

文章编号: 1672-8785(2016)09-00013-05

一种基于 STK 的地平仪数值仿真方法

崔文楠 张 涛 张永骞 陈泉润

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 介绍了红外地平仪探头的布局和姿态解算公式, 然后提出了一种利用卫星工具包软件 (Satellite Tool Kit, STK) 建立地平仪仿真模型的方法。利用该模型对地平仪进行了动态仿真并获取了探测图像。最后, 利用获取图像解算出了卫星姿态并给出了不同工况下的仿真结果。该方法可以在项目开发早期帮助确定地平仪方案, 以避免不必要的重复工作。

关键词: 红外地平仪; 数值仿真; STK

中图分类号: V448.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.09.003

A Method for Numerical Simulation of Horizon Sensor Using STK

CUI Wen-nan, ZHANG Tao, ZHANG Yong-qian, CHEN Quan-run

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The probe layout and attitude formula of an infrared earth sensor are presented. Then, a method for establishing the simulation model of the horizon sensor by using the Satellite Tool Kit (STK) is put forward. The established model is used for the dynamic simulation of the horizon sensor. The detection images are acquired. Finally, the satellite attitude is calculated by using the obtained images and the simulation results under different conditions are given. The method is helpful to the determination of the horizon sensor plan in the early phase of project development so that unnecessary repetition can be avoided.

Key words: IR horizon sensor; numerical simulation; STK

0 引言

作为卫星的姿态测量设备, 地平仪已经在航天领域得到了广泛应用。它主要分为扫描型地平仪和静态地平仪两大类^[1]。其中, 静态地平仪又分为线阵静态地平仪^[2]和面阵静态地平仪。地平仪主要通过地球模拟器进行功能和性能测试。不同的地平仪需要不同的地球模拟器。在

地平仪的开发阶段, 需要对其进行数值仿真, 以验证地平仪探头布局、姿态解算算法和测量精度的影响。

本文提出了一种利用 STK 对静态地平仪进行数值仿真的方法。该方法能够对静态地平仪的功能和部分性能进行仿真, 在项目开发早期可帮助确定地平仪方案, 以避免不必要的重复工作, 从而节省时间和成本。

收稿日期: 2016-05-03

基金项目: 装备预先研究项目 (61501020303)

作者简介: 崔文楠 (1979-), 男, 辽宁沈阳人, 副研究员, 博士, 主要从事姿态测量与仿真方面的研究。

E-mail: cuiwennan@mail.sitp.ac.cn

1 地平仪的工作原理

线阵静态地平仪被安装在卫星的对地面, 用于对卫星的俯仰和滚动两轴姿态进行测量。这种地平仪有 4 个完全一样的探头和 1 个信息处理单元, 其中每个探头包含 1 个视场为 16° 的光学系统和 1 个 160 元红外线阵探测器。这四个探头分别放置在每个象限中的 45° 方向上, 其中每个探头的仰角为卫星正常飞行高度上的红外地平圆的半张角。图 1 所示为线阵静态地平仪的探头布局^[3]。

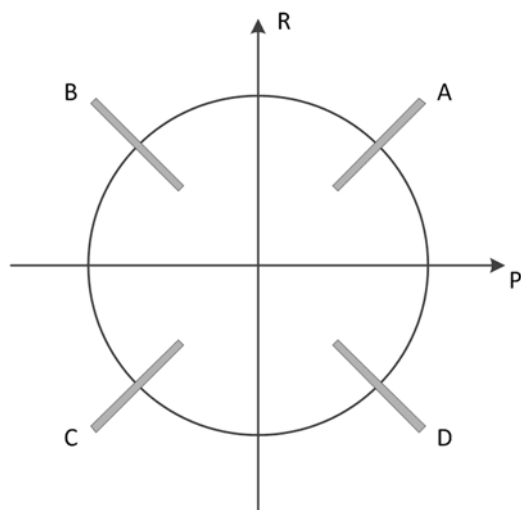


图 1 线阵静态地平仪的探头布局

在不同姿态下, 每个探头均可检测出地面和太空的穿越点对应的像素位置。利用式 (1) 和式 (2) 即可求出卫星俯仰和滚动的姿态角^[4]:

$$P = \frac{IFOV}{2\sqrt{2}}(A + B - C - D) \quad (1)$$

$$R = \frac{IFOV}{2\sqrt{2}}(A + D - B - C) \quad (2)$$

式中, P 和 R 分别为俯仰角和滚动角; A 、 B 、 C 和 D 分别为检测到的穿越点像素值; $IFOV$ 为每个像元所对应的瞬时视场角。

2 数值仿真方法

下面介绍地平仪的数值仿真流程(见图 2)。

2.1 提取探测线列

从仿真得到的面阵图像中提取需要的探测线阵。若面阵图像数据为 A , 则探测线阵为 A



图 2 地平仪的数值仿真流程

的第 80 行, 即

$$B = A(80, :) \quad (3)$$

2.2 中值滤波

对探测线阵的数据进行中值滤波, 即

$$C = \text{median}(B) \quad (4)$$

2.3 求解粗穿越点

利用微分法求解粗的穿越点数据, 即

$$D = \text{diff}(C) \quad (5)$$

$$E = \text{find}(D == \max(D)) \quad (6)$$

2.4 求解精穿越点

对粗穿越点附近的数据进行插值, 求解精穿越点数据, 即

$$F = \text{interp1}(X, Y, xi) \quad (7)$$

$$X = (E - 2 : E + 2) \quad (8)$$

$$Y = (C(E - 2) : C(E + 2)) \quad (9)$$

$$xi = (E - 2 : 0.1 : E + 2) \quad (10)$$

$$G = \text{diff}(F) \quad (11)$$

$$H = \text{find}(G == \max(G)) \quad (12)$$

2.5 姿态计算

分别求出 $ABCD$ 四个探测线阵的精穿越点, 并将其代入式 (1) 和式 (2) 中, 即可计算出地平仪此刻的俯仰角和滚动角。

3 仿真实验

首先, 利用 STK 建立地平仪的探测场景^[5]: 建立高度为 400 km、倾角为 97° 的卫星轨道, 其降交点的地方时为 12 点; 然后建立卫星姿态, 其参考坐标系设定为平台速度-当地水平 (Vehicle Velocity, Local Horizontal, VVLH) 坐标系, 旋转顺序为滚动-俯仰-偏航 (Roll, Pitch, Yaw, RPY); 接着建立 4 个探头, 其中每个探头的视场为 $16^\circ \times 0.1^\circ$, 方位角分别为 45° 、 135° 、 225° 和 315° , 仰角为 400 km 轨道所对应的地球半张角 70.22° 。图 3 所示为地平仪的仿真模型。

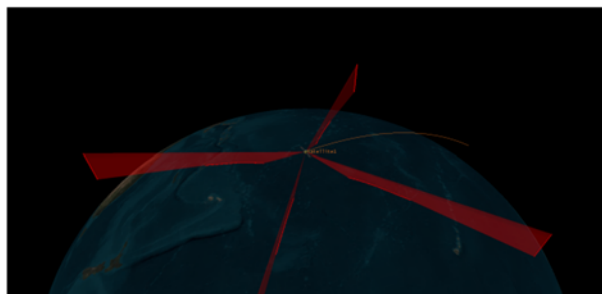


图 3 地平仪的仿真模型

其次, 建立 4 个探头所成的图像场景。像元数设定为 160×160 , 视场设定为 $16^\circ \times 16^\circ$, 参考坐标系设定为探测器本体坐标系, 光轴设定为坐标系的 +Z 轴, 上方向设定为坐标系的 +Y 轴。

4 仿真结果

利用上述方法可以对线阵静态地平仪进行数值仿真, 即可对不同的卫星姿态角度、不同的地平仪算法和不同的卫星高度进行仿真。保持卫星的俯仰角不变, 然后对滚动角的变化进行仿真 (结果见表 1)。

仿真结果表明, 滚动角仿真误差的平均值为 -0.0074° , 标准差为 0.0227° 。俯仰角有时会有 -0.0354° 的误差, 其原因是 B 和 C 探头穿越点存在一个像素的误差。图 4 为滚动角变化后 4 个探头所成的图像。

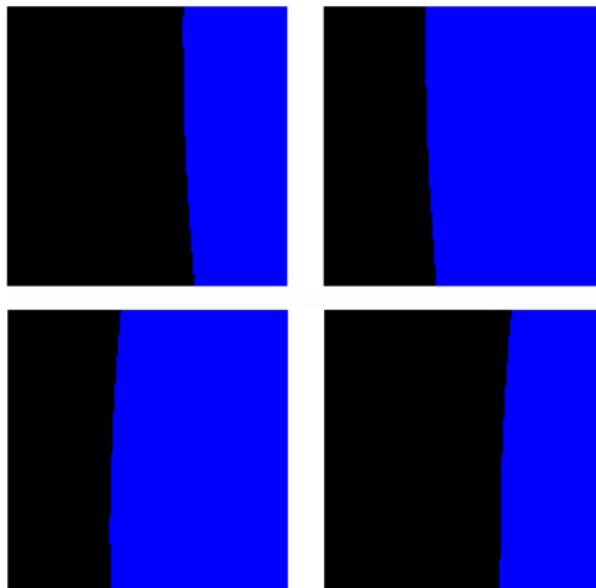


图 4 3° 滚动角下的仿真图像

保持卫星的滚动角不变, 对俯仰角的变化进行了仿真 (结果见表 2)。

仿真结果表明, 俯仰角仿真误差的平均值为 0.0016° , 标准差为 0.0384° 。滚动角有时会有 0.0354° 的误差, 其原因同上。图 5 为俯仰角变化后 4 个探头所成的图像。

表 1 滚动角的仿真结果

滚动真值 ($^\circ$)	0	1	2	3	4	5
滚动仿真结果	0	0.9899	2.0153	3.0052	3.9952	4.9497
俯仰真值	0	0	0	0	0	0
俯仰仿真结果	0	0	-0.0354	-0.0354	-0.0354	0

表 2 俯仰角的仿真结果

俯仰真值 (°)	0	-1	-2	-3	-4	-5
俯仰仿真结果	0	-1.0253	-2.0506	-3.0052	-3.9598	-4.9497
滚动真值	0	0	0	0	0	0
滚动仿真结果	0	-0.0354	0	0.0354	0	0



图 5 3° 俯仰角下的仿真图像



图 6 3° 俯仰角和 3° 滚动角下的仿真图像

表 3 两轴姿态变化的仿真结果

俯仰真值 (°)	0	-1	-2	-3	-4	-5
俯仰仿真结果	0	-0.9899	-2.0153	-3.0052	-4.0305	-4.9851
滚动真值	0	1	2	3	4	5
滚动仿真结果	0	0.9899	2.0153	3.0052	3.9598	4.9851

表 4 方位角变化的仿真结果

方位角 (°)	45	135	225	315
俯仰真值	-5	-5	-5	-5
俯仰仿真结果	-4.9851	-4.9851	-4.9851	-4.9851
滚动真值	5	5	5	5
滚动仿真结果	4.9851	4.9851	4.9851	4.9851

同时对俯仰角和滚动角的变化进行了仿真 (结果见表 3)。仿真结果表明, 俯仰角仿真误差的平均值为 -0.0043° , 标准差为 0.0167° 。滚动角仿真误差的平均值为 -0.0074° , 标准差为 0.0193° 。

图 6 为俯仰角和滚动角同时变化后 4 个探头所成的图像。

对方位角的变化是否引起俯仰角和滚动角的测量误差进行了仿真 (结果见表 4)。仿真结果

表明,从理论上分析,方位角的变化对俯仰角和滚动角的测量没有影响。

最后对轨道高度的变化是否引起俯仰角和滚动角的测量误差进行了仿真(结果见表 5)。仿

真结果表明,从理论上分析,轨道高度变化对俯仰角和滚动角的测量没有影响,但会影响姿态测量的动态范围。图 7 为轨道高度为 600 km、俯仰角和滚动角均为 1° 时 4 个探头所成的图像。

表 5 轨道高度变化的仿真结果

轨道高度 (km)	200	300	400	500	600
俯仰真值 ($^\circ$)	-1	-1	-1	-1	-1
俯仰仿真结果	-0.9899	-0.9899	-0.9899	-0.9899	-0.9899
滚动真值	1	1	1	1	1
滚动仿真结果	0.9899	0.9899	0.9899	0.9899	0.9899

5 结束语

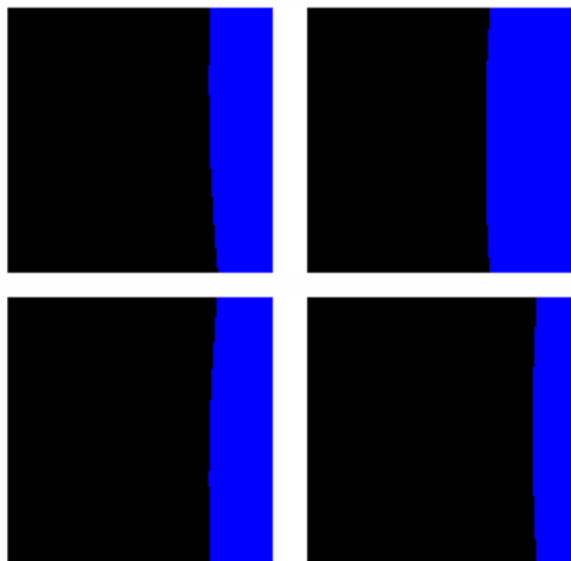


图 7 600 km 轨道上的仿真图像

我们提出了一种利用 STK 对静态地平仪进行数值仿真的方法。该方法能够对静态地平仪的探头布局、解算算法以及影响误差的因素进行仿真,在项目开发早期可帮助确定方案,以节

省时间和成本。本文方法主要针对线阵静态地平仪的仿真,而经过完善后可以推广到面阵静态地平仪和扫描型地平仪的数值仿真。

参考文献

- [1] 贝治年. 静态红外地平仪技术分析 [J]. 红外, 2002, 23(5): 15-22.
- [2] Linda E M, Paul T, Timothy D P, et al. A Compact Lightweight Earth Horizon Sensor Using an Uncooled Infrared Bolometer [C]. SPIE, 2007, 6796: 679629.
- [3] Vladimir S K, Alexandre E R. IR Horizon Sensor Based on Multielement Pyroelectric Detector [C]. SPIE, 1996, 2739: 411-417.
- [4] Gerald F. A Low Weight/Power/Cost Infrared Earth Sensor [C]. Piscataway: 2004 IEEE Aerospace Conference, 2004.
- [5] 李鑫, 崔文楠, 周士兵. 静态红外地平仪大角度测量模型及误差研究 [J]. 红外技术, 2015, 37(1): 73-77.
- [6] 李于衡, 易克初, 田红心. 一种提高红外地平仪确定卫星姿态精度的方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 178-181.