

倾斜状态下数字天顶仪快速定位方法分析

张西辉,周召发,刘先一,朱文勇

(火箭军工程大学 兵器发射理论与技术国家重点学科实验室,陕西 西安 710025)

摘要: 针对数字天顶仪在精确调平状态下进行天文定位时存在耗费时间长,定位速度慢的缺点,从数字天顶仪的定位原理出发,采用方向余弦矩阵转换原理建立了倾斜角的修正模型,分析和推导了经过倾斜角修正之后的定位方法,改进了倾斜状态下数字天顶仪的切平面和球面三角形两种定位算法。实现定位时设备不经精调平,加快定位速度的目的。通过实验比较了在倾斜状态下经过改进后两种类型定位算法的定位精度。实验表明:球面三角形法的定位精度相对较高,经纬度计算精度能够达到 0.5" 以内。

关键词: 数字天顶仪; 倾斜状态; 切平面原理; 球面三角形法; 定位速度
中图分类号: P222 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0217002

Analysis of the fast positioning method of digital zenith camera in tilt state

Zhang Xihui, Zhou Zhaofa, Liu Xianyi, Zhu Wenying

(State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology, Rocket Force University of Engineering,
Xi'an 710025, China)

Abstract: Aiming at the problem of long time and slow positioning speed when the digital zenith camera was in precise leveling state for astronomical positioning, based on the principle of positioning the digital zenith camera, the correction model of the inclination angle was established by the direction cosine matrix transformation principle, the positioning method after the correction of the tilt angle was analyzed and deduced, and the two kinds of localization algorithms of the tangent plane and the spherical triangle of the digital zenith were improved, achieved the positioning of equipment without fine leveling, speeded up the positioning speed of the purpose. The accuracy of the two types of positioning algorithms in the tilted state was compared by experiment. Experiments show that the positioning accuracy of the spherical triangle method is relatively high, and the calculation accuracy of the latitude and longitude can reach 0.5" or less.

Key words: digital zenith camera; tilt state; tangent plane principle; spherical triangle method; positioning speed

收稿日期:2017-08-05; 修订日期:2017-10-03

基金项目:国家自然科学基金(41174162)

作者简介:张西辉(1992-),男,硕士生,主要从事定位定向技术方面的研究。Email:785564025@qq.com

导师简介:周召发(1973-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事定位定向与基准传递技术方面的研究。Email:549285422@qq.com

0 引言

运用数字天顶仪进行定位是一种高准确度的天文定位方法^[1-3]。在 21 世纪初德国与瑞士联合研制的 TZK2-D 数字天顶仪的定位准确度可以到达 0.05"^[4]。国内近期研制的 DZT-1 数字天顶仪的定位准确度也有了较大的提高^[5],但是相对于国外而言,国内数字天顶仪还处于一个样机的阶段,不够成熟。目前国内外对数字天顶仪的算法进行了大量的研究,德国的 Christian Hirt, Halicioglu^[6-7]等人对切平面法在天文定位中的运用进行研究,中国科学院国家天文台的王博、田立丽、王政等人^[8]对切平面法进行过部分改进;中国科学院西安光学精密机械研究所的曾志雄、胡晓东等人^[9]提出了利用球面三角形进行定位的方法,但是他们的定位算法都是将设备在精确调平后进行的,存在操作过程复杂,耗时间较长,定位速度慢的缺点。具体而言:将数字天顶仪进行精确调平时需要利用调平脚螺和长气泡水准仪进行反复调节,直至设备转动到任意位置时气泡位于水准仪中央(不超过 1/2 格),然后再根据双轴倾角传感器的读数不断调节脚螺直至双轴倾角传感器的读数在 10"以内,此操作过程繁琐且操作熟练的人员耗时间也将在 5 min 左右,因此利用数字天顶仪在倾斜状态下定位能够不经精调平,直接通过粗调平后便进行定位,简化操作过程、加快定位速度。算法的思想是在传统的切平面定位方法和球面三角形定位方法基础上,引入倾斜角的补偿,对倾斜角利用方向余弦矩阵进行修正,使倾斜的坐标系转换到水平上来。最后通过实验对两种改进的定位算法在精度上进行了比较,论证了定位的速度和精度。

1 倾斜状态下切平面定位方法

1.1 两 CCD 平面直角坐标系之间的旋转变换

两平面直角坐标系之间的无压缩和无拉伸变形的旋转关系可以用变换矩阵来描述,且该矩阵必定是单位正交矩阵,两平面之间任何复杂的旋转关系都可以用两种基本的旋转方式复合而成。

数字天顶仪在倾斜状态下进行定位时,CCD 平面直角坐标系也随之处于倾斜状态,故需要利用方向余弦矩阵将倾斜状态下的 CCD 平面直角坐标系

转换成水平状态下的 CCD 平面直角坐标系。两平面直角坐标系的位置关系如图 1 所示。

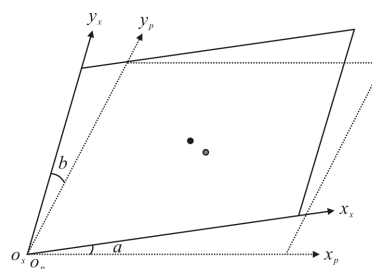


图 1 两 CCD 平面直角坐标系位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the position of the two CCD plane rectangular coordinate system

由图所知,坐标系 $o_p x_p y_p$ 为水平状态下的理想坐标系,坐标系 $o_x x_x y_x$ 为倾斜状态下的坐标系, $o_x x_x$ 、 $o_x y_x$ 轴与水平状态下 $o_p x_p y_p$ 坐标系的夹角分别为 a 和 b 。

(1) 绕 x_x 轴方向旋转

设倾斜状态下 CCD 平面直角坐标系为 $o_x x_x y_x$ (旧坐标系),绕 x_x 轴旋转 b 角得坐标系 $o_1 x_1 y_1$ (过渡坐标系),则可以写出变换矩阵:(1) 倾斜状态下 CCD 平面直角坐标系 x_x 轴的坐标 x_x (视作单位长度 1) 在过渡坐标系中投影依旧写为 $[1 \ 0]^T$; (2) 根据图 2,旧坐标 y_x (视作单位长度 1) 在过渡坐标系中投影写为 $[0 \ \cos b]^T$ 。则旧坐标系与过渡坐标系之间的坐标转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_x \\ y_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

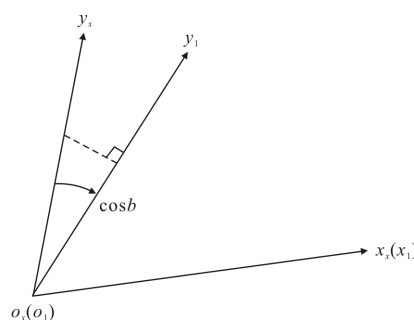


图 2 绕 x_x 轴旋转 b 角示意图

Fig.2 Schematic diagram of the b angle around the x_x axis

(2) 绕 y_1 轴方向旋转

设坐标系 $o_1 x_1 y_1$ (过渡坐标系) 绕 y_1 轴旋转 a 角得到水平状态下的 CCD 平面直角坐标系 $o_p x_p y_p$ (新坐标系),则可以写出变换矩阵:(1) 过渡坐标系 y_1 轴的坐标 y_1 (视作单位长度 1) 在新坐标系中投影依旧写为 $[1 \ 0]^T$; (2) 根据图 3,过渡坐标系 x_1 轴的坐标 x_1 (视

作单位长度 1) 在新坐标系中投影写为 $[\cos a \ 0]^T$ 。则过渡坐标系与新坐标系之间的坐标转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos a & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

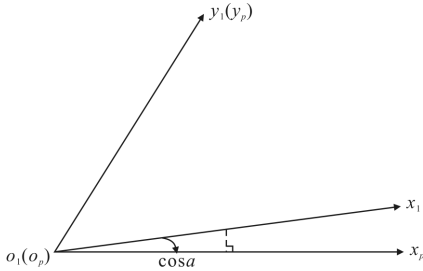


图 3 绕 y_1 轴旋转 a 角示意图

Fig.3 Schematic diagram of the a angle around the y_1 axis

所以根据公式(1)、(2)可得新坐标系与旧坐标系之间的坐标转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos a & 0 \\ 0 & \cos b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_x \\ y_x \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 切平面定位原理

恒星赤道坐标属于球坐标系,为了建立与 CCD 平面坐标之间的关系,需将赤道坐标投影到过接近天顶相切的切平面上,建立切平面坐标系 $O'XY$ 。切平面坐标系是以测站点概略天文坐标 (α_0, δ_0) 确定的垂轴与天球的交点 O' 为原点,以子午线切线方向为 X 轴,以卯酉圈切线方向为 (α, δ) 轴确定的平面直角坐标系, X 轴与 Y 轴分别指向北向与东向。天文坐标为 (X, Y) 的恒星在切平面上的坐标可表示为 (X, Y) , 如图 4 所示。

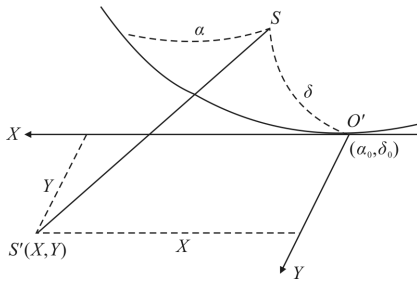


图 4 切平面投影原理图

Fig.4 Schematic of tangent plane projection

定位时,数字天顶仪先拍摄星图,然后通过星图识别算法识别恒星在天球中的坐标 (α, δ) , 并计算恒星在 $XO'Y$ 中的坐标,投影变换公式为:

$$\begin{cases} X = \frac{\tan(\alpha - \alpha_0) \cos q}{\cos(q - \delta_0)} \\ Y = \tan(q - \delta_0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\cot q = \cot \delta \cos(\alpha - \alpha_0)$ 。

运用 Helmert 变换式建立起天球切平面坐标系与水平状态下的 CCD 平面直角坐标系之间的映射关系,则有:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & -n \\ n & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据公式(3),可得:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & -n \\ n & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos a & 0 \\ 0 & \cos b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_x \\ y_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: a_1, a_2 为位移参数; m 为补偿坐标轴方向差的参数; n 为补偿坐标尺度变化的参数。

利用恒星在 $o_p x_p y_p$ 和 $XO'Y$ 中的坐标,计算 $o_p x_p y_p$ 和 $XO'Y$ 之间的转换关系。在理想状况下, $o_p x_p y_p$ 的原点 o_p 即为测站点的位置,故将中心点坐标 $(0, 0)$ 代入公式(6),可得 o_p 在 $XO'Y$ 中的坐标 (a_1, a_2) , 代入切平面反变换公式为:

$$\begin{cases} \alpha_i = \alpha_0 + \arctan \frac{X_i}{\cos \delta_0 - Y_i \sin \delta_0} \\ \delta_i = \frac{\arctan(Y_i + \tan \delta_0) \cos(\alpha - \alpha_0)}{1 - Y_i \tan \delta_0} \end{cases} \quad (7)$$

经过多次迭代计算得到 o_p 在天球上的坐标 $(\alpha_{\text{ccd}}, \delta_{\text{ccd}})$, 做时间补偿后即可得到测站点的天文坐标:

$$\begin{cases} \Phi = \delta_{\text{ccd}} \\ \Lambda = \alpha_{\text{ccd}} - \Theta \end{cases} \quad (8)$$

式中: Θ 为春分点格林时角。

2 倾斜状态下球面三角形定位方法

在测站点上数字天顶仪的光轴倾斜指向天顶获取恒星的影像。进行星图识别后可以得到恒星的天球赤道坐标,计算出恒星影像坐标的理论值,并测量恒星影像坐标的实际值,通过最小二乘平差法,获得测站天顶的天球赤道坐标。

数字天顶仪在倾斜状态下进行定位时,以 CCD 芯片的成像面作为量测坐标系 $o_x x_x y_x$, 将原点设在 CCD 面阵的一角,两边分别为坐标轴 $o_x x_x$ 和 $o_x y_x$ 。坐标轴 $o_x x_x$ 和 $o_x y_x$ 分别与水平面的夹角为 a, b 。CCD 理想坐标系 ONE 位于水平状态下的 CCD 平面直角坐标系 $o_p x_p y_p$ 平面中,此坐标平面与数字天顶仪的垂直轴垂直,并与以数字天顶仪焦距 f 为半径的球面相切,其切点即为 ONE 的原点 O, N 轴指向正北, E 轴指向正东,坐标单位取为 mm,两坐标系间的夹角为 θ 。如图 5 所示。

由天球的北极 P 、测站点的天顶 (α_0, δ_0) 、任意一颗恒星 (α, δ) 构成球面三角形。根据投影关系,可以得出恒星在水平 CCD 坐标系中的理论坐标为:

$$x_p = x_c - \frac{f}{\text{pix}} \times \frac{\sin(\alpha - \alpha_0) \cos \theta + [\cos \delta_0 \tan \delta - \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)] \sin \theta}{\sin \delta_0 \tan \delta + \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)} \quad (9)$$

$$y_p = y_c - \frac{f}{\text{pix}} \times \frac{\sin(\alpha - \alpha_0) \sin \theta - [\cos \delta_0 \tan \delta - \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)] \cos \theta}{\sin \delta_0 \tan \delta + \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)} \quad (10)$$

式中： x_c, y_c 为 O 在 $o_p x_p y_p$ 中的坐标，焦距的单位为 mm，两者均为已知量； pix 为 CCD 像元尺寸，单位为 mm； (α_0, δ_0) 为测站点的天球赤道经纬度； (α, δ) 为恒星的赤经赤纬。

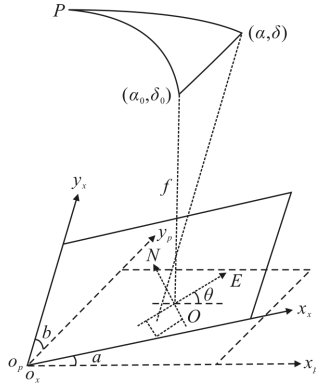


图 5 倾斜状态下的球面三角形定位原理图

Fig.5 Schematic diagram of the spherical triangle positioning in the tilted state

以 GPS 测得的经纬度 (α_0, δ_0) 作为测站点初始概略天文坐标值，对于任意一颗恒星的影像测量坐标的误差方程为：

$$U = K\Delta X + M \quad (11)$$

使 $U^T W U = \min$ 的条件下可得：

$$\Delta X = -(K^T K)^{-1} K^T W M \quad (12)$$

式中： $\Delta X = [\Delta \delta \ \Delta \alpha \ \Delta \theta]^T$ ； K 为一次误差系数矩阵； W 为 δ, α, θ 三个分量的权系数矩阵，此处权系数相同，所以 W 为单位矩阵。

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \delta_0} & \frac{\partial x}{\partial \alpha_0} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial \delta_0} & \frac{\partial y}{\partial \alpha_0} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$M = \begin{bmatrix} x_0 - x_p \\ y_0 - y_p \end{bmatrix} \quad (14)$$

因为实际量测坐标系 $o_p x_p y_p$ 与水平状态下的 CCD 平面直角坐标系 $o_c x_c y_c$ 存在夹角 a, b ，故要利用方向余弦矩阵进行坐标转换。

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos a & 0 \\ 0 & \cos b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中： a, b 为两个方向上的倾斜角，其数值可由双轴倾角仪准确测出。 x_c, y_c 由 CCD 量测坐标系得出。

根据初始值用公式(9)、(10)首先计算第 i 颗恒

星的理论坐标，结合实际测量坐标值 (x_c, y_c) ，代入上述式子计算出 K, M 。把 K, M 代入公式(12)，就可以计算出三个未知量的偏差 ΔX ，再把此偏差迭加到初始值中求逼近的解，最后将求得的结果当作初始值，重复上面的过程。经过数次重复计算后就可以得出非常精确的解，从而求出测站点的天文经纬度。

3 实验数据处理与分析

实验过程中采用的数字天顶仪的视场角大小为 $3^\circ \times 3^\circ$ ，CCD 采用 KAF-16803 全画幅图像传感器，分辨率为 4096×4096 ，像素大小 $9 \mu\text{m}$ ，有效面积 $36.8 \text{mm} \times 36.8 \text{mm}$ 。采用的双轴倾角仪为 Nivel210，测量范围为 $\pm 410''$ ，分辨率为 $0.2''$ 。数字天顶仪工作时先顺时针拍摄 8 幅星图，然后再逆时针拍摄 8 幅星图，然后将对称位置上的 2 幅星图作为 1 个解算单元。已知测站点概略的天文经度为 109° ，天文纬度为 34° ，以第一幅图像为例可得出如表 1 所示的部分识别恒星数据。

表 1 部分识别恒星数据

Tab.1 Part recognized star data

No.	CCD x coordinate/pixel	CCD y coordinate/pixel	Star longitude/(°)	Star latitude/(°)
1	1 821.375 16	1 052.041 08	108.972 47	33.463 06
2	582.921 23	1 953.314 29	107.576 09	34.087 86
3	1 018.702 61	1 331.178 81	108.112 97	33.609 88
4	748.267 38	1 857.377 14	107.760 14	34.026 19
5	319.531 01	2 472.487 44	107.227 22	34.497 55
6	3 216.259 36	3 438.462 54	110.112 52	35.648 10
7	1 920.094 89	3 502.274 49	108.743 16	35.564 98
8	1 504.530 94	2 033.581 84	108.514 35	34.265 21
9	1 423.600 80	3 928.463 71	108.161 98	35.871 27
10	2 734.526 04	907.078 12	109.925 63	33.436 56
11	2 919.020 83	2 999.053 87	109.855 69	35.242 66
12	642.039 56	3 025.738 30	107.477 85	35.008 39
13	3 489.853 35	1 196.170 04	110.665 39	33.75 845
14	3 727.012 52	1 252.563 50	110.90270	33.829 23
15	2 884.676 47	1 741.878 43	109.977 08	34.164 83
16	1 592.314 65	3 155.932 89	108.448 32	35.232 48
17	1 139.004 51	2 911.072 23	108.011 42	34.971 06
18	1 552.523 84	549.738 07	108.765 10	33.004 97
19	2 170.039 78	2 542.978 78	109.134 23	34.773 93
20	2 647.552 22	1 229.344 01	109.796 19	33.702 65

对获取的实验数据根据切平面法定位原理和球面三角形法定位原理设计定位算法,经过编程计算,

可得到在不同方位、不同倾斜状态、利用不同定位方法计算出的结果如表 2 所示。

表 2 定位结果

Tab.2 Positioning results

No.	Position	Dip angle $N_1/(\text{°})$	Dip angle $N_2/(\text{°})$	Position	Dip angle $N_1/(\text{°})$	Dip angle $N_2/(\text{°})$	Tangent plane method		Spherical triangle method	
							Calculate latitude/ (°)	Calculate latitude/ (°)	Calculate latitude/ (°)	Calculate latitude/ (°)
1	1	73.64	-74.67	5	-99.01	74.05	34.299 54	109.083 4	34.299 35	109.083 3
2	2	-6.81	-111.38	6	-18.15	113.86	34.298 99	109.084 4	34.298 85	109.084 3
3	3	-84.77	-81.06	7	64.97	81.47	34.299 15	109.085 1	34.298 99	109.084 8
4	4	-122.32	-8.87	8	100.45	5.36	34.299 54	109.084 5	34.299 35	109.084 5
5	9	100.24	5.36	13	-121.91	-9.08	34.299 65	109.084 5	34.299 50	109.084 5
6	10	64.97	81.68	14	-83.74	-80.86	34.299 38	109.084 7	34.299 33	109.084 8
7	11	-18.15	114.27	15	-5.36	-110.15	34.299 35	109.084 2	34.299 07	109.084 1
8	12	-99.21	74.05	16	74.87	-72.8	34.299 90	109.083 3	34.299 77	109.083 3

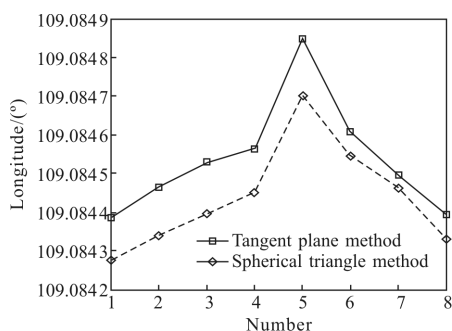
为了更明显地表示出倾斜状态下不同定位算法的定位结果,画出两种方法定位结果计算值的分布图如图 6 所示。

通过上述两图可初步进行不同算法经纬度计算值的精度比较。利用球面三角形定位原理计算出的结果曲线较为平缓故计算精度较高。但是上述结论仅仅是初步分析结果,所以为了更严密地分析不同定位算法的定位精度,通过计算其标准差来比较定位精度的高低,计算结果如表 3 所示。

表 3 不同定位算法经、纬度计算标准差

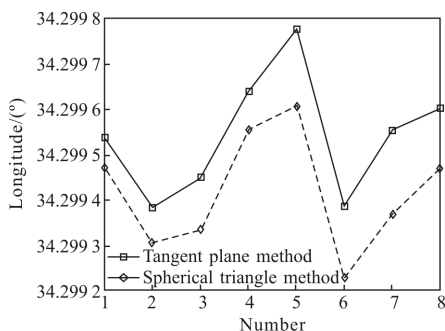
Tab.3 Standard deviation of longitude and latitude calculation of different positioning algorithm

Location algorithm	Longitude standard deviation/ (°)	Latitude standard deviation/ (°)
Tangent plane method	$1.478\ 850\ 54 \times 10^{-4}$	$1.347\ 042\ 55 \times 10^{-4}$
Spherical triangle method	$1.371\ 500\ 73 \times 10^{-4}$	$1.297\ 122\ 96 \times 10^{-4}$



(a) 不同定位算法经度计算值分布图

(a) Longitude calculation distribution of different positioning algorithm



(b) 不同定位算法纬度计算值分布图

(b) Latitude calculation distribution of different positioning algorithm

图 6 不同定位算法经、纬度计算值分布图

Fig.6 Distribution of latitude and longitude calculation of different positioning algorithm

通过表 3 可以看出球面三角形定位方法计算值标准差小于切平面定位方法的计算值标准差,故由球面三角形解算出来的天文经纬度精度较高。目前在精确调平状态下天文定位的精度能达到 $0.3''$,由表 3 可知,在倾斜状态下解算出来的天文经纬度精度可以达到 $0.5''$ 左右,相比而言倾斜状态下的解算精度有所下降,但是倾斜状态定位时省去了对设备精确调平的步骤,能够大大节省定位时间。

4 结 论

传统的定位方法都是将数字天顶仪精确调平后进行的实验,存在操作过程复杂,耗时间长,定位速度慢的缺点。所以文中给出了设备在倾斜状态下便可进行定位的两种方法,在传统的切平面定位方法和球面三角形定位方法基础上,引入倾斜角的补偿,对倾斜角利用方向余弦矩阵进行修正后进行解算。实验表明,倾斜状态下解算出来的天文经纬度精度可以达到 0.5",在定位精度损失不大的情况下,定位速度得到提高,定位时间大为缩短。

参 考 文 献:

[1] Tian Lili, Guo Jinyun, Han Yanben, et al. Digital zenith telescope prototype of China[J]. *Chin Sci Bull*, 2014, 59(12): 1094–1099. (in Chinese)
田立丽, 郭金运, 韩延本, 等. 我国的数字化天顶仪样机[J]. 科学通报, 2014, 59(12): 1094–1099.

[2] Song Laiyong. Research on theory and algorithm for measuring of vertical deflections based on CCD and GPS [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
宋来勇. 基于 CCD/GPS 垂线偏差测量理论算法研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2012.

[3] Guo Min, Zhang Hongying. The application of CCD in the astronomy orientation [J]. *Measurement Technology*

Equipment, 2005, 7(1): 28–29. (in Chinese)
郭敏, 张红英. CCD 数字摄影在天文定位测量中的运用探讨[J]. 测绘技术装备, 2005, 7(1): 28–29.

[4] Hirt C, Seeber G. Accuracy analysis of vertical deflection data observed with the hannover digital zenith camera system TZK2–D[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(6): 347–356.

[5] Zhai Guangqing, Ai Guibin. Digital zenith camera astronomical positioning measurement of project implementation [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2014, 31(3): 232–235. (in Chinese)
翟广卿, 艾贵斌. 数字天顶仪摄影天文定位测量的工程实现[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(3): 232–235.

[6] Halicioglu K, Deniz R, Ozener H. Digital zenith camera system for astro-geodetic applications in turkey [J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 2012, 1(2): 115–120.

[7] Hirt C, Bürki B, Somieski A, et al. Modern determination of vertical deflections using digital zenith camera[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2010, 136(1): 1–12.

[8] Wang Bo, Tian Lili, Wang Zheng, et al. The image and data processing in digital zenith camera [J]. *Chin Sci Bull*, 2014, 59(12): 1100–1107. (in Chinese)
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(12): 1100–1107.

[9] Zeng Zhixiong, Hu Xiaodong, Gu Lin, et al. The image processing in the digital zenith camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(2): 248–251. (in Chinese)
曾志雄, 胡晓东, 谷林, 等. 数字天顶仪摄影仪的图像处理[J]. 光子学报, 2004, 33(2): 248–251.