

文章编号 1004-924X(2012)05-1126-08

空间相机地心距误差修正

李伟雄^{1,2*}, 闫得杰¹, 徐抒岩¹, 胡君¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了修正时间延迟积分(TDI) CCD空间相机像移补偿计算中的地心距误差,减小其对像移速度相对误差的影响,推导出了星下点成像的像移速度计算模型。通过该模型分析了地心距误差对像移速度相对误差的影响。根据地心距误差的来源,分两步修正了地心距误差:采用WGS-84(World Geodetic System)模型修正地球的偏心率引起的地心距误差;采用地球海拔高度数据源(USGS DEM)制作电子高程图,修正了地球表面海拔高度不同引起的地心距误差。推导出了地心距误差修正后的空间相机星下点成像的像移速度模型。修正后模型计算以及分析结果表明:WGS-84模型和电子高程图对地心距误差的修正消除像移速度相对误差最大分别为2.85%和1.76%。地心距误差的修正极大地减小了前向(沿TDI CCD积分方向的)匹配误差,提高了TDI CCD空间相机成像质量。

关键词:空间相机;地心距误差;误差修正;像移模型

中图分类号:V447.3;V448.22 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122005.1126

Modification of geocentric distance error of space camera

LI Wei-xiong^{1,2*}, YAN De-jie¹, XU Shu-yan¹, Hu Jun¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: wishing2190@yahoo.com.cn*

Abstract: To modify the geocentric core distance error of a Time Delay and Integration (TDI) CCD space camera in the calculation of image motion compensation, and decrease the influence of the error on the match error of image motion velocity, a model of image motion calculation of points bellow satellites was deduced. The influence of the geocentric core distance error on the relative error of image motion velocity was analyzed based on the model, and the geocentric core distance error was modified by two steps according to the error sources. The former adopted the World Geodetic System (WGS-84) to modify the error generated by ellipticity of the error, and the latter used the data source of the earth's height above sea level (United States Geological Survey Digital Elevation Model, USGS DEM) to make a digital elevation map modify the error generated by the deference heights above sea level. After modifying, the image motion model of points bellow satellites was deduced. The calculation and

收稿日期:2011-08-20;修订日期:2011-09-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

analysis by the model indicate that the maximum error of image motion velocity eliminated are about 2.85% and 1.76% with the modification of geocentric core distance error by the WGS-84 model and digital elevation map, respectively. Those data clearly show that the match error of forward direction (the integral direction of TDI CCD) has been greatly decreased by modifying the geocentric core distance error, and the imaging quality of TDI CCD space camera has improved greatly.

Key words: space camera; geocentric distance error; modification of error; image motion model

1 引 言

随着遥感技术的发展,空间光学成像的分辨率越来越高,时间延积分(TDI) CCD 相机在高分辨率成像中的应用也越来越广^[1]。TDI CCD 的工作方式比较特殊,在对动态目标成像时,要求它的行扫描速率与目标的运动速率严格同步。否则不能保证 TDI CCD 同一列上的每一个像元都能对同一目标成像,从而引起在延迟积分时间内的像移^[2]。像移的存在极大地影响了相机成像质量,使图像分辨力明显下降^[3],实时精确补偿摄像时的像移已成为空间相机必须解决的关键技术之一^[4]。建立像移补偿数学模型是进行像移补偿工作的前提,随着像移补偿要求的不断提高,像移补偿数学模型越来越复杂,像移补偿数学模型的建立成为了一个重要的研究方向。

拍摄点处景物到地心的距离(简称地心距)是影响近圆轨道 TDI CCD 空间相机成像的一个重要参数,在大多数像移补偿模型中,地球都被看作标准球体^[5-9],这样很大程度上简化了像移模型复杂程度,但参与计算的地心距就存在很大的误差。像移速度是地心距的函数,地心距误差使像移速度相对误差增大,直接影响 TDI CCD 前向匹配误差。分析地心距误差对像移速度相对误差的影响以及寻找修正地心距误差的方法在空间相机像移补偿工作中是不可或缺的。

地心距的误差主要来源于两个方面:地球是一个东西轴长,南北轴短的椭球体,不同纬度的椭球半径不同;地球表面不同地点的海拔不相同。根据引起地心距误差的两个误差源的不同,地心距误差的修正也分为两个方面:一方面是通过地球的椭球模型修正;另一方面是通过地球表面海拔高度修正。无论是哪一方面的修正工作,对 TDI CCD 空间相机像移匹配精度的提高都是有

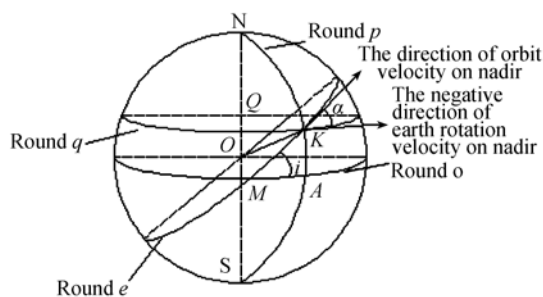
着很大的作用,修正的方法在下面章节中将予以介绍。

2 地心距对像移速度的影响

2.1 像移速度计算模型

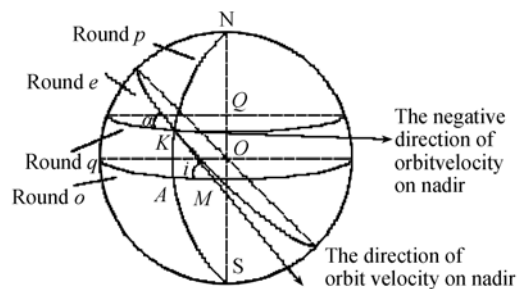
为了分析地心距误差对像移速度的影响,首先基于球面三角公式以及物像之间的投影关系推导出以下星下点成像模型。

图 1 中:K 是星下点;A 是过星下点的经线与赤道的交点;M 是飞行器轨道在地球上的投影圆与赤道的交点; i_0 是飞行器轨道平面与赤道平面的夹角; α 是星下点处地球自转速度与星下点



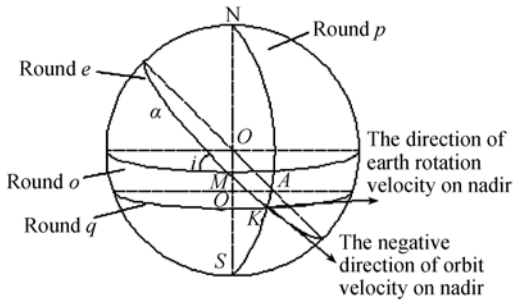
(a) 在北纬景物点纬度增加示意图

(a) Sketch map of scene's latitude increasing on north latitude



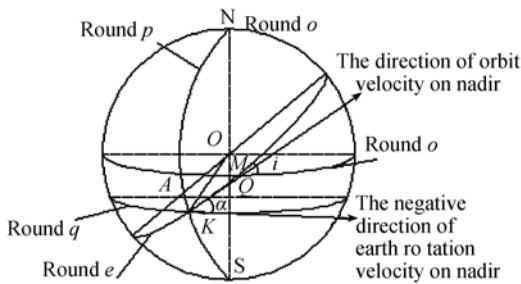
(b) 在北纬景物点纬度降低示意图

(b) Sketch map of scene's latitude decreasing on north latitude



(c) 在南纬景物点纬度增加示意图

(c) Sketch map of scene's latitude increasing on "south" latitude



(d) 在南纬景物点纬度降低示意图

(d) Sketch map of scene's latitude decreasing on "south" latitude

图 1 景物点相对于相机的运动示意图

Fig. 1 Motion sketch map of cameras relative to scenes

处轨道速度方向的夹角;圆 q 是星下点所在的纬线圈; N 是北极; S 是南极; O 是圆心。

图 1 中 $\triangle MKA$ 是直角球面三角形, 解此三角形, 求解 α , 如下。

$\widehat{KA} = |\lambda|$; λ 是星下点纬度; $\angle AMK = i_0$; $\angle MAK = 90^\circ$;

$$\angle MKA = \arcsin \left[\frac{\cos \angle AMK}{\cos \widehat{KA}} = \arcsin \left[\frac{\cos i_0}{\cos \lambda} \right] \right] \quad (1)$$

$$\alpha = \pi/2 - \angle MKA = \pi/2 - \arcsin \left[\frac{\cos i_0}{\cos \lambda} \right] \quad (2)$$

设星下点处地球自转速度为 v_ω , 星下点处轨道速度为 v_Ω 。则

$$v_\omega = \omega R \cos \lambda \quad (3)$$

$$v_\Omega = \Omega R \quad (4)$$

在过 K 点与像面平行的平面上, v_ω 与像面不平行, 因此将 v_ω 投影到过 K 点与像面平行的平面

上, 得到 $v_{\omega\epsilon}$, 图 2 是 v_ω 投影示意图。

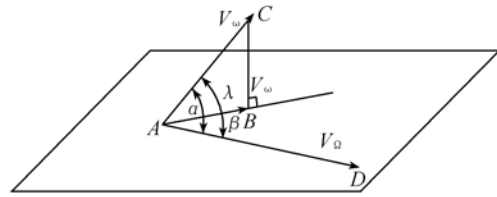


图 2 v_ω 投影示意图

Fig. 2 Projection sketch map of v_ω

在图 1 中, A 点处地球自转速度与过 K 点与像面平行的平面夹角为 λ , v_ω 与 A 点处地球自转速度方向相同, 因此 v_ω 与过 K 点与像面平行的平面夹角也为 $|\lambda|$, 因此

$$v_{\omega\epsilon} = v_\omega \times \cos \lambda = \omega R \cos^2 \lambda, \quad (5)$$

$v_{\omega\epsilon}$ 与 v_Ω 的夹角

$$\beta = \arccos(\cos \alpha / \cos \lambda) = \arccos(\cos i_0 / \cos^2 \lambda), \quad (6)$$

将 $v_{\omega\epsilon}$ (拍摄景物点相对于飞行器星下点的速度) 与 v_Ω 的合速度 $v_{\Omega\omega}$ 投影到像面上, 即得到像面上像移速度 v_p 。

$$v_{\Omega\omega} = \sqrt{v_\Omega^2 + v_{\omega\epsilon}^2 - 2v_\Omega v_{\omega\epsilon} \cos \beta} = \sqrt{\Omega^2 R^2 + \omega^2 R^2 \cos^4 \lambda - 2\Omega\omega R^2 \cos i_0}, \quad (7)$$

$$v_p = v_{\Omega\omega} \times f / H = \frac{fR \sqrt{\Omega^2 + \omega^2 \cos^4 \lambda - 2\Omega\omega \cos i_0}}{H_0 - R}, \quad (8)$$

其中: H 是飞行器轨道高度; H_0 是飞行器到地心的距离; f 是相机组合焦距。

2.2 地心距对像移速度影响分析

为了分析地心距对像移速度的影响, 根据 2.1 中给出的计算模型, 以某一飞行器为例进行分析, 其相关参数如下: $f = 7\,000$ mm; $H_0 = 6\,378$ km; $i_0 = 42^\circ$; $\omega = 7.292\,4 \times 10^{-5}$ rad/s; $\Omega = 0.064\,824(^\circ)/s$ 。

确定以上参数后, 像移速度就仅是地心距 R 和纬度 λ 的函数, 地心距从 6 378 km 到 6 356 km 变化, 纬度从 0° 到 40° 变化的像移速度值 (单位 mm/s) 见表 1。

从表 1 中数据可以看出: 当纬度确定时, 地心距减小, 像移速度值减小; 当地心距确定时, 纬度增加, 像移速度值减小。当纬度为 0° 时, 地心距由 6 378 km 减小到 6 376 km, 像移速度相对减小 0.53%, 如果以 6 376 km 作为地心距的实际值,

而 6 378 km 作为参与像移速度计算的值,即将地球看作以 6 378 km 为半径的标准球体,则像移速度相对误差为 0.53%。对于 TDI CCD 空间相机,96 级成像时,前向匹配误差不得超过 1/3 像元,对应像移速度相对误差不得超过 ±0.347%,因此地心距误差的修正对于高分辨率 TDI CCD 空间相机是必要的。

表 1 地心距与纬度取不同值时的像移速度统计表

Tab.1 Statistics of image motion velocity for different geocentric distances and latitudes

地心距/m	纬度/(°)				
	0	10	20	30	40
6 378	120.4	120.38	120.34	120.28	120.22
6 376	119.76	119.75	119.71	119.64	119.58
6 374	119.13	119.12	119.07	119.01	118.96
6 372	118.51	118.49	118.45	118.39	118.33
6 370	117.89	117.88	117.83	117.77	117.72
6 368	117.28	117.26	117.22	117.16	117.1
6 366	116.67	116.66	116.62	116.56	116.5
6 364	116.07	116.06	116.02	115.96	115.9
6 362	115.48	115.46	115.42	115.36	115.31
6 360	114.89	114.88	114.83	114.78	114.72
6 358	114.31	114.29	114.25	114.19	114.14
6 356	113.73	113.72	113.67	113.62	113.56

3 地心距误差的修正

3.1 地球椭球模型修正地心距误差

对于简单的星下点成像,可以在建模时直接引入地球椭球模型,虽然计算较复杂,但也可以计算出结果^[10]。但对于复杂成像情况下,飞行器有三轴姿态,相机本身是离轴成像,像面有一定的宽度且存在视场角,此时通常是采用坐标变换和球面三角来建立模型。如果直接将地球看成椭球来建立模型,不仅会增加模型的复杂性,还可能无法建出可行的模型。因此在建立模型时往往忽略地球的偏心率,引入地球椭球模型仅仅是对地心距进行修正。

位于地球表面的观测目标总是可以由地心经度 α 、地心纬度 λ 以及海拔高度 h_0 来表示。忽略海拔高度,图 3 中地心距 r 由地心纬度唯一确定,并满足^[11]:

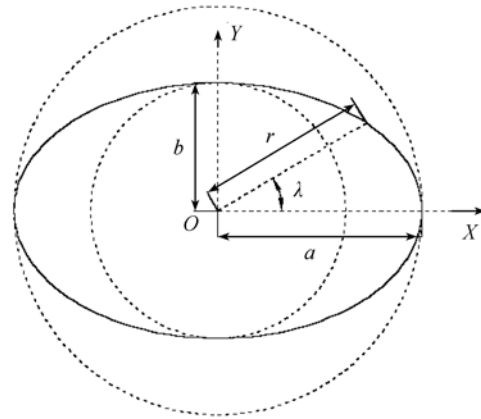


图 3 地心距随纬度变化示意图

Fig.3 Sketch map of the geocentric distance changing with latitudes

$$\begin{cases} x = a \cdot \cos t \\ y = b \cdot \sin t \end{cases} \quad t \in R \Rightarrow \begin{cases} \sin^2 t = \frac{a^2 \tan^2 \lambda}{b^2 + a^2 \tan^2 \lambda} \\ \cos^2 t = \frac{b^2}{b^2 + a^2 \tan^2 \lambda} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\tan \lambda = y/x \quad x \neq 0$$

$$r = \sqrt{a^2 \cos^2 t + b^2 \sin^2 t}$$

$$r = \frac{a \cdot b}{\sqrt{a^2 \sin^2 \lambda + b^2 \cos^2 \lambda}}, \quad (10)$$

其中: a 为地球半长轴; b 为地球半短轴。

将公式(10)代入公式(8)即可得到进行了地球椭球模型修正后的星下点成像的像移速度计算模型。

$$v_p = \frac{fab \sqrt{\Omega^2 + \omega^2 \cos^4 \lambda - 2\Omega\omega \cos i_0}}{H_0 \sqrt{a^2 \sin^2 \lambda + b^2 \cos^2 \lambda} - ab}. \quad (11)$$

在轨运行的飞行器, Ω , i_0 , H_0 基本不变,因此选定的地球椭球模型 a, b, ω 也是确定的,空间相机焦距 f 也是固定的,此时,像移速度仅是纬度的函数。

3.2 海拔高度修正地心距误差

3.2.1 经过海拔高度修正的像移速度模型

海拔高度的修正在地球椭球模型修正后进行,根据选用的椭球模型来确定选取地球高程(海拔)图。常用的椭球模型是 WGS-84 模型, WGS-84(World Geodetic System, 1984 年)是美国国防部研制确定的大地坐标系,是一种国际上采用的

地心坐标系,其最常用的两个几何常数:

a 是长半轴长度,为 6 378 137 m;

e 是偏心率,为 1:298.257223563。

根据长半轴和偏心率,可计算出短半轴长度 $b = a - a \times e$,选择基于此模型的地球海拔高度数据源,从数据源中获取海拔高度数据,对数据进行处理,将处理后的数据存入储存介质中,如

$$v_p = \frac{f \sqrt{\Omega^2 + \omega^2 \cos^4 \lambda - 2\Omega\omega \cos i_0} (ab + h_0 \sqrt{a^2 \sin^2 \lambda + b^2 \cos^2 \lambda})}{(H_0 - h_0) \sqrt{a^2 \sin^2 \lambda + b^2 \cos^2 \lambda} - ab} \quad (13)$$

星下点像移速度是纬度和海拔高度的函数,而海拔高度根据经纬度查询电子高程图得到,因此星下点像移速度由星下点经纬度与电子高程图确定。

3.2.2 电子高程图精度的确定

在对星下点成像时,飞行器无任何姿态,光学系统无离轴角和视场角,这时星下点也就是拍摄点,但这只是理想情况。实际的飞行器存在三轴姿态,光学系统通常不会采用完全同轴成像,即像面中心与光轴不重合,因此星下点不是拍摄点。在进行像移计算时,必须先通过星下点经纬度和飞行器三轴姿态和光学系统的离轴角和视场角等变化参数来确定拍摄点位置,即拍摄点的经纬度,而飞行器的三轴姿变化存在随机性,所以要在地面提前计算拍摄点经纬度查询电子高程图,通过数据注入发送到空间相机中,但这样数据就不准确,而且出数传区以后,没法通过地面向飞行器发送数据。最好的方法是在空间相机电子学部分开辟出一定的空间来存储电子高程图,在拍摄时刻从实时更新的平台参数中获取 GNC 或 GPS 飞行器姿态参数,计算出拍摄点位置,从电子高程图查询海拔高度,参与像移计算。

电子高程图的精度由数据点经纬度和海拔高度的最小分辨率决定。经纬度越小分辨率越高,电子高程图中存储的海拔高度数据点越多;海拔高度的最小分辨率越高,数据越准确。如果电子高程图中经纬度的最小分辨率为 0.1° ,海拔高度的最小分辨率为 50 m,则称电子高程图的精度为 $0.1^\circ, 50 \text{ m}$ 。电子高程图的精度决定了储存的电子高程图所需要的空间,而空间相机电子学部分能够提供的空间受一定限制,如 CPU 寻址能力和数据传输速度。空间相机电子高程图精度只要满足要求就可以,这样能最大程度地节约储存

FLASH 或 E^2 PROM 中,称此数据为电子高程图,在进行像移计算时,根据拍摄点的经纬度查询对应点的高程数据,得到拍摄点的海拔高度 h_0 ,将 h_0 加入地心距 r 中,则公式变为

$$r = \frac{a \cdot b}{\sqrt{a^2 \sin^2 \lambda + b^2 \cos^2 \lambda}} + h_0 \quad (12)$$

此时,星下点像移速度计算模型变为

空间,也能提高像移计算软件的运行速度。精度满足要求分为两方面:经纬度最小分辨率满足要求,例如 TDI CCD 相机,每幅图像覆盖地面为 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$,轨道倾角为 43° ,则用 20 km 除以赤道周长,乘上 360° ,再乘上 $\sin(43^\circ)$ 为 0.12° ,经纬度最小分辨只要小于等于 0.12° 就能满足要求;因此海拔数据最小分辨率满足要求,像移速度最终会转换为 TDI CCD 行转移频率,而行转移频率是整型的,因此海拔数据变化一个最小分辨率,而行转移频率变化不超过 0.5 就能满足要求。

3.2.3 电子高程图的制作

电子高程制作是选择高精度、可靠地球海拔高度数据源,对这些数据进行压缩,组合成易于存储和寻址的数据。下面通过例子来介绍电子高程图的制作方法。

电子高程图精度要求 $0.1^\circ, 50 \text{ m}$,采用 WGS-84 椭球模型进行修正,地球海拔高度数据源为 USGS DEM。USGS DEM^[12] 是美国地质探测局数字海拔模型的简称,USGS DEM 中包含了基于 WGS84 模型基础上的全球海拔数据,地图数据精度为 $30'', 1 \text{ m}$ 。USGS DEM 中包含 8 种扩展名的文件,这些文件中包含所探测的地面的各类信息,如海拔、地形、经纬度等信息。海拔是我们电子地图中所需要的信息,存放在 dem 格式的文件中。将这些数据拼在一起,即全球的海拔高度数据,一个 dem 文件中每一个栅格 ($30'' \times 30''$) 中存储了一个 16 位的整型的数据,表示该点的海拔。文件无文件头和文件尾缀,每一个 16 位的整型数据占两个字节,以低后高前补码形式储存,文件中的前两个字节所存储的数据是该 dem 文件所存储的区域的最北边以及最西边的小栅格中心点处的海拔。例如, W100N40.dem 文件中,经纬度分辨率为 $30''$,纬度变化范围为 50° ,经度变化范围为

40°。对应栅格数为 4 800(行)×6 000(列),以经度变化优先的形式,文件中前 2 个字节所存储的是经度-99.99583333333334°(负号表示西经,正号表示东经),纬度 39.99583333333333°(正号表

示北纬,负号表示南纬)。整个 USGS DEM 中包含了 34 个 dem 文件,除 ANTARCP.S. dem 文件以外,每个文件中包含了地球表面不同区域的海拔高度数据,见表 2。

表 2 dem 文件拼接图表
Tab.2 Splicing chart of dem files

W180N90	W140N90	W100N90	W060N90	W020N90	E020N90	E060N90	E100N90	E140N90
W180N40	W140N40	W100N40	W060N40	W020N40	E020N40	E060N40	E100N40	E140N40
W180S10	W140S10	W100S10	W060S10	W020S10	E020 S10	E060S10	E100S10	E140S10
W180S60	W120S60	W060S60	W000S60	W000S60	E060S60	E060S60	E120S60	E120S60

要制作的电子高程图,经纬度分辨率为 0.1°,而数据源的经纬度分辨率为 30",因此要将数据源中 $(0.1 \times 3\ 600 / 30)^2 = 144$ 个数据压缩成电子高程图中的一个数据。如何压缩得到数据才是最合理的呢?电子高程图是用于修正地心距的误差,因为地心距误差影响像移速度相对误差,因此压缩后数据计算出的像移速度应该是 144 个数据计算出的像移速度的均值,根据这个原则有下式(14):

$$v_p(\lambda, \alpha, h_0) = \frac{\sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^{12} V_p(\lambda_i, \alpha_j, h_{0ij})}{144},$$

$(k = 1, 2, 3, \dots, 144),$ (14)

其中: v_p 是像移速度; λ 是电子高程图中任一点纬度; α 是电子高程图中任一点经度; h_0 是电子高程图中纬度 λ 和经度 α 处的海拔高度; λ_i 是 USGS DEM 中对应 λ 的 12 个纬度值之一; α_j 是 USGS DEM 中对应 λ 的 12 个经度值之一; h_{0ij} 是 USGS DEM 中 λ_i 和 α_j 处的海拔高度。

根据公式(14),就可以计算出 h_0 ,用这个方法求得地球上每一个经纬度处海拔高度,根据这些数据绘制出等高线图,见图 4。

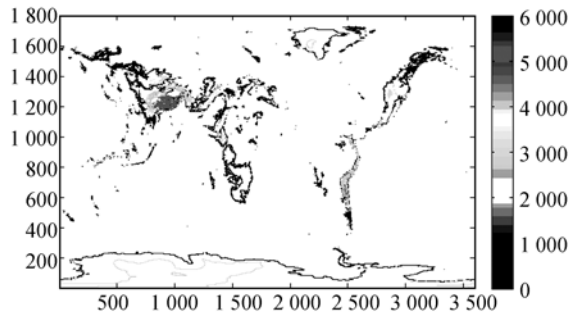


图 4 电子高程等高线图

Fig.4 Contour map of electron altitudes

在储存时,可以用 h_0 除以海拔高度最小分辨率后进行储存,这样能够节省储存空间,地球上海拔最高处是珠峰,海拔不超 9 000 m, $9\ 000 / 50 = 180 < 2^8$,每一个数据用 1 个字节储存,则电子高程图所需要的存储空间为:经度范围/经度最小分辨率×纬度范围/纬度最小分辨率,若存储全球的海拔高度,则需要 6.48×10^6 字节。根据飞行器轨道和姿态参数以及空间相机自身参数,可以确定出景物点的纬度范围,在存储时可以仅存储所需要的数据。

3.3 地心距误差修正的结果

电子高程图中每一点的数据对可信任的 144 个点数据进行压缩,但用压缩后的值作为压缩前的 144 个点的值,会使压缩后的值与压缩前 144 个点存在误差,经统计,最大误差为 2 650 m。这个误差很大,但根据电子高程图精度要求,相机对目标区域进行成像时,所能覆盖的地面范围不大于电子高程图一个数据点的覆盖宽度,因此在这个区域内只能求出一个最合适地心距。如在地面用相机对一片树林拍照,树离相机的距离不能全部都相同,但一次拍摄只选择一个最合适的物距进行成像,拍摄的图像会出现一些地方不清晰。TDI CCD 空间相机是动中成像,一次拍摄时,像面所对应的地面区域中物距不都相同,对应的像移速度也不同,进行像移匹配时,只能选择一个最合适的像移速度,因此地面就只有一个地心距。所以这种压缩后的电子地图高程数据点与压缩前的点的地心距误差不影响像移速度误差。

经过修正后,地心距误差明显减小。椭球模型修正使地球偏心率引入的地心距误差得以修

正,如果不进行椭球模型的修正,以长短半轴的均值作地球半径,根据公式(8)对 2.2 节中的参数进行计算,在赤道处像速度相对误差最大,为 2.85%,经过椭球修正后能够消除。电子高程图修正地球海拔高度带来的地心距误差,以 0.1,50 m 精度为例,在北纬 28.0°,东经 86.9°的海拔高度最高为 6 950 m,如果不修正,以海平面高度(0 m)作为默认值,根据公式(13),则像移速度误差为 1.82%,电子高程图的加入使这个误差减小至不大于 0.06%(TDI CCD 转移行转移频率误差为半个码时的像移速度误差)。

4 结 论

基于空间相机星下点成像模型,建立了地心距与像移速度关系的数学模型,用数学模型分析

了地心距误差对像移速度相对误差的影响。结果显示,地心距误差为 2 km 时,像移速度相对误差达到了 0.53%,不能满足 96 级 TDI CCD 空间相机像移速度相对误差 $\pm 0.15\%$ 的要求,因此必须修正地心距误差。根据引起地心距误差的两个误差源,将地心距的修正分两步进行,第一步为椭球模型修正,使忽略地球偏心率的地心距引起的像移速率相对误差得以消除,第二步为海拔高度修正,电子高程图的加入减小了忽略地球海拔高度的地心距引起的像移速度相对误差。确定合适电子高程图的精度是制作电子高程图的前提,精度过低会使像移速度相对误差超过要求;高的精度既占用存储空间,又影响像移计算速度,使程序运行时间超出要求。尽管是基于星点成像模型进行分析,但是地心距误差的修正方法,适合任何复杂的空间相机成像模型。

参考文献:

- [1] 林华宝. 国外卫星技术及应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1998.
LIN H B. *The Technology and Application of Foreign Satellites*[M]. Beijing: Publishing Company of Space Navigation, 1998. (in Chinese)
- [2] 闫得杰, 韩诚山, 李伟雄. 飞行器侧摆和前后摆及控制误差的优化设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2224-2228.
YAN D J, HAN CH SH, LI W X. Optimization design of scroll and pitch and their control errors on aircraft [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2224-2228. (in Chinese)
- [3] 闫得杰, 徐抒岩, 韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2199-2203.
YAN D J, XU SH Y, HAN CH SH. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2199-2203. (in Chinese)
- [4] 孔德柱. 空间相机像移速度计算方法及 DSP 实现[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1934-1941.
KONG D ZH. Calculation method for image motion speed of space camera and DSP-based implementation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1934-1941. (in Chinese)
- [5] 袁孝康. 星载 TDI-CCD 推扫相机的偏流角计算与补偿[J]. 上海航天, 2006, 6: 10-14.
YUAN X K. Calculation and compensation of the deviant angle of satellite borne TDI-CCD push scan camera [J]. *Aerospace Shanghai*, 2006, 6: 10-14. (in Chinese)
- [6] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所研究生部, 1998.
WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Changchun: Department of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 1998. (in Chinese)
- [7] 樊超, 李英才, 易红伟. 空间相机中偏流角的分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 10: 216-220.
FAN CH, LI Y C, YI H W. Analysis of drift angle on space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 10: 216-220. (in Chinese)
- [8] 陈梁. 极轨星载 TDI CCD 相机的像移及恢复算法研究[J]. 遥感学报, 2002, 1(6): 35-39.
CHEN L. Image shift and compensation of TDI CCD camera of polar orbit satellite [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 1(6): 35-39. (in Chinese)
- [9] 周庆才. 基于稳像理论的空间光学遥感像移补偿的分析与计算[J]. 光学学报, 2004, 24(3): 413-417.
ZHOU Q C. The application of the theory about image stabilization in calculating image motion on space remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*,

2004, 24(3): 413-417. (in Chinese)

- [10] 王志刚. 高分辨率卫星遥感图像的偏流角及其补偿研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(5): 39-42.

WANG ZH G. Study on satellite remote sensing high resolution image bias-angle and its compensation [J]. *Journal of Astronautics*, 2002, 23(5): 39-42. (in Chinese)

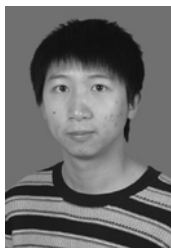
- [11] 郭强. 地球同步轨道二维扫描像移补偿技术建模

与分析[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1780-1787.

GUO Q. Image shift compensation modeling and analysis for tow-dimensional scanning on geostationary orbit [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27 (10): 1780-1787. (in Chinese)

- [12] Introduce of USGS DEM . GTOPO30 Documentation[OL]. <http://edc.usgs.gov/sitemap.html>.

作者简介:



李伟雄(1985—),男,四川自贡人,博士研究生,2007年于长春理工大学获得学士学位,主要从事空间相机像移速度计算矢模型建立、实现及相关误差理论分析方面的研究。E-mail: wishing2190@yahoo.com.cn



闫得杰(1979—),女,吉林长春人,助理研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事航天遥感器像移补偿、软件设计等方面的研究。E-mail: dejieyan@yahoo.com.cn



胡君(1952—),男,吉林蛟河人,研究员,硕士研究生导师,主要研究方向为智能控制与信息处理、空间光学遥感器仿真测试技术等。E-mail: huj@ciomp.ac.cn

导师简介:



徐抒岩(1963—),男,吉林人,研究员,博士生导师,1985年于天津大学获得学士学位,1989年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要研究方向为空间光学遥感器计算机控制、图像处理,曾获得“中国载人航天工程突出贡献者”奖章和“曾宪梓载人航天基金突出贡献奖”。E-mail: xusy@ciomp.ac.cn