

文章编号 1004-924X(2009)08-1935-07

空间相机像移速度计算方法及 DSP 实现

孔德柱^{1,2}, 刘金国¹, 吕世良¹, 陈佳豫^{1,2}, 武星星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:为了精确匹配地物运动在空间相机像面上产生的像移,实现了以 WGS-84 坐标系下航天器位置向量及速度向量、航天器轨道坐标系下姿态角及姿态角速率作为输入参数的像移速度计算方法。首先,在原有像移速度计算模型的基础上选取惯性坐标系,降低了求解轨道倾角和降交点经度的复杂性。通过球面几何的余弦定理直接求解航天器与降交点相对地心夹角的余弦值,避免了原像移速度计算模型中通过判断卫星飞行方向和星下点纬度来求解航天器与降交点相对地心夹角余弦值这一过程。然后,有机联系星下点的经度和纬度与 FLASH 的地址,避开访问高程数据时繁琐的查表过程。通过分析像移速度残差对相机 MTF 的影响,评估了像移速度计算模型的可行性。最后,在 TI 的 DSP 上实现了像移速度的整个计算过程。分析及实验结果表明,像移速度计算残差为 0.15%,引起相机的 MTF 下降为 1%,像移速度计算时间 < 2 ms,满足空间相机对像移速度的计算精度和计算时间等要求。

关键词:空间相机;像移速度;调制传递函数;数字信号处理;DEM

中图分类号:V248.3 **文献标识码:**A

Calculation method for image motion speed of space camera and DSP-based implementation

KONG De-zhu^{1,2}, LIU Jin-guo¹, LÜ Shi-liang¹, CHEN Jia-yu^{1,2}, WU Xing-xing¹

(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*)

Abstract: In order to match the image motion produced by the movement of ground objects at a focal plane accurately, a calculation method for image motion speed is realized by taking the spacecraft location vector and velocity vector based on the WGS-84 coordinate system and the spacecraft attitude angle and attitude angular velocity based on spacecraft orbital coordinate system as input parameters. Firstly, a inertial coordinate system is selected flexibly based on the original calculation model of image motion speed to decrease the complexity of solving orbital inclined angels and descending node longitudes. Then, the cosine value of central angle between the spacecraft and the descending node is solved by using cosine theorem of spherical geometry to avoid the cumbersome solving process by judging the flight direction of a satellite and the latitude of sub-satellite point in an original calculation

收稿日期:2009-04-20;修订日期:2009-05-26.

基金项目:中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项基金”资助项目

model of image motion speeds. Subsequently, the longitude and the latitude of sub-satellite point and the FLASH address are linked organically and skillfully to avoid the cumbersome lookup process when elevation data are visited. Then the feasibility of calculation model of image motion speed is evaluated by analyzing the impact of the residual error of image motion speed on the MTF of a camera. Finally, the whole process of calculating image motion speed is realized on DSP from TI. Analyzing processes and experimental results indicate that the residual error of calculation model is 0.15%, which results in a 1% decrease of the MTF. The calculation time of image motion speed is less than 2 ms. These data satisfy the system requirements of the camera on the calculation accuracy and computing time.

Key words: space camera; image motion speed; Modulation Transfer Function(MTF); Digital Signal Processing(DSP); DEM

1 引言

空间相机多采取推帚方式成像,因此地物影像与探测器之间存在着相对运动,也就是说地物影像在探测器上存在一个移动速度,即像移速度。为了能够摄取具有一定地面分辨率的清晰、连续的图像,必须保证探测器的采样频率与像移速度匹配^[1],否则就会发生过采样和欠采样的现象,导致摄取的影像无法达到预期指标。

对于空间相机而言,调制传递函数(MTF)是空间频率的函数,它实际上表征了空间相机在不同空间频率下对目标对比度的传输能力,主要影响遥感图像的清晰度^[2]。空间相机的调制传递函数(MTF)是评定空间相机的重要指标之一,进行精确地像移速度匹配,可以有效地减小相机调制传递函数(MTF)的下降。随着空间相机的地面分辨率不断提高,对于像移速度计算的实时性要求也不断提高,因此像移速度计算模型的实现技巧及运行平台的选择也变得尤为重要。本文针对空间相机对像移速度计算的精确性、实时性等要求,在原有像移速度计算模型的基础上进行了改进和扩展,基于扩展后的计算公式采取蒙特卡洛法进行了误差分析,并给出了像移速度残差对空间相机 MTF 的影响,最后在 TI 的 DSP 上实现了像移速度的计算过程,并将 DSP 的运行结果与 MATLAB 的运行结果进行比较,验证了 DSP 程序结果的正确性。

2 像移速度计算模型改进

航天光学遥感器像移速度矢数学模型^[3]的计算公式包括相机焦距 f , 航天器轨道高度 H , 航天器轨道运动相对于地心的角速度 Ω , 地物高度 h , 航天器坐标系相对于轨道坐标系的滚动角 φ , 俯仰角 θ , 偏航角 ψ , 滚动角速率 φ' , 俯仰角速率 θ' , 偏航角速率 ψ' , 地球平均半径 R , 轨道倾角 i_0 , 地球自转角速度 ω , 航天器与降交点相对于地心的夹角 γ 共 14 个输入变量。而在实际应用中,可以直接获得的信息量为相机标称焦距 f_0 , 相机焦距变化量 Δf , 数字高程图, WGS-84 坐标系下的航天器位置向量 (X, Y, Z) , 航天器速度向量 (X', Y', Z') , 航天器坐标系相对于轨道坐标系的滚动角 φ , 俯仰角 θ , 偏航角 ψ , 滚动角速率 φ' , 俯仰角速率 θ' , 偏航角速率 ψ' ^[4], 地球平均半径 R , 地球自转角速度 ω 。因此,需对像移速度计算模型进行改进和扩展,才能满足实际计算需求,以下各节详细地描述了其改进过程。

2.1 坐标系定义

在航天光学遥感器像移速度矢数学模型^[3]中包含七个坐标系^[5],分别为地心惯性坐标系 $I(I_1, I_2, I_3)$ 、地球坐标系 $E(E_1, E_2, E_3)$ 、航天器轨道坐标系 $B(B_1, B_2, B_3)$ 、地理坐标系 $G(G_1, G_2, G_3)$ 、航天器坐标系 $S(S_1, S_2, S_3)$ 、遥感器坐标系 $C(C_1, C_2, C_3)$ 、像面坐标系 $P(P_1, P_2, P_3)$ 。

目前,像移速度计算的输入数据基于 WGS-84 坐标系,对原计算模型中的坐标系作了进一步定义。定义地球坐标系 $E(E_1, E_2, E_3)$ 的 E_1 轴、 E_2 轴、 E_3 轴分别与 WGS-84 坐标系的 Y 轴、 Z

轴、X 轴重合,定义摄影时刻的地心惯性坐标系 $I'(I_1', I_2', I_3')$ 与此时的地球坐标系 $E(E_1, E_2, E_3)$ 重合,定义地心惯性坐标系 $I(I_1, I_2, I_3)$ 在摄影时刻与地心惯性坐标系 $I'(I_1', I_2', I_3')$ 保持固定夹角,此夹角为降交点在地心惯性坐标系 $I'(I_1', I_2', I_3')$ 中的经度值,地球坐标系 $E(E_1, E_2, E_3)$ 在 I 系内绕 I_2 逆时针方向以角速度 ω 自转。

2.2 计算公式的扩展

2.2.1 关于变量 f 的扩展

空间相机入轨前,在实验室中会在标称温度下标定出相机的标称焦距 f_0 。但入轨后,受在轨相机温度等环境因素的影响,相机焦距会发生变化,此时可以通过调整相机像面来获取清晰的图像,并能通过检焦系统得知焦距的变化量 Δf ,因此在相机轨的实际焦距为:

$$f = f_0 + \Delta f. \quad (1)$$

2.2.2 关于变量 H, Ω, i_0, γ 的扩展

根据 WGS-84 坐标系下的位置向量 (X, Y, Z) 和速度向量 (X', Y', Z') ,可以计算出地心惯性坐标系 $I'(I_1', I_2', I_3')$ 下的航天器轨道半长轴 R_H ,轨道角速度 Ω ,轨道倾角 i_0 ,星下点经度 α ,星下点纬度 λ ,降交点经度 α_0 ,相机高度 H 。具体公式^[6]如下:

$$R_H = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (2)$$

$$\Omega = \frac{\sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2}}{R_H}, \quad (3)$$

$$h_X = Y \times Z' - Z \times Y', \quad (4)$$

$$h_Y = Z \times X' - X \times Z', \quad (5)$$

$$h_Z = X \times Y' - Y \times X', \quad (6)$$

$$i_0 = \arccos\left(\frac{h_Z}{\sqrt{h_X^2 + h_Y^2 + h_Z^2}}\right), \quad (7)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right), \quad (8)$$

$$\lambda = \arcsin\left(\frac{Z}{R_H}\right), \quad (9)$$

$$\alpha_0 = \arctan\left(\frac{-h_X}{h_Y}\right) + \pi, \quad (10)$$

$$H = R_H - R, \quad (11)$$

$$\sin \gamma = \frac{\sin \lambda}{\sin i_0}, \quad (12)$$

$$\cos \gamma = \cos \lambda \times \cos(\alpha - \alpha_0). \quad (13)$$

2.2.3 关于变量 h 的扩展

星下点的地物高度 h 需要根据星下点经度和星下点纬度查询数字高程图得到,数字高程图来

源于 GTOPO30^[7] 数据集,GTOPO30 数据集由美国地质勘探局的 EROS 数据中心开发,并于 1996 年完成。GTOPO30 数据集覆盖北纬 90°到南纬 90°,西经 180°到东经 180°,基于 WGS-84 坐标系,水平分辨率为 30",垂直分辨率为 1 m,高程变化范围为 -407~8 752 m。

本系统采用 FLASH 作为数字高程图的存储器,由于受 FLASH 存储容量的限制,无法将整个 GTOPO30 高程数据存储到 FLASH 中。对像移速度计算的频度、FLASH 存储器容量及可靠性进行综合考虑,提取 4 MB 的数字高程数据用于像移速度计算,数据覆盖地心纬度的南纬 20°到北纬 82.3°,西经 180°到东经 179.9°,纬度分辨率为 0.1°,经度分辨率为 0.2°。由于 GTOPO30 数据是基于地理纬度的,因此需要将数据从地理纬度转化为地心纬度,转化公式为:

$$\lambda = \arctan((1 - f_e)^2 \times \tan \lambda')^{[6]}, \quad (14)$$

其中: α 为地心纬度, α' 为地理纬度, f_e 为扁率。

由于像移速度计算模型中的地物高度 h 基于圆地球,因此需要将基于 WGS-84 坐标系的椭圆地球的地物高度 h_{ellipse} 转换为基于圆地球的地物高度 h ,公式为:

$$h = \sqrt{\frac{1 + \tan^2(|\lambda|)}{1 + \frac{\tan^2(|\lambda|)}{R_{\text{max}}^2} + \frac{\tan^2(|\lambda|)}{R_{\text{min}}^2}}} - R + h_{\text{ellipse}}. \quad (15)$$

将高程数据存储到 FLASH 中,如果想要获得星下点经度和星下点纬度对应的地物高度 h ,需要经过存储器地址映射、数据三选二校验及数据线性插值三个过程。

(a) 存储器地址映射

由于数字高程图的水平坐标为经度和经度,而访问 FLASH 需要的是存储单元的地址,因此在访问 FLASH 时需要将星下点的经度和纬度映射为 FLASH 的地址,映射过程如图 1 所示。

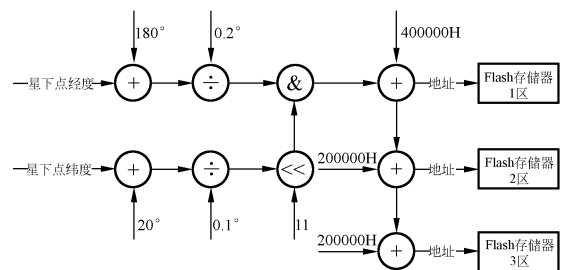


图 1 存储器地址映射

Fig. 1 Memorizer address mapping

(b) 数据三选二校验

为了防止 FLASH 存储器在轨时受单粒子效应的影响使其中的数字高程图发生变化,将数字高程图在 FLASH 三个不同的分区上存储为三个副本。在使用数据时,从三个分区中读出同一数据的三个副本 h_1, h_2, h_3 。然后按位进行三选二比较,只有当高程数据中每位的三个副本中至少有两个副本相同时,才可以使用该位数据。数字高程数据位宽为 16 bit,需要进行 16 次比较,比较过程如图 2 所示。

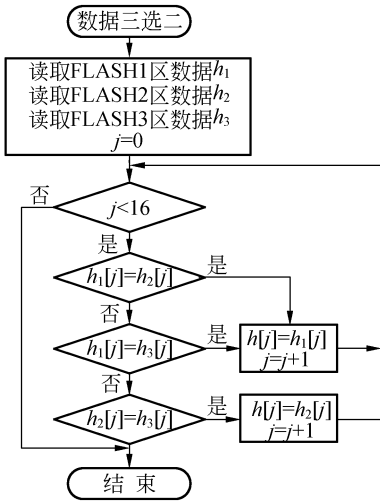


图 2 数据三选二校验

Fig. 2 Data verification by selecting two from three

(c) 数据线性插值

由于在 FLASH 存储器中数字高程数据的纬度分辨率为 0.1° ,经度分辨率为 0.2° ,而实际星下点的纬度分辨率和经度分辨率更高。为了减小实际使用中的高程误差,将星下点的经度分辨率

和纬度分辨率细分为 0.01° ,然后采取线性差值的方法求出高程。如图 3 所示,如果想要求得 E 点的高程值,首先通过访问 FLASH 得到 A, B, C 和 D 四点的高程值 h_A, h_B, h_C 和 h_D ,然后通过第一次线性插值求得 a_9 点、 b_9 点、 c_6 点和 d_6 点的高程值,具体公式如下:

$$h_{a_9} = \frac{a \times h_C + b \times h_A}{a + b}, \quad (16)$$

$$h_{b_9} = \frac{a \times h_B + b \times h_D}{a + b}, \quad (17)$$

$$h_{c_6} = \frac{c \times h_B + d \times h_C}{c + d}, \quad (18)$$

$$h_{d_6} = \frac{c \times h_D + d \times h_A}{c + d}. \quad (19)$$

然后通过第二次线性插值分别求得纬度方向上 E 点的高程值,公式为:

$$h_{E\text{latitude}} = \frac{c \times h_{b_9} + d \times h_{a_9}}{c + d}, \quad (20)$$

经度方向上 E 点的高程值,公式为:

$$h_{E\text{longitude}} = \frac{a \times h_{c_6} + b \times h_{d_6}}{a + b}. \quad (21)$$

最后求得 E 点的高程值,公式为:

$$h_E = \frac{h_{E\text{latitude}} + h_{E\text{longitude}}}{2}. \quad (22)$$

3 像移速度计算模型分析

3.1 相机调制传递函数定义

空间相机的调制传递函数是空间相机光学系统的 MTF, CCD 的 MTF, 电子学的 MTF 三者综合传输特性的体现^[8]。像移速度匹配精度主要对 CCD 的 MTF 产生影响, MTF_{CCD} 可以继续分解。

(a) CCD 是离散采集器件,其离散性产生静态 MTF_{static} ,公式为:

$$MTF_{\text{static}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_N}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_N}}. \quad (23)$$

(b) 当 CCD 采集动态光信号时,我们只能匹配像元之间的像移,在像元内部的像移是无法补偿的,由此产生的推扫 $MTF_{\text{push-broom}}$,公式为:

$$MTF_{\text{push-broom}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_N} \cdot \left(1 + \frac{\Delta v}{v}\right)\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_N} \cdot \left(1 + \frac{\Delta v}{v}\right)}. \quad (24)$$

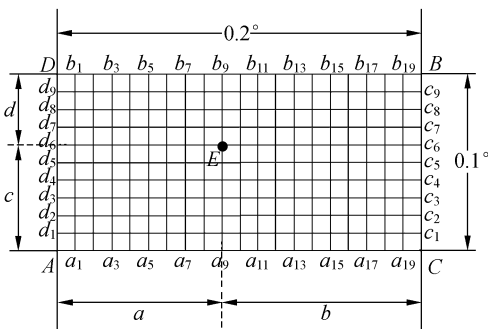


图 3 高程数据线性插值示意图

Fig. 3 Diagram of linear interpolation of elevation data

(c) 由于像移速度存在残差,所以对可以补偿的像元之间的像移也会产生补偿误差,由此产生残差 $MTF_{residual}$, 公式为:

$$MTF_{residual} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_N} \cdot m \cdot \frac{\Delta v}{v}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_N} \cdot m \cdot \frac{\Delta v}{v}} \quad (25)$$

其中: f 代表空间频率, f_N 代表奈奎斯特频率, v 代表像移速度, Δv 代表像移速度残差, m 代表积分级数。

3.2 像移计算模型综合误差分析

对 15 个输入变量进行如下误差^[9]分配。

$\sigma_X = \sigma_Y = \sigma_Z = 30$ m (3σ 误差),是航天器位置向量允许的测量误差;

$\sigma_{v_X} = \sigma_{v_Y} = \sigma_{v_Z} = 0.15$ m/s (3σ 误差),是航天器速度向量允许的测量误差;

$\sigma_{\varphi} = \sigma_{\theta} = \sigma_{\psi} = 0.1^\circ$ (3σ 误差),是航天器姿态角允许的测量误差;

$\sigma_{\varphi'} = \sigma_{\theta'} = \sigma_{\psi'} = 0.03^\circ$ (3σ 误差),是航天器姿态角速率允许的测量误差;

$\sigma_{f_0} = \sigma_{\Delta f} = 20$ μ m (3σ 误差),是相机焦距允许的测量误差;

$\sigma_h = 100$ m,是地物高度允许的测量误差。

根据计算像移速度所需输入变量的误差来源,采用蒙特卡洛法(统计试验法)进行误差分析^[10],得出像移速度的相对残差为 0.15%。将其代入公式(24)、公式(25),其中 $m = 96$,可以得出由像移匹配残差而引起的 MTF 下降为 1%,满足实际应用的要求。

4 实验验证

在输入时钟为 24 MHz 的 DSP SMQ320C32 上实现了像移速度计算程序。SMQ320C32 是 32 位高性能微处理器,采用 32 位整型操作和 40 位浮点操作,每秒钟可以进行 275 M 次整型操作和 50 M 次浮点操作。

实验过程中,选取了 800 个点的输入数据,WGS-84 坐标系下的航天器位置向量(X, Y, Z)如图 4 所示;航天器速度向量(X', Y', Z')如图 5 所示;航天器坐标系相对于轨道坐标系的滚动角 φ ,

俯仰角 θ ,偏航角 ψ 如图 6 所示;滚动角速率 φ' ,俯仰角速率 θ' ,偏航角速率 ψ' 如图 7 所示;相机焦距 f 取 2.187 5 m,计算了南纬 40.11°至北纬 10.1°,东经 1.82°至东经 12.68°的像移速度,DSP 的计算结果如图 8 所示,经过测量每次计算的最长时间小于 2 ms。为了验证 DSP 计算的正确性,编写了 MATLAB 程序,MATLAB 计算结果如图 9 所示,通过对比可知两种计算结果是基本吻合的。

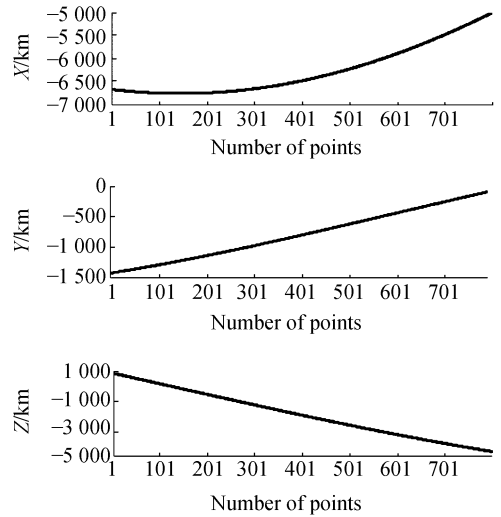


图 4 航天器位置向量

Fig. 4 Spacecraft location vector

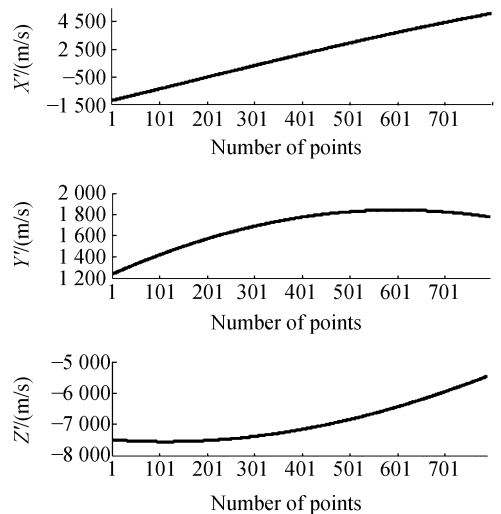


图 5 航天器速度向量

Fig. 5 Spacecraft velocity vector

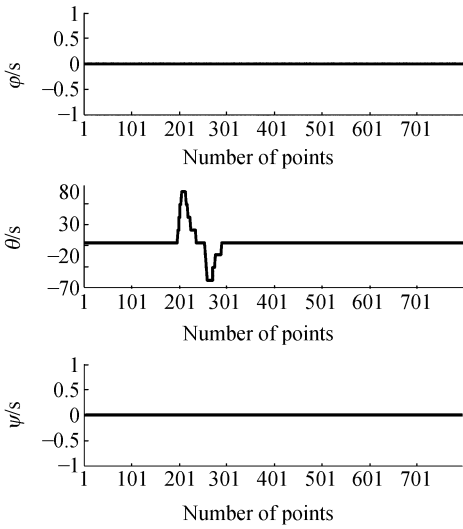


图 6 姿态角度数据
Fig. 6 Posture angle data

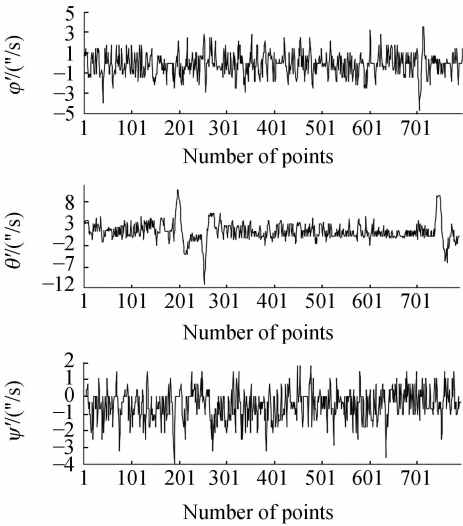


图 7 姿态角速度数据
Fig. 7 Posture angular velocity data

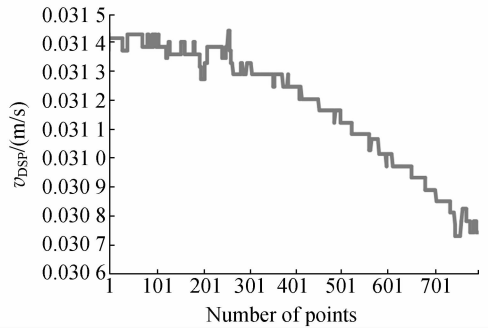


图 8 DSP 计算的像移速度
Fig. 8 Image motion speed calculated by DSP

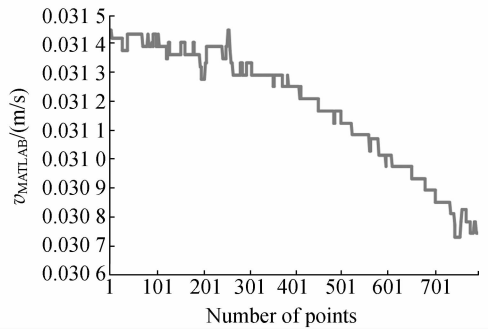


图 9 MATLAB 计算的像移速度
Fig. 9 Image motion speed calculated by MATLAB

5 结 论

本文根据空间相机对像移速度计算精度和计算实时性的要求,选择了基于坐标变换的像移速度计算模型,并在原有像移速度计算模型的基础上扩展了像移速度的计算公式。然后分析了像移速度计算精度对相机 MTF 的影响。最后,在 DSP 上实现了像移速度计算过程。分析及实验结果表明:像移速度计算残差为 0.15%,引起相机 MTF 的下降为 1%,像移速度计算时间 < 2 ms,基本上满足空间相机对像移速度计算的精度及实时性的要求。

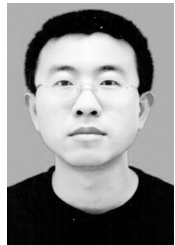
参考文献:

[1] MILLER B M, RUBINOVICH E Y . Image motion compensation at charge-coupled device photographing in delay-integration mode[J]. *Automation and Remote Control*, 2007, 68(3): 564-571.

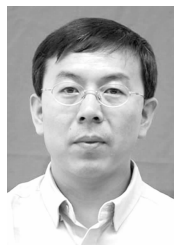
[2] 陈世平. 空间相机设计与实验[M]. 北京:宇航出版社, 2003.
CHEN SH P. *Design and Experimental Space Camera*[M]. Beijing: Aerospace Press, 2003. (in Chinese)
[3] 王家骥. 航天光学传感器像移速度矢计算数学模型

- [J]. 光学学报, 2004, 24(12):1586-1589.
- WANG J Q. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12):1586-1589. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 颜昌翔, 王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3):203-207.
- YAN CH X, WANG J Q. Method of coordination transformation for IM&IMC calculation in aerospace camera system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3):203-207. (in Chinese)
- [6] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- ZHANG R W. *Satellite Orbit Attitude Dynamics and Control* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1998. (in Chinese)
- [7] EROS. *GTOPO30 Documentation* [M]. <http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30>, 2008.
- [8] 韩昌元. 空间光学讲义[M]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2008.
- HAN CH Y. *Space Optical Lectures* [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2008. (in Chinese)
- [9] 颜昌翔, 金光, 王家骥. 航空遥感器定位误差分析[J]. 光电工程, 2001, 28(5):5-8.
- YAN CH X, JIN G, WANG J Q. Analysis for location error of an aerial remote sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 28(5):5-8.
- [10] 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, 1998.
- WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 1998. (in Chinese)

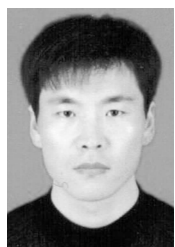
作者简介:



孔德柱(1980—), 男, 黑龙江肇东人, 助理研究员, 2004年于吉林大学获得学士学位, 主要从事航天器电子学设计、航天器软件设计、基于FPGA的SOPC开发等方面的研究。E-mail: shang-guanren8405@sina.com



刘金国(1968—), 男, 吉林蛟河人, 研究员, 主要从事空间遥感与图像处理方面的研究, 已发表论文数篇, 专利三项。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn



吕世良(1974—), 男, 山东郓城人, 硕士、助理研究员, 1999年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2006年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 主要从事空间相机伺服控制、空间图像传感器应用、遥感成像及图像处理等方面的研究。E-mail: lvshiliang100@sina.com



陈佳豫(1977—), 女, 吉林长春人, 博士, 1995年于长春工业大学获得学士学位, 2006年于吉林大学获得硕士学位, 2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事软件工程、计算机控制等方面的研究。E-mail: jiayu_ya@163.com



武星星(1980—), 男, 河南洛阳人, 博士, 助理研究员, 分别于2001年、2004年、2007年在吉林大学获得学士、硕士、博士学位, 主要研究方向为空间光电技术及智能控制。E-mail: starglare@126.com