国家授时中心拟采用数字天顶望远镜 (digital zenith telescope, DZT) 开展世界时的测量。DZT 是应国家授时中心的应用需求由国家天文台研制的天文光学测量装置, 仪器设计参考传统照相天顶筒 (photographic zenith tube, PZT) 的观测原理, 通过观测天顶附近的恒星实现地方恒星时 (或天文经纬度) 的测量。DZT 采用 CCD (charge coupled device) 技术, 以高精度倾斜仪与平面镜代替水银盘, 利用 GPS 时间信号控制曝光时间、标定曝光历元, 实现了自动观测, 消除人仪差的影响<sup>[1]</sup>, 提高了观测精度。同时采用天文照相较差测量代替观测固定星组, 最快 34 s 可完成一个单次观测, 大大提高了观测效率。与传统光学仪器相同的是, 仪器误差及观测环境的影响是制约观测精度提高的主要因素。

本文介绍了数字天顶望远镜的观测原理, 观测系统组成及观测过程, 利用两台仪器并址、同步观测数据, 采用分组处理, 对比分析方法, 避免了观测环境差异的影响, 对数字天顶望远镜的初步观测结果进行了分析。

## 1 数字天顶望远镜观测原理

数字天顶望远镜的基本原理是对仪器天顶方向进入视场范围的恒星进行拍照, 将恒星的图像位置与利用星表计算的参考星的视位置进行匹配, 计算得到测站铅垂线在天球背景的方向。如图 1 所示, 通过观测得到  $t$  时刻测站铅垂线的瞬时赤道坐标  $\alpha$  和  $\delta$ , 设此时测站瞬时纬度、经度为  $\varphi$ 、 $\lambda$ , 格林尼治视恒星时为  $S_G$ , 则测站瞬时天球坐标与瞬时地球坐标之间关系如下式所示:

$$\varphi = \delta, S_G = \alpha - \lambda, \quad (1)$$

式 (1) 中,  $S_G$  可由观测时刻的国际标准时间 UTC 与 UT1 转换计算得到, 如式 (2) 所示:

$$S_G = \theta_{\text{ERA}}(\text{UTC} + \Delta\text{UT1}) - \theta_{\text{EO}}, \quad (2)$$

式 (2) 中,  $\theta_{\text{EO}}$  为零点差<sup>[2]</sup>, 地球自转角  $\theta_{\text{ERA}}$  的表达式为<sup>[2]</sup>

$$\theta_{\text{ERA}}(T_u) = 2\pi(0.779\,057\,273\,264\,0 + 1.002\,737\,811\,911\,354\,48T_u), \quad (3)$$

式 (3) 中,  $T_u = JD_{\text{UT1}} - 2\,451\,545.0$ ,  $JD_{\text{UT1}}$  可由观测的 UTC 时刻结合 IERS 发布的参数  $\Delta\text{UT1}$  ( $\Delta\text{UT1} = \text{UT1} - \text{UTC}$ ) 计算, 因此已知 UT1 可根据式 (1)、(2) 解算测站纬度及经度坐标。

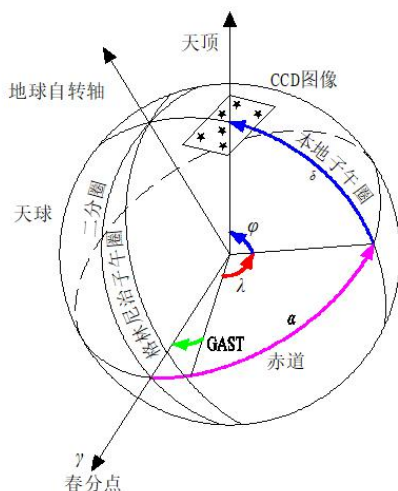


图 1 数字天顶望远镜观测原理示意图

多台站观测 UT1 的过程中, 对测站  $i$  在纬度方向与经度方向可建立如下观测方程:

$$\varphi_i(t) = \varphi_{0,i} + [x_p(t) \cos \lambda_{0,i} - y_p(t) \sin \lambda_{0,i}] + \delta\varphi_{z,i}, \quad (4)$$

$$S_i(t) = S_G(\text{UT1}^{0\text{h}}) + \frac{1}{k}[\text{UT1}(t) - \text{UTC}_i(t)] + \frac{1}{k}[\text{UTC}_i(t)] + \lambda_{0,i} + [x_p(t) \sin \lambda_{0,i} + y_p(t) \cos \lambda_{0,i}] \tan \varphi_{0,i} + \delta\lambda_{z,i}, \quad (5)$$

式(4)和(5)中,  $\varphi_{0,i}$ 、 $\lambda_{0,i}$ 是测站  $i$  的纬度及经度坐标采用值;  $\varphi_i(t)$ 、 $S_i(t)$ 、 $\text{UTC}_i(t)$ 为测站  $i$  的观测量,  $\varphi_i(t)$ 是瞬时纬度, 等于天顶瞬时指向的视赤纬  $\delta_i(t)$ ,  $S_i(t)$ 是天顶瞬时视赤经  $\alpha_i(t)$ ,  $\text{UTC}_i(t)$ 是曝光时刻  $t$  的 UTC 读数;  $S_G(\text{UT1}^{0\text{h}})$ 为世界时零时的格林尼治恒星时,  $k$ 为恒星时秒长和世界时秒长的比例,  $k = 0.997\ 269\ 566\ 33^{[3]}$ ;  $[x_p(t) \cos \lambda_{0,i} - y_p(t) \sin \lambda_{0,i}]$ ,  $[x_p(t) \sin \lambda_{0,i} + y_p(t) \cos \lambda_{0,i}] \tan \varphi_{0,i}$ 分别为极移对测站纬度及经度方向观测的影响;  $\delta\varphi_{z,i}$ 、 $\delta\lambda_{z,i}$ 是测站纬度、经度方向的观测量残差, 包含经纬度采用值  $\varphi_{0,i}$ 、 $\lambda_{0,i}$ 的常数偏差和观测噪声;  $[\text{UT1}(t) - \text{UTC}_i(t)]$ 、 $x_p$ 、 $y_p$ 是地球自转参数 (earth rotation parameter, ERP) 的 3 个分量, 为待求参数, 3 个以上地面分布拉开的测站同时观测, 可以解得 ERP 参数。

单台站观测时, 由于无法同时实现对极移  $x_p$ 、 $y_p$  的解算, 采用测站初始坐标  $\lambda_0$  只能解算得到世界时的初值 UT0, 如下式所示:

$$S(t) = S_G(\text{UT1}^{0\text{h}}) + \frac{1}{k}[\text{UT0}(t) - \text{UTC}(t)] + \frac{1}{k}[\text{UTC}(t)] + \lambda_0 + \delta\lambda_z, \quad (6)$$

对比式(5)可得世界时 UT1 与 UT0 之间的关系:

$$\text{UT1} = \text{UT0} - k(x_p \sin \lambda_0 + y_p \cos \lambda_0) \tan \varphi_0. \quad (7)$$

因此如式(1)所示: 当地球自转参数 ERP ( $x_p$ ,  $y_p$ , UT1) 已知时可解算测站经纬度; 如式(4)、(5)所示当测站纬度、经度 ( $\varphi_0, \lambda_0$ ) 已知时, 多台站观测可解算 ERP, 单个测站可按式(6)解算世界时的初值 UT0。

## 1.1 观测系统组成与观测过程

DZT 自动观测系统由上位机、控制箱、望远镜组成, 其中望远镜主要由镜筒及精密转台组成<sup>[4]</sup>, 系统构成如图 2 所示。其中控制箱读取 DZT 的状态并控制望远镜工作, 同时上位机与控制箱通过串口进行通讯, 实时控制望远镜工作, 可进行仪器调平、旋转、观测等操作。

转身观测过程中由倾斜仪与 2 个置平电机组成高精度置平系统, 可快速将仪器水平状态调整至 2" 以内; 置平后由 GPS 时间信号控制 CCD 快门进行曝光, 系统自动记录曝光时刻、倾斜仪读数及 CCD 图像; 再由定位电机驱动望远镜进行 180°转身, 转身后读取倾斜读数, 若倾斜仪相对测量结果在 2" 以内则重复上述观测与数据采集过程, 若超过 2" 则由精置平系统进行水平调整然后观测, 至此 0°和 180°位的两幅 CCD 底片、曝光时刻、相对倾斜测量结果构成 1 个单次观测, 为了提高观测效率, 采用 180°—180°—0°—0°的观测模式, 观测过程如图 3 所示。实际观测中, 由于 DZT 的视场较小云层遮挡易使拍摄的底片上无星或观测星数过少而无法解算, 加之观测环境、数据处理等因素的影响, 解算获取的观测值个数要小于相机拍摄的图像对数, 观测值会出现中断、不连续的情况。本文中的单次观测数是指经数据解算获得的观测值的个数。

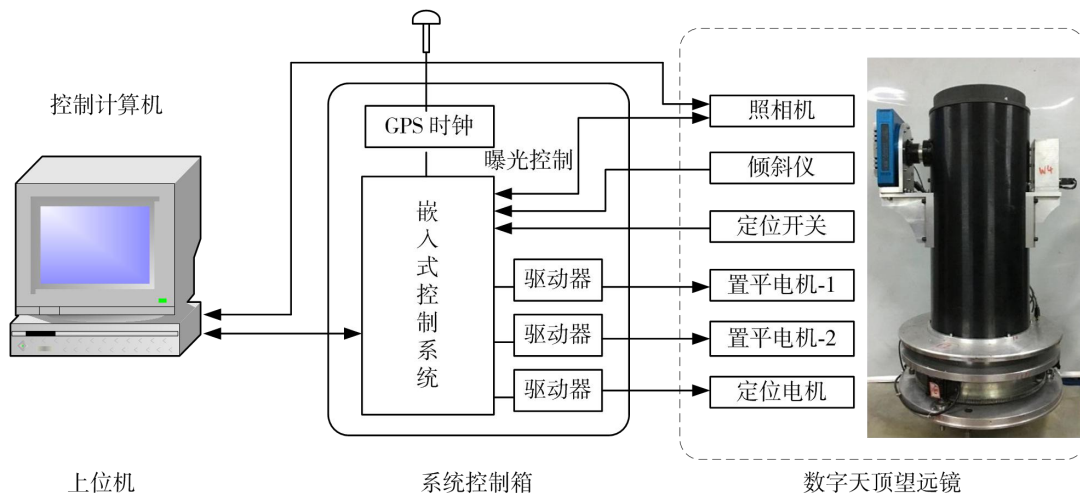


图 2 数字天顶望远镜观测系统组成

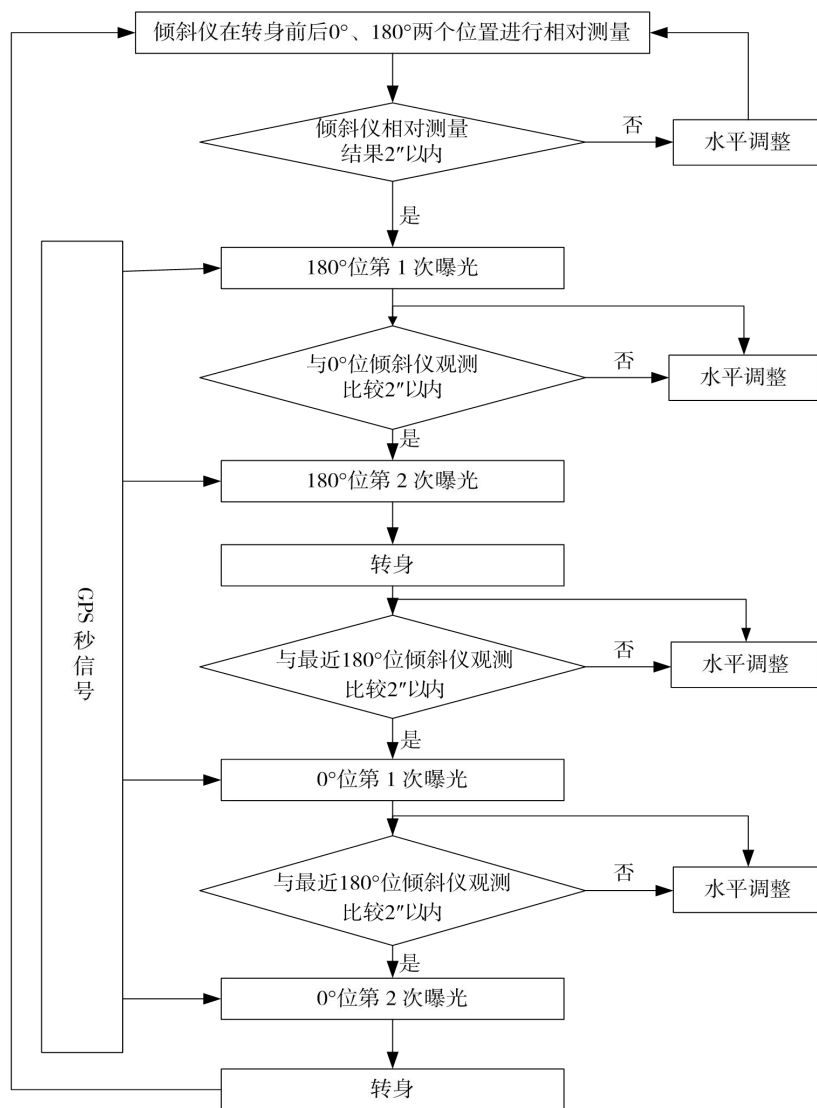


图 3 数字天顶望远镜观测流程

## 1.2 主要误差源

DZT 为地面光学测地仪器,通过夜晚观测恒星实现铅垂线在天球背景中的方向测量,其特殊的  $180^\circ$  转身观测消除仪器准直差、倾斜仪零点差的影响。除此之外,影响观测精度的因素有仪器误差、星表位置及自行误差、数据处理过程中的误差以及观测环境的影响。其中仪器误差主要有:仪器旋转平台及轴系误差, CCD 相机与高精度倾斜仪安装方位角误差,系统时延、倾斜仪测量误差等;数据处理过程中的误差主要是星像量度误差;此外观测环境中温度、气压、风<sup>[5]</sup>、光等因素的变化,不仅会对大气视宁度、天光背景产生影响,使星像产生闪烁、抖动,降低 CCD 拍摄底片的星像质量<sup>[6-8]</sup>,还会引起仪器误差改变<sup>[9-10]</sup>,如振动影响高精度电子倾斜仪观测精度<sup>[11]</sup>,温度变化会影响望远镜的焦距。

## 2 试观测与数据处理

DZT 的误差源中观测环境的影响不仅与测站环境有关还和观测时段有关。星表位置误差<sup>[12]</sup>也与测站纬度、观测时段(DZT 为非跟踪观测,一天内观测时间不同,所观测的赤经区不同)有关。因此并址、同步观测,对观测数据分组处理,能够避免上述两项误差对观测结果一致性分析的影响。

### 2.1 观测地点、仪器

为了避免环境差异及星表误差的影响,2017 年夏季在骊山测站(原陕西天文台子午环观测室,纬度  $34.356\ 186\ 1^\circ$ ,经度  $109.206\ 909\ 2^\circ$ )进行了并址观测实验。观测室内有固建于同一观测基墩的 4 个 80 cm 见方的小型观测基墩,仪器 DZT-I、DZT-II 分别安装在南北向相距约 1.5 m 的两个基墩上,由观测位置引起的纬度差约  $0.05''$ 。观测所用两台仪器均为折射式天顶望远镜,望远镜口径 200 mm,其中 DZT-I 安装 CCD 为 ALTA F9000,视场约  $1.3^\circ$ ,DZT-II 安装 CCD 为 ALTA U9,视场约  $1.73^\circ$ ,由此会引起两台仪器单次观测星数的差异。两仪器 CCD 快门时延均已校准,观测中同时开机预热,同步观测。

### 2.2 数据处理

由数字天顶望远镜的观测原理可知,已知 ERP 参数可实现测站经纬度坐标的测量,已知测站坐标单台站可解算世界时的初值 UT0,具体解算方法如下。

#### 2.2.1 经纬度解算

DZT 的单次观测是指由相差  $180^\circ$  的两个测位所拍摄的 CCD 图像、曝光时刻及倾斜测量结果解算得到的纬度和经度  $(\varphi, \lambda)$ 。数据处理过程主要包括:针对 DZT 曝光时间长度 0.5 s,采用对短曝光图像计算精度较高的修正矩法<sup>[13-15]</sup>提取底片星像质心位置,在选定半径为 1500 像素的区域内,与利用 Tycho-2 星表计算的参考星视位置进行匹配,建立 6 参数底片模型的同时解算仪器方位角用以仪器倾斜改正的计算,由  $0^\circ$  与  $180^\circ$  两张底片内插迭代计算仪器旋转轴的量度坐标,经切平面投影得到仪器旋转轴在天球中间参考系(CIRS)中的指向,再经过倾斜改正获取铅垂线方向的瞬时天球坐标  $(\alpha, \delta)$ ,最后由地球自转参数 UT1 按式(1)、(2)计算测站的经纬度。

本次测试是在夏季,夜晚多云易使解算的数据出现中断,且骊山测站风力较大,因此数据分析还采用了 20 min 分组处理,取 20 min 内所有单次观测结果的平均值为单组观测结果  $(\varphi, \lambda)_{\text{group}}$ ,观测时刻为该组观测的中间时刻;以一组中单次观测值相对于组内观测平均值  $(\varphi, \lambda)_{\text{group}}$  的均方差来计算单次观测精度  $(\sigma_\varphi, \sigma_\lambda)$ ;采用一组观测结果  $(\varphi, \lambda)_{\text{group}}$  相对于一天观测结果  $(\varphi, \lambda)_{\text{night}}$  的均方差来表示单组测量精度  $(\sigma_\varphi, \sigma_\lambda)_{\text{group}}$ ;一晚所有单次观测结果的平均值为一天观测结果  $(\varphi, \lambda)_{\text{night}}$ 。

为了分析观测过程中两台仪器观测精度的变化,以 20 min 为窗口进行滑动平均,20 min 内单次观测值相对于组内观测平均值的均方差为该组单次观测精度,如图 5 中散点所示。

#### 2.2.2 UT0 解算

UT0 解算中 20 min 为一组,以组内观测的瞬时天球坐标  $\alpha_i$ ,  $\text{UTC}_i$  与测站经度  $\lambda_0$  建立误差方程,利用最小二乘法解算  $\Delta\text{UT0}(\Delta\text{UT0}=\text{UT0}-\text{UTC})$ :

$$v_i = \Delta\text{UT0} - k \left[ \alpha_i - \Delta_{\text{EE}} - \lambda_0 - \tilde{S}_G(0) \right] + \text{UTC}_i, \quad (8)$$

式(8)中,  $i$ 表示单次观测次序( $i=1, 2, 3, \dots$ ),  $\Delta_{\text{EE}}$ 为观测当日世界时零时到观测时刻赤经章动的变化量,  $\tilde{S}_G(0)$ 为世界时零时格林尼治平恒星时,  $k$ 为恒星时秒长和世界时秒长的比例,  $k = 0.997\ 269\ 566\ 33$ , UT0组间标准差是指一天内各组解算 $\Delta\text{UT0}$ 的均方差。

### 3 观测结果与分析

表1为并址同步观测期间DZT-I、DZT-II在观测次数, 观测星数, 经纬度观测值(角秒部分)及标准差的比较。其中观测次数是指一晚观测中所包含的单次观测个数; 观测星数是指一晚单次观测解算所用星数的平均值;  $\sigma_{\varphi, \text{night}}$ 、 $\sigma_{\lambda, \text{night}}$ 分别为纬度、经度方向单次观测相对于一晚均值的标准差,  $d\varphi$ 、 $d\lambda$ 分别为两台仪器一晚观测均值在纬度、经度方向的差值,  $(\sigma_{\varphi}, \sigma_{\lambda})_{\text{ref}}$ 为纬度及经度方向一晚观测均值相对于测试阶段所有夜晚观测均值的标准差,  $(\Delta_{\varphi}, \Delta_{\lambda})_{\text{night}}$ 为测试期间纬度及经度方向一晚观测均值的变化量。

#### 3.1 一致性分析

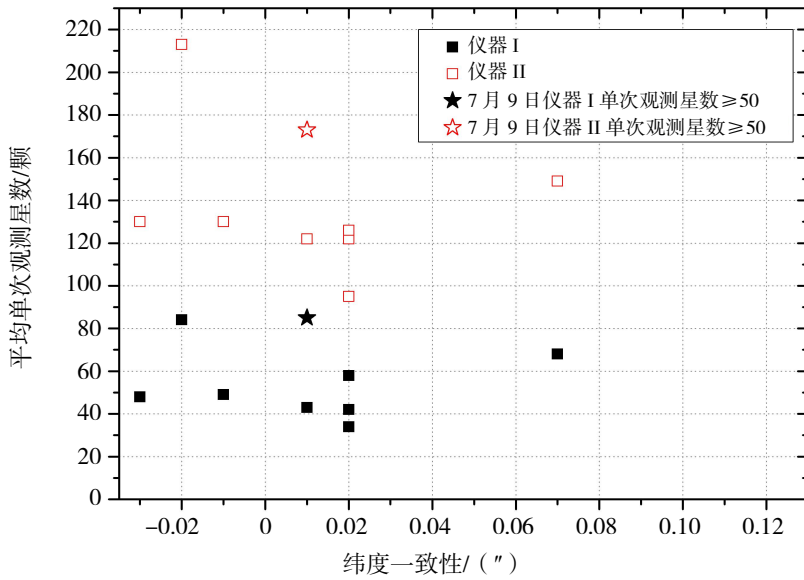
同步观测中DZT-I平均每晚181个单次观测, 每次观测53颗星。DZT-II平均每晚195个单次观测, 每次观测136颗星。DZT-II在观测效率及单次观测星数方面优于DZT-I。两台仪器在测试期间单次观测相对于一晚均值的 $\sigma_{\varphi, \text{night}}$ 、 $\sigma_{\lambda, \text{night}}$ , 分别为 $(0.23'', 0.25'')$ <sub>DZT-I</sub>、 $(0.25'', 0.24'')$ <sub>DZT-II</sub>, 纬度与经度方向观测精度相当。但在50d的跨度里DZT-I、DZT-II一晚观测均值相对于测试阶段所有夜均值的标准差 $(\sigma_{\varphi}, \sigma_{\lambda})_{\text{ref}}$ , 分别为 $(0.05'', 0.08'')$ <sub>DZT-I</sub>、 $(0.03'', 0.09'')$ <sub>DZT-II</sub>, 两台仪器纬度方向观测精度均优于经度方向。多天观测均值纬度方向一致性 $d\varphi$ 为 $0.01''$ , 经度方向一致性 $d\lambda$ 为 $0.07''$ , 也差于纬度方向。

两台仪器观测的一致性不仅受到仪器误差的影响、还受观测环境的影响。图4所示为DZT-I、DZT-II纬度及经度观测一致性及观测的平均单次观测星数, 可见DZT-I每晚的平均单次观测星数明显小于DZT-II。经度方向观测值的一致性与平均单次观测星数相关性较大, 当DZT-I平均单次观测星数明显少于50颗时, 两台仪器经度方向观测的一致性变差。其中经度观测值差异较大的6月1日、6月16日、6月26日以及7月20日, 观测值一致性分别为 $0.11''$ 、 $0.12''$ 、 $0.09''$ 以及 $0.09''$ , 对应的DZT-I平均单次观测星数分别为34颗、43颗、42颗与48颗, 远小于同期DZT-II的平均单次观测星数95颗、122颗、122颗与130颗, 也低于其8晚平均单次观测星数53颗。当DZT-I单次平均观测星数达到50颗以上时, 如7月9日(58颗), 7月11日(68颗), 7月19日(84颗)两仪器经度一致性分别为 $0.06''$ 、 $0.02''$ 、 $0.03''$ 。数字天顶望远镜测定经纬度坐标是由CCD底片上拍摄星像的图像位置与利用星表计算的参考星的视位置进行匹配, 建立底片模型经内插解算得到, 因此底片上拍摄星像的个数及分布会影响观测精度, DZT-I在6月1日、6月16日、6月26日以及7月20日平均单次观测星数偏少是影响两台仪器观测一致性的一项重要因素。

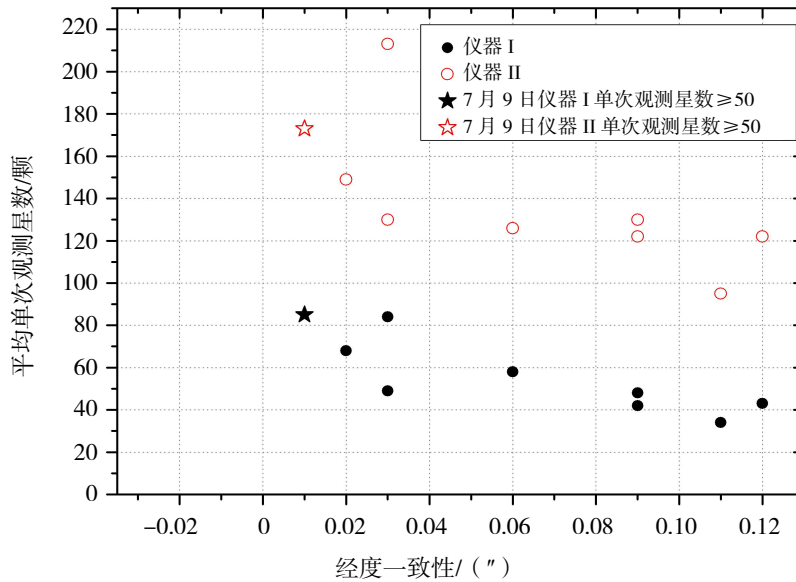
为了进一步排除其他因素(如风、观测星数、观测数据不连续等)对一致性分析的影响, 以观测时的气象条件(风力较小、视宁度较好)、两台仪器连续同步观测时长(无云)、单次观测星数( $\geq 50$ )为标准, 选取测试期间7月9日的数据进行分析。表2中列出了两台仪器观测次数, 观测星数, 经纬度观测值(角秒部分)及标准差的比较。结果表明在连续同步观测的2.8h内, DZT-I完成128个单次观测, 平均每次观测85颗星, DZT-II完成136个单次观测, 平均每次观测173颗星。两台仪器中观测星数较少的DZT-I平均单次观测星数也达到85颗, 因此观测星数的影响可忽略不计。如表2所示, DZT-I和DZT-II纬度、经度方向一晚观测均值的一致性 $d\varphi$ 、 $d\lambda$ 为 $(0.01'', 0.01'')$ , 与表1中7月9日整晚观测两台仪器一致性 $(0.02'', 0.06'')$ 相比经度方向一致性有明显提高。

表 1 DZT-I、DZT-II 同步观测结果（扣除基墩位置差异的影响）

观测日期	DZT-I						DZT-II						一致性	
	观测次数	单次观测星数	$\sigma_{\varphi, \text{night}} /$ (")	$\varphi /$ (")	$\sigma_{\lambda, \text{night}} /$ (")	$\lambda /$ (")	观测次数	单次观测星数	$\sigma_{\varphi, \text{night}} /$ (")	$\varphi /$ (")	$\sigma_{\lambda, \text{night}} /$ (")	$\lambda /$ (")	$d\varphi /$ (")	$d\lambda /$ (")
2017/06/01	243	34	0.26	22.28	0.28	24.70	299	95	0.33	22.26	0.26	24.59	0.02	0.11
2017/06/16	208	43	0.25	22.32	0.27	24.84	196	122	0.32	22.31	0.24	24.72	0.01	0.12
2017/06/26	198	42	0.22	22.37	0.28	24.70	219	122	0.20	22.35	0.21	24.61	0.02	0.09
2017/07/09	287	58	0.18	22.39	0.25	24.82	317	126	0.19	22.37	0.24	24.76	0.02	0.06
2017/07/11	189	68	0.24	22.43	0.21	24.82	228	149	0.31	22.36	0.26	24.80	0.07	0.02
2017/07/12	122	49	0.26	22.31	0.28	24.73	133	130	0.31	22.32	0.27	24.70	-0.01	0.03
2017/07/19	110	84	0.21	22.33	0.25	24.92	78	213	0.20	22.35	0.21	24.89	-0.02	0.03
2017/07/20	88	48	0.21	22.29	0.21	24.92	93	130	0.17	22.32	0.22	24.83	-0.03	0.09
均值	181	53	0.23	22.34	0.25	24.81	195	136	0.25	22.33	0.24	24.74	0.01	0.07
$(\sigma_{\varphi}, \sigma_{\lambda})_{\text{ref}}$	-	-	-	0.05	-	0.08	-	-	-	0.03	-	0.09	-	-
$(A_{\varphi}, A_{\lambda})_{\text{night}}$	-	-	-	0.15	-	0.23	-	-	-	0.10	-	0.30	-	-



(a) DZT-I、DZT-II 纬度观测一致性与平均单次观测星数



(b) DZT-I、DZT-II 经度观测一致性与平均单次观测星数

图 4 DZT-I、DZT-II 观测一致性与平均单次观测星数

表 2 DZT-I、DZT-II 7 月 9 日观测星数均大于 50 颗, 连续同步观测结果 (扣除基墩位置差异的影响)

仪器	观测次数	观测星数	$\varphi / (")$					$\lambda / (")$				
			$\varphi_{\text{night}}$	$\sigma_{\varphi, \text{group}}$	Mean $\sigma_{\varphi}$	Min $\sigma_{\varphi}$	Max $\sigma_{\varphi}$	$\lambda_{\text{night}}$	$\sigma_{\lambda, \text{group}}$	Mean $\sigma_{\lambda}$	Min $\sigma_{\lambda}$	Max $\sigma_{\lambda}$
DZT-I	128	85	22.37	0.05	0.15	0.12	0.22	24.81	0.06	0.18	0.13	0.23
DZT-II	136	173	22.36	0.06	0.16	0.13	0.21	24.80	0.05	0.18	0.12	0.24
$d\varphi, d\lambda$	-	-	0.01	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-

### 3.2 误差分析

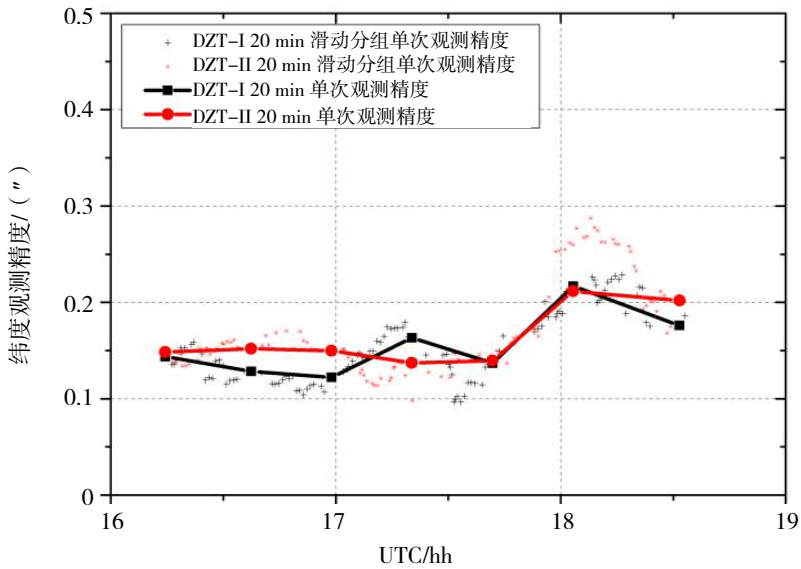
并址观测的公共误差源中星表位置误差为系统误差, 引起观测结果的变化, 但不会使组内单次观测精度 (限本文中所规定单次观测相对组均值的标准差) 出现大的波动; 而观测环境的影响比较复杂, 如



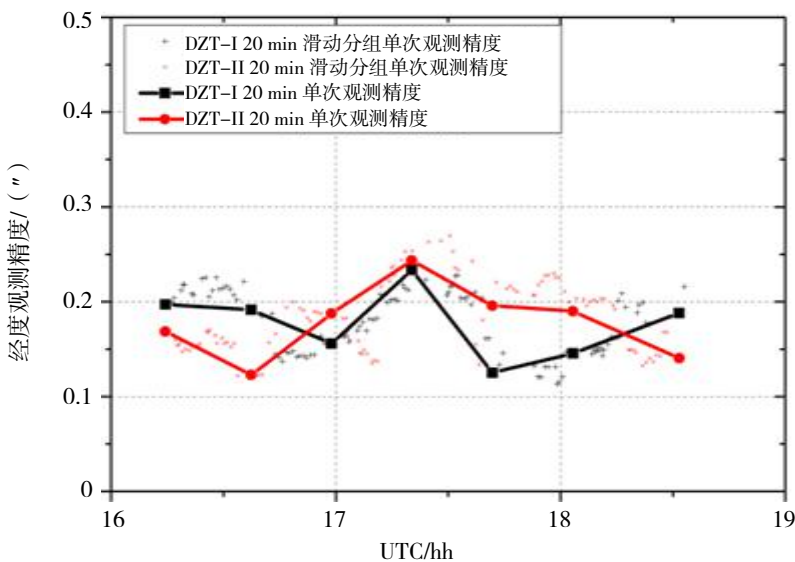
大气视宁度的变化，影响 CCD 拍摄底片的星像质量，使随机误差增大。温度和气压的变化，当温度及气压梯度在东西方向变化时主要对经度方向产生影响，在南北方向变化时主要对纬度方向产生影响<sup>[16-17]</sup>。

### 3.3 单次观测精度分析

两台仪器单次观测精度统计见表 2，纬度及经度方向观测精度最好  $(\sigma_\phi, \sigma_\lambda)_{\min}$  可达到  $(0.13'', 0.13'')$ ，平均精度  $(\sigma_\phi, \sigma_\lambda)_{\text{mean}}$  为  $(0.16'', 0.18'')$ 。如图 5 所示，纬度方向在 UTC17.75 时之前，单次观测精度约  $0.15''$ ，在 17.75 时之后，观测精度逐渐下降至  $0.20''$  左右，可见在 UTC17.75 时之后纬度方向误差影响变大。图 5 中还可以看到两台仪器经度方向观测精度的波动较大，观测精度最差均在 UTC17.35 时附近，为  $0.25''$  左右。经纬度观测精度的这种波动表明有一项公共的误差源即观测环境对仪器观测结果产生影响，并且对经度及纬度方向的影响并不相同，具体的影响机制还需结合环境监测数据进一步研究。



(a) 纬度方向 20 min 观测组内标准差变化趋势

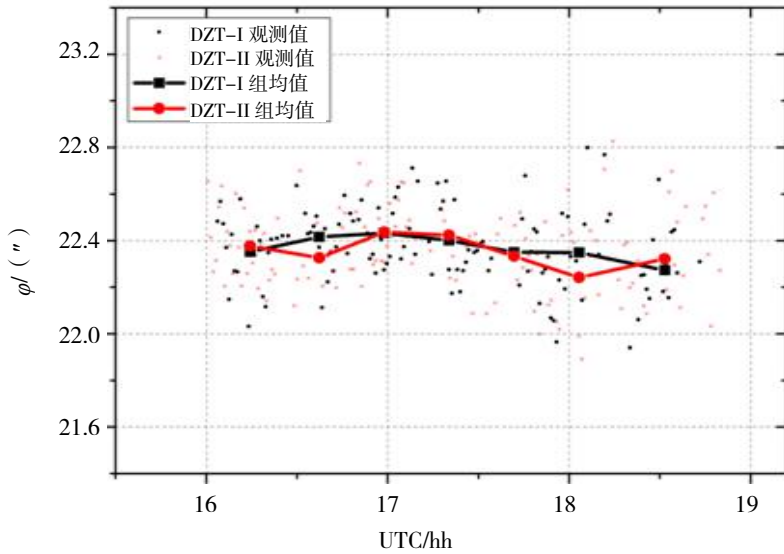


(b) 经度方向 20 min 观测组内标准差变化趋势

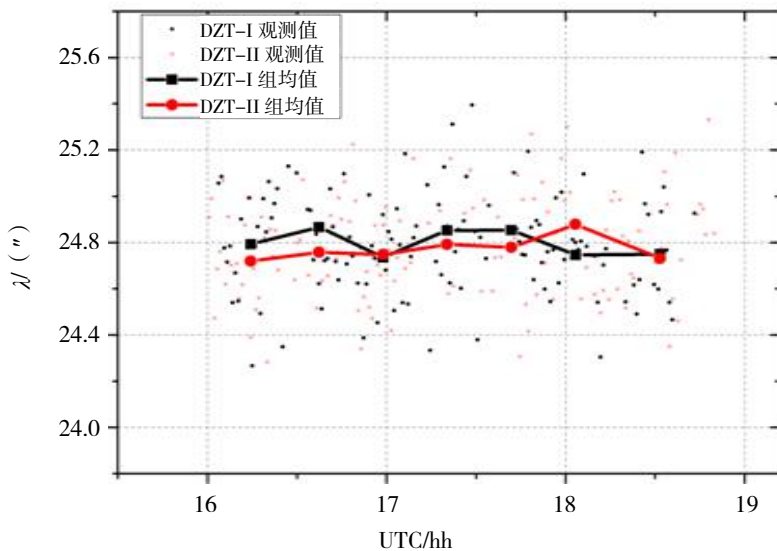
图 5 20 min 观测组内标准差变化趋势

### 3.4 单组观测精度分析

DZT-I、DZT-II 单组观测精度  $(\sigma_\phi, \sigma_\lambda)_{\text{group}}$  分别为  $(0.05'', 0.06'')$ <sub>DZT-I</sub>,  $(0.06'', 0.05'')$ <sub>DZT-II</sub>, 对比单次观测精度  $(0.16'', 0.18'')$ , 20 min 观测取均值能够消除大部分随机误差的影响。由图 6 中 20 min 一组的组均值分布可见, 图 6 (a) 中 DZT-I 纬度方向组均值 (方块) 与 DZT-II 的单组观测结果 (圆点) 一致性较好, 图 6 (b) 中经度方向两台仪器单组观测均值间无系统误差。



(a) DZT-I、DZT-II 纬度组均值



(b) DZT-I、DZT-II 经度组均值

图 6 DZT-I、DZT-II 经纬度组均值 (扣除基墩位置差异的影响)

两台仪器的  $\Delta\text{UT0}$  解算结果见图 7 所示, 其中方块为 DZT-I 的  $\Delta\text{UT0}$  解算结果, 组间标准差为 3.8 ms; 直线相连的圆点为 DZT-II 的  $\Delta\text{UT0}$  解算结果, 组间标准差为 3.5 ms; 虚线相连的圆点为两台仪器单组观测值的均值, 标准差为 2.4 ms, 多站组合观测能够提高世界时的解算精度。

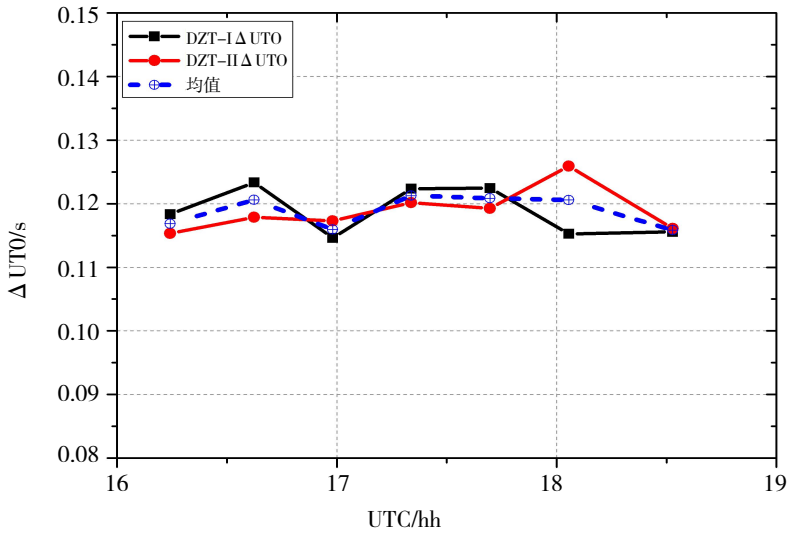


图 7 UTO 解算结果

## 4 结论

仪器误差及观测环境的影响是制约数字天顶望远镜观测精度提高的主要因素, 本文采用并址、同步观测, 避免了观测环境差异及星表误差的影响, 并对骊山站数字天顶望远镜初步观测结果进行了分析。结果表明, 视场较小的 DZT-I 单次观测星数明显小于 DZT-II, 这是影响两台仪器观测结果一致性的一项重要原因, 当选取 7 月 9 日 DZT-I、DZT-II 单次观测星数均达到 50 颗, 连续同步观测 2.8 h 的观测数据, 两台仪器的一致性  $d\varphi$ 、 $d\lambda$  由整晚观测的 (0.02", 0.06") 提高至 (0.01", 0.01")。单次观测星数不仅与望远镜的视场、光学系统设计 (观测的最高星等) 有关, 还与数据处理中所采用的参考星表有关。可通过仪器的升级改造扩大望远镜视场, 增加观测星数。对于现有的仪器及观测数据, 在数据处理中采用即将发布的 Gaia 星表可提高星像匹配的数量及位置精度, 有望进一步提高 DZT 的观测精度。

对气象条件较好、单次观测星数较多且连续同步观测时间最长的 7 月 9 日的观测数据进行分析, 两台仪器纬度及经度方向组内单次观测精度最好时均可达到 (0.13", 0.13"), DZT-I、DZT-II 的 20 min 单组观测精度  $(\sigma_\varphi, \sigma_\lambda)_{\text{group}}$  分别为 (0.05", 0.06")<sub>DZT-I</sub>, (0.06", 0.05")<sub>DZT-II</sub>。同时通过对同步观测的两台仪器经纬度方向滑动分组观测精度的对比分析, 发现观测环境对 DZT 观测精度的影响不仅随时间发生变化, 而且对经度及纬度方向的影响也不相同。观测当天 DZT 经度方向观测精度波动较大, 变化趋势与纬度方向不同, 具体的影响机制还需积累观测数据及气象资料进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] 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[J]. 地球物理学进展. 2012, 27(4): 1287-1293
- [2] PETIT G, LUZUM B. The IERS conventions (2010)[J]. IERS Technical Note, 2010(36): 1-95.
- [3] 赵铭. 天体测量学导论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006.
- [4] 田立丽, 郭金运, 韩延本, 等. 我国的数字化天顶望远镜样机[J]. 科学通报, 2014, 59(12): 1094-1099.
- [5] 刘次沅. 陕西天文台光电中星仪 1972—1976 年测时结果的风效应[J]. 陕西天文台台刊, 1978, 1(1): 10-13.
- [6] 谭徽松. 选址中的大气视宁度测量[J]. 天文学进展, 1992, 10(1): 48-55.
- [7] 高布锡. 反常折射引起的地面天文观测残差的周年变化[J]. 天文学报, 1994(1): 93-97.

- [8] 冒蔚, 彭青玉, 王晓彬. 研究大气反常折射的迫切性[J]. 天文研究与技术, 1997(s1): 101-105.
- [9] 叶叔华. 徐家汇观象台中星仪方位差的变化[J]. 天文学报, 1955, 3(2): 197-216.
- [10] 叶叔华. 徐家汇观象台天文测时的季节性变化[J]. 天文学报, 1957, 5(2): 281-291.
- [11] HIRT C. Entwicklung und erprobung eines digitalen zenitkamarasystems für die hochpräzise lotabweichungsbestimmung[D]. Munich, Bayern: Technische Universität München, 2004.
- [12] 杨廷高, 马雨刚. 由陕台光电等高仪(I)观测得到的 820 颗恒星的位置改正[J]. 陕西天文台台刊, 1983, 6(1): 75-109.
- [13] PENG Q Y, HAN Y B, ZHANG C L, et al. Image-processing techniques in precisely measuring positions of Jupiter and its Galilean satellites[J]. Astronomy Astrophysics, 2003, 401(2): 773-779
- [14] 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[J]. 科学通报, 2014, 59(2): 1100-1107
- [15] 季凯帆, 王锋. CCD 图像的二维修正矩定心方法[J]. 天文学报, 1996, 37(1): 85-90.
- [16] 李德河. 大气反常折射对星表和参考系的影响[J]. 陕西天文台台刊, 1998, 21(1): 59-64.
- [17] HIRT C. Monitoring and analysis of anomalous refraction using a digital zenith camera system[J]. Astronomy & Astrophysics, 2006, 459(1): 283-290.