

基于数字天顶仪的视场角分析

刘先一,周召发,张志利,刘殿剑,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: 运用数字天顶仪进行定位是一种高精度的天文测量方法。在定位的过程中需要设定概略位置和进行局部星图识别。局部星图识别是在以概略位置为中心的一定范围内进行的。在进行局部星图识别时一般用数字天顶仪的视场角来确定局部星图识别的范围,实际上这是不准确的。通过对数字天顶仪视场角的分析推导了局部星图识别时的经纬度范围,并通过局部星图识别的范围对概略位置进行了研究。实验数据的分析结果表明,在进行局部星图识别时选取的经纬度范围是要大于视场角的,且随着概略位置的设定值逐渐接近测站点真实值,识别的恒星数量也在逐渐增加。

关键词: 数字天顶仪; 天文测量; 星图识别; 概略位置

中图分类号: V448;TH752 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0617001

Analysis of field of view angle based on digital zenith camera

Liu Xianyi, Zhou Zhaofa, Zhang Zhili, Liu Dianjian, Zhu Wenying

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

Abstract: Digital zenith camera has high precision in astrogeodesy. Identifying the star partially and setting the approximate position are needed when using digital zenith camera to orient. The scope is around the approximate position during star identification partially. Generally, the scope is usually replaced by field of view angle of digital zenith camera. Actually, this is not correct. The scope of star identification partially was deduced based on the analysis of the field of view angle of digital zenith camera. Then, the approximate position was analyzed according to the scope. The experimental data demonstrates that the range of longitude and latitude of identified stars should be above the field of view angle of digital zenith camera. Also, the recognized star number will rise when the approximate position is close to the true position.

Key words: digital zenith camera; astrogeodesy; star identification; approximate position

收稿日期:2015-10-24; 修订日期:2015-11-27

基金项目:国家自然科学基金(41174162)

作者简介:刘先一(1991-),男,硕士生,主要从事定位技术方面的研究。Email: 1397559188@qq.com

导师简介:周召发(1973-),男,副教授,硕士生导师,主要定位定向与基准传递技术方面的研究。Email: effortyao@163.com

0 引言

随着 CCD 的发展,运用数字天顶仪进行定位成为一种高精度的天文定位方法^[1-2],国外对于数字天顶仪的研究较为成熟^[3-4],国内对于数字天顶仪的研究处于起步阶段,相对于国外而言,国内的数字天顶仪还处于一个样机的阶段^[5]。数字天顶仪通过旋转在不同的方位上进行星图的拍摄^[6],设定测站点的概略位置后,将星图与星表结合进行局部星图的识别,并建立识别恒星的图像坐标系与天球切平面坐标系之间的转换关系,迭代数次后实现对测站点位置的解算^[7]。

在进行定位的过程中,为了提高星图识别的速度,仅选取天顶附近的恒星作为恒星识别的参考星^[8-9]。以概略位置为中心,通过数字天顶仪的视场角确定局部星图识别的范围^[10]。王博等人在进行星图识别时直接用数字天顶仪的视场角确定局部星图识别的参考星经纬度范围值^[11],实际上这种解法是不合理的,局部星图识别的经纬度范围是与测站点位置的纬度相关联的^[12-13],目前研究局部星图识别范围文献相对较少。为了确定局部星图识别时参考恒星的经纬度范围值从而提高星图识别的速度和效率,文中通过对数字天顶仪视场角的研究推导了局部星图识别的范围,并对概略位置的设定值进行了分析,最后对实验数据进行了分析。

1 数字天顶仪的视场角分析

数字天顶仪由光学望远镜、CCD 图像传感器、GPS 接收机、调平系统、控制系统和数据处理系统等构成。

数字天顶仪在定位的过程中通过 CCD 图像传感器进行星图的拍摄,数字天顶仪的视场角由 CCD 图像传感器确定。在进行星图识别时,通过数字天顶仪的视场角确定局部星图识别时参考恒星的经纬度范围,视场角的大小将直接影响到识别恒星的数量,进而影响到数字天顶仪的定位精度^[7],因此研究数字天顶仪的视场角对于定位显得比较重要。数字天顶仪中采用的 CCD 图像传感器为正方形,如图 1 所示。

为了表示出在星图拍摄的过程中 CCD 图像传感器的摆放位置,根据 CCD 图像传感器中心点与北

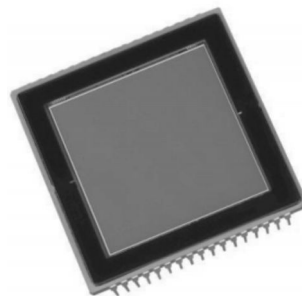


图 1 CCD 图像传感器

Fig.1 CCD imaging sensor

向之间的关系定义 CCD 图像传感器的摆放位置,此时将过 CCD 图像传感器中心点并与图像传感器的边缘平行的方向表示为 CCD 图像传感器的摆放位置,如图 2 所示。

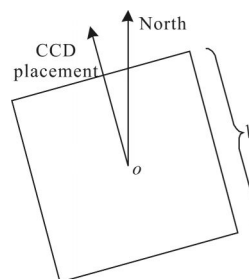


图 2 CCD 图像传感器摆放位置示意图

Fig.2 Placement of CCD imaging sensor

数字天顶仪的视场角大小为 $\psi_0^\circ \times \psi_0^\circ$,为了更好地研究数字天顶仪进行局部星图识别时参考星的经纬度范围,根据 CCD 图像传感器的摆放位置分为两种情况进行讨论。一种是 CCD 图像传感器摆放位置与北向平行,另一种是 CCD 图像传感器的摆放位置与北向之间存在夹角。

1.1 CCD 图像传感器的摆放位置与北向平行

在进行星图拍摄时,要对数字天顶仪进行精调平,此时 CCD 图像传感器的光轴方向将垂直指向天顶。当 CCD 图像传感器摆放位置与北向平行时,可得如图 3 所示的示意图。

因为 CCD 图像传感器是一个正方形,拍摄的范围是要大于给定的数字天顶仪视场角的范围,所以实际上数字天顶仪视场角范围要大于 $\psi_0^\circ \times \psi_0^\circ$,通过数字天顶仪视场角确定局部星图识别时参考星经纬度范围的值。将 CCD 图像传感器的视轴从赤道向两极移动时,视场覆盖的纬度的跨度值可以认为是不变的,此时纬度的跨度值为 ψ_0 ;但是经度的跨度值是

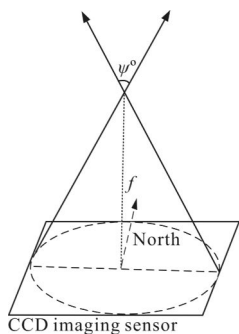


图 3 视场角示意图

Fig.3 Sketch map of field of view angle

与当前视轴的纬度值有关的。

CCD 图像传感器是由许多个像素单元构成的, 假设正方形 CCD 图像传感器边缘长度为 h , 数字天顶仪的焦距值为 f , 则有:

$$\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) = \frac{h}{2f} \quad (1)$$

假设 CCD 图像传感器的中心的经纬度坐标值为 (α_0, δ_0) , 当在纬度点 o' 处时, 纬度变化量为 $\Delta\delta$ 。此时纬度值 $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$, 纬度为 δ 时的经度范围为 Δa , 如图 4 所示。

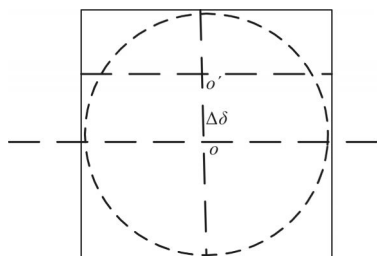


图 4 视场角平面示意图

Fig.4 Plane figure of vision angle

此时视场大小 ψ 为:

$$\tan\left(\frac{\psi}{2}\right) = \frac{h \cos \Delta\delta}{2f} \quad (2)$$

这里天球半径为 R , 在纬度值为 δ 时的半径值为 r 。如图 5 所示。

则有:

$$2R \tan\left(\frac{\psi}{2}\right) = 2r \sin\left(\frac{\Delta a}{2}\right) \quad (3)$$

式中: $r = R \cos \delta$ 。可以得出在不同纬度下的经度跨度值 Δa 为:

$$\Delta a = 2 \arcsin\left(\frac{\sin(\psi/2)}{\cos(\delta_0 + \Delta\delta)}\right) \quad (4)$$

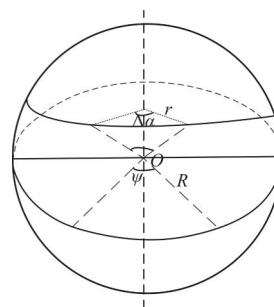


图 5 经度跨度示意图

Fig.5 Sketch map of longitude range

其中 $\Delta\delta \in \left(-\frac{\psi_0}{2}, \frac{\psi_0}{2}\right)$ 。由公式(2)可得:

$$\sin\left(\frac{\psi}{2}\right) = \frac{h}{\sqrt{h^2 + \frac{4f^2}{\cos^2(\Delta\delta)}}} \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(4)可以得出:

$$\Delta a = 2 \arcsin\left(\frac{h}{\sqrt{h^2 + \frac{4f^2}{\cos^2(\Delta\delta)}}} \cos(\delta_0 + \Delta\delta)\right) \quad (6)$$

对公式(6)进行分析, 在一般情况下, 认为测站点的纬度值 δ_0 大于图像传感器的视场角。可得当 $\Delta\delta \in \left(-\frac{\psi_0}{2}, \frac{\psi_0}{2}\right)$ 时, 经度的跨度值 Δa 随着 $\Delta\delta$ 值的增加而增加。也就是当 $\Delta\delta = -\frac{\psi_0}{2}$ 时, 经度的跨度值 Δa 最小; 当 $\Delta\delta = \frac{\psi_0}{2}$ 时, 经度的跨度值 Δa 最大, 此时有:

$$\Delta a_{\min} = 2 \arcsin\left(\frac{\sin(\psi'/2)}{\cos(\delta_0 - \psi_0/2)}\right) \quad (7)$$

$$\Delta a_{\max} = 2 \arcsin\left(\frac{\sin(\psi'/2)}{\cos(\delta_0 + \psi_0/2)}\right) \quad (8)$$

其中 CCD 图像传感器的视场大小为 $\psi' = 2 \arctan \frac{h \cos(\psi_0/2)}{2f}$ 。

1.2 CCD 图像传感器的摆放位置与北向之间存在夹角

在运用数字天顶仪进行定位的过程中, 需要旋转拍摄星图。在拍摄星图的过程中, CCD 图像传感器的摆放位置随着旋转位置的不同而发生变化, 这时 CCD 图像传感器的摆放位置与北向之间存在着方位角, 如图 6 所示。

求解此时经度的跨度值, 实际上也就是求解 AC 之间的经度跨度值。此时 AC 之间的距离值为 $\sqrt{2} h$ 。通过公式(8)得出的单调性结论可得跨度值为:

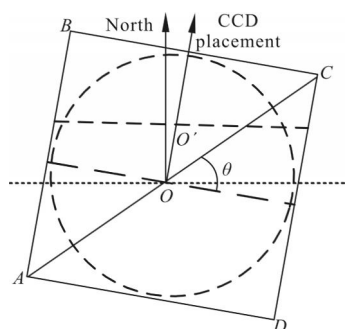


图 6 旋转后的 CCD 图像传感器

Fig.6 Placement of CCD imaging sensor after rotating

$$\Delta a \leq \frac{\sqrt{2} h \cos \theta}{\sqrt{(\sqrt{2} h \cos \theta)^2 + \frac{4f^2}{\cos^2(\Delta\delta_c)} \cos(\delta_0 + \Delta\delta_c)}} \quad (9)$$

$$\Delta a \geq \frac{\sqrt{2} h \cos \theta}{\sqrt{(\sqrt{2} h \cos \theta)^2 + \frac{4f^2}{\cos^2(\Delta\delta_c)} \cos(\delta_0 - \Delta\delta_c)}} \quad (10)$$

因为:

$$\tan \Delta\delta_c = \frac{\sqrt{2} h \sin \theta}{2f} \quad (11)$$

联立公式(9)~(11)可以得出当 $\theta=0$ 时, CCD 图像传感器的视场大小为:

$$\psi_{AC} = 2 \arctan \frac{\sqrt{2} h}{2f} \quad (12)$$

此时经度的跨度值最大为:

$$\Delta a_{\max 2} = 2 \arcsin \left(\frac{\sin(\psi_{AC}/2)}{\cos \delta_0} \right) \quad (13)$$

显然此时的纬度跨度值也最大,最大值为 ψ_{AC} 。

当 $\theta=45^\circ$ 时,经度的跨度值最小,此时图像传感器的摆放位置与北向一致,经度的跨度值为:

$$\Delta a_{\min 2} = \Delta a_{\min 1} = 2 \arcsin \left(\frac{\sin(\psi'/2)}{\cos(\delta_0 - \psi_0/2)} \right) \quad (14)$$

此时的纬度跨度值也最小,最小值为 ψ_0 。

比较 CCD 图像传感器在两种不同条件下的经度与纬度的跨度值,可以得出在数字天顶仪拍摄星图的过程中经度跨度的最大值为 $\Delta a_{\max} = \Delta a_{\max 2}$, 纬度跨度的最大值为 $\Delta \delta_{\max} = \psi_{AC}$; 经度跨度的最小值为 $\Delta a_{\min} = \Delta a_{\min 1}$, 纬度跨度的最小值为 $\Delta \delta_{\min} = \psi_0$ 。

综上所述,在数字天顶仪进行旋转拍摄星图时,进行局部星图识别的经度范围值为 $\Delta a_{\max 2}$, 纬度范围值为 ψ_{AC} 。

2 视场角对局部星图识别的影响分析

运用数字天顶仪进行天文定位时,需要设定测

站点的概略位置,概略位置可以通过 GPS 等一些外部手段进行设定。设定完概略位置后,以概略位置为中心点进行局部星图识别。

2.1 视场角对于概略位置的影响分析

在进行恒星星图识别时,以概略位置 (α', δ') 为中心点确定星图识别的参考星经纬度范围,从而进行恒星的识别。因此必须保证以概略位置为中心原点的局部星图识别的经纬度范围与通过 CCD 图像传感器确定的经纬度范围有交集区域,否则将无法进行星图识别。

为保证在以概略位置为中心的经纬度范围内能够进行星图识别,则应有:

$$\begin{aligned} |\alpha' - \alpha_0| &< \Delta a_{\min} \\ |\delta' - \delta_0| &< \Delta \delta_{\min} \end{aligned} \quad (15)$$

当概略位置与 CCD 图像传感器中心的经纬度坐标满足关系式(15)时,以概略位置为中心原点进行星图识别时能够保证星图识别的进行。这也表明在进行局部星图识别时,概略位置的设定并不是任意的。

2.2 视场角对识别恒星的影响分析

在进行局部星图识别的过程中选取识别恒星经纬度范围的大小将影响识别恒星的数目,但是当选取识别恒星的经纬度较大时会增加星图识别的计算量,影响恒星星图识别的速度。为了保证在较快速度下进行星图识别,选取以概略位置中心处的最大经纬度跨度为局部星图识别的范围,也就是使局部识别时恒星的经纬度 (α, δ) 满足:

$$\begin{aligned} a' - \Delta a_{\max} &< \alpha < \alpha' + \Delta a_{\max} \\ \delta' - \Delta \delta_{\max} &< \delta < \delta' + \Delta \delta_{\max} \end{aligned} \quad (16)$$

在这种条件下,能够保证识别恒星数量的同时使星图识别的计算量不至于较大。

3 实验数据分析

实验过程中采用的数字天顶仪的视场角大小为 $3^\circ \times 3^\circ$, 焦距值为 600 mm。CCD 传感器安装在镜筒下方,通过调焦装置与镜筒连接在一起,可随镜筒一起转动。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 $36.8 \text{ mm} \times 36.8 \text{ mm}$ 。运用数字天顶仪进行实验,一个循环条件下数字天顶仪拍摄 16 幅恒星星图,处于对称位置

上的恒星星图为一组解算单元。此时设定概略位置为(109°,34°),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 of star data

CCD x coordinate/pixel	CCD y coordinate/pixel	Star longitude/(°)	Star latitude/(°)
4 019.800	2 025.901	110.835	35.257
150.832	2 797.997	107.026	33.958
459.306	1 571.106	108.008	33.240
3 111.637	1 183.713	110.514	34.225
1 383.511	498.306	109.409	32.918
3 166.484	3 979.762	108.943	36.259
3 656.113	1 669.417	110.716	34.830
3 261.988	72.518	111.267	33.491
1 398.922	288.571	109.541	32.775
57.704	3 000.040	106.827	34.055

实际上可以解算出数字天顶仪的视场角大小为 3.5°×3.5°, 局部星图识别时经度的范围值为 6.02°, 纬度的范围值为 4.98°。对表 1 中的数据解算可知,在识别出的恒星中经度范围值为 4.44°, 纬度范围值为 3.48°。显然识别的恒星的经纬度的范围值是要大于 CCD 图像传感器实际的视场角,但是要小于理论解算经纬度的范围值,这是与概略位置的选取相关的。

在解算的过程中取对称位置的恒星星图为一解算单元,解算结果如图 7 所示。

可以得出测站点最终的解算结果为(109.121, 34.316)。选取不同的概略位置进行测站点的解算,可以得出当选取的概略位置不在实际经纬度范围内,将不能进行局部星图识别。当概略位置接近测站点

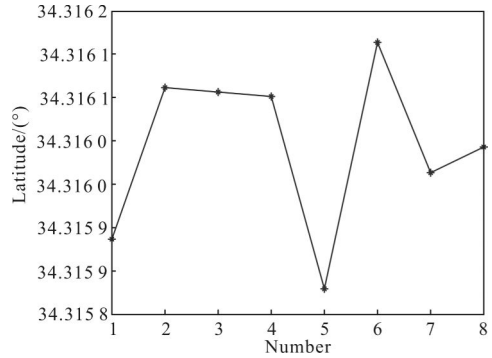
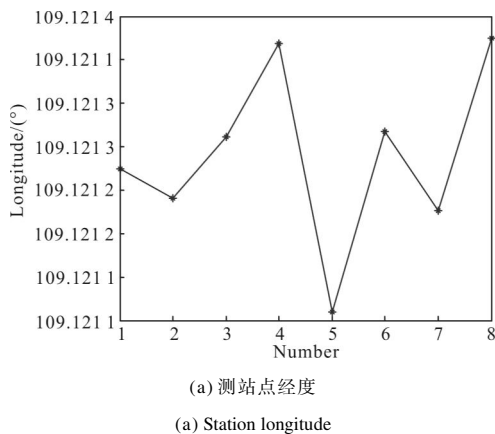


图 7 测站点经纬度

Fig.7 Longitude and latitude of station

的真实值时,识别恒星的数量在不断地增加,如图 8 所示。表明在进行测站点概略位置选取时要使概略位置向测站点的真实值接近,这样能够使星图识别的恒星数量得到增加,保证数字天顶仪定位的精度。

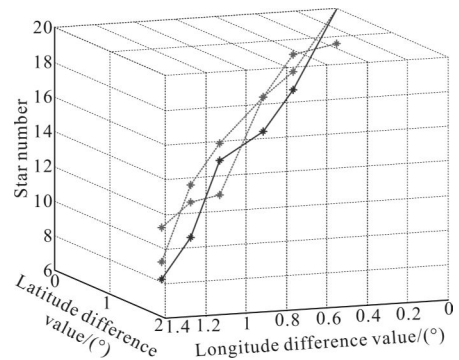


图 8 识别恒星数量变化曲线

Fig.8 Change of star number

4 结论

运用数字天顶仪进行定位时星图识别对于最终的定位结果十分重要,进行局部星图识别时选取的识别恒星的经纬度范围将影响星图识别的恒星数量和识别的速度。在进行局部星图识别时参考星的经纬度范围不能直接采用数字天顶仪的视场角,局部星图识别的参考星范围与当地的纬度之间相关联。为了保证星图识别的有效进行,必须保证以概略位置为中心的识别范围与由 CCD 图像传感器中心确定的局部恒星识别的经纬度范围存在交集;为保证星图识别的效率和识别恒星的数目,应选取最大的经纬度跨度值为识别恒星的范围值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Song Laiyong. Research on theory and algorithm for measuring of vertical deflections based on CCD and GPS[D]. Qingdao: 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]. 青岛: 山东科技大学, 2012.
- [3] Hirt C, Seeber G. Accuracy analysis of vertical deflection data observed with the Hannover Digital Zenith Camera System TZK2-D[J]. *Springer*, 2008, 8(2): 347–356.
- [4] Kerem H, Rasim D, Haluk O. Digital zenith camera system for Astro-Geodetic applications in Turkey [J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 2012, 1(2): 115–120.
- [5] 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. 我国的数字化天顶望远镜样机[J]. 科学通报, 2014, 59(12): 1094–1099.
- [6] 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.
- [7] Hirt C, Beat B, Anna S, et al. Modern determination of vertical deflection using digital zenith cameras[J]. *Surveying Engineering*, 2010, 2(1): 1–12.
- [8] Guo Jinyun, Song Laiyong, Chang Xiaotao, et al. Vertical Deflection measure with digital zenith camera and accuracy analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1085–1088. (in Chinese)
郭金运, 宋来勇, 常晓涛, 等. 数字天顶摄影仪确定垂线偏差及其精度分析[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2011, 36(9): 1085–1088.
- [9] Zhou Bin. Research of star pattern recognition algorithm based on CCD star sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
周斌. CCD 图像传感器星图识别算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [10] 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. 数字天顶摄影仪的图像处理[J]. 光子学报, 2004, 33(2): 248–251.
- [11] 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.
- [12] Zhang Hui, Yuan Jiahu, Liu Enhai, et al. Simulation of attitude precision of star sensor[J]. *Journal of China University Mining and Technology*, 2008, 37(1): 112–117. (in Chinese)
张辉, 袁家虎, 刘恩海, 等. 图像传感器姿态计算精度的仿真[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 112–117.
- [13] Quan Wei, Fang Jiancheng. High-precision simulation of star map and its validity check[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(7): 22–26. (in Chinese)
全伟, 房建成. 高精度星图模拟及有效性验证新方法[J]. 光电工程, 2005, 32(7): 22–26.