

基于复杂地形高分辨率卫星编程 规划方法研究与仿真

高彩霞^{1,2}, 苏国中¹, 李传荣¹

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要:针对当前航天遥感平台普遍采用的统一高程规划地表,对工作在凝视扫描模式下的高分辨率卫星会产生的诸如目标漏扫、目标重复扫描等问题进行了分析,提出在有效载荷参数范围内,结合低精度 DEM 来控制卫星姿态变化的方法,并且基于 NASA 的 World Wind 三维地球数据浏览软件进行了二次开发,直观地模拟了基于 DEM 进行姿态控制的卫星在轨运行状况,为获得高精度数据提供了一种新思路。

关 键 词: 高分辨率卫星; 凝视扫描; 坐标转换; World Wind

中图分类号: V 474.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2009)04-0543-06

1 引 言

高分辨率卫星影像通常是指像素的空间分辨率在 10 m 以内的遥感影像,它们的出现使得在较小的空间尺度上观察地表的细节变化、进行大比例尺遥感制图以及监测人为活动对环境的影响成为可能,具有广阔的应用前景。它们通常采用同步扫描模式,即遥感器成像速度等于卫星的地表速度,如图 1 所示:

面扫描速度和卫星地表速度不同,如图 2 所示:

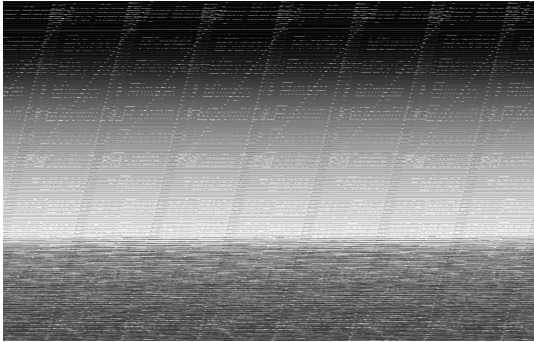


图 2 卫星异步扫描模式

Fig. 2 Asynchronous scanning mode

在设计机载遥感器平台航线时,若地形起伏较大的情况下,一般会结合地形的影响进行遥感器平台的姿态控制,已经考虑了地形的影响;对于星载遥感器而言,由于其轨道高度比较高,地形影响没有航空平台显著,因此目前很少考虑地形变化对成像的影响,而是普遍采用统一的高程来规划地表。

凝视扫描模式是一种特殊的异步扫描模式,编程人员可以根据目标区域的位置、大小以及太阳光照时间等因素来设计规划任务,并向卫星发送编程指令以调整卫星的姿态,使其在某一时间段内对感兴趣地区持续成像,它对于监测重点区域、快速获取



图 1 卫星同步扫描模式

Fig. 1 Synchronous scanning mode

由于当前卫星可控性增强,有的卫星,例如 QuickBird, SPOT 以及 EROS,可以采用异步扫描模式对特殊区域进行成像。在异步扫描模式下,地

目标区域信息具有重要的意义。但是由于凝视扫描的特殊性,地形势必会对成像造成一定的影响,如目标漏扫、目标重复扫描。当卫星采用凝视扫描模式时,如果不考虑地面起伏,用统一的高程数据规划卫星姿态变化,如图 3 所示,当扫描区域有 A、B 两个目标时并且目标较大,卫星需要两次或多次过境目标区域才能完成对目标的覆盖,在不考虑地面起伏的情况下,使用统一的高程直接制定目标扫描计划,则处于正向地貌和负向地貌的目标会有一部分重复扫描,一部分漏扫。

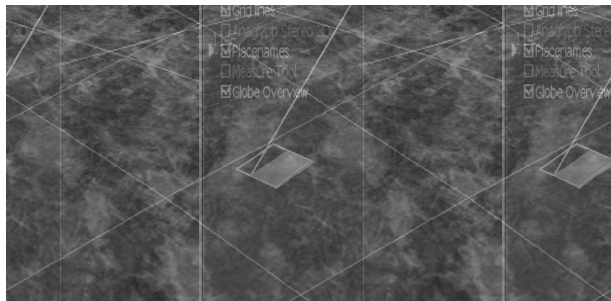


图 3 凝视扫描模式
Fig. 3 Staring scanning mode

扫描目标落空会影响实际的应用,尤其是对于一些非常重要地物的识别;重复扫描则会影响获取数据的质量,增加后处理的难度。因此,本文提出结合低精度 DEM 对卫星进行编程规划的新思路,即通过收集全球 DEM 数据(如美国 USGS 网上公布的 90mDEM)制定凝视模式下的扫描计划,使得高分辨率卫星在有效载荷参数范围之内,结合当地的 DEM 来调整姿态,减少捕获目标落空的概率,避免目标重复扫描现象的发生,从而得到高质量、高精度的数据来满足对一些重要地物的识别需要。

2 问题分析

2.1 目标漏扫

当扫描目标比较大,并且目标的高程低于规划地表的高程时,卫星需要两次或多次过境目标区域才能完成对目标区域的覆盖,就有可能出现扫描到的目标区域会比原始目标区域要小的情况,即目标区域出现漏扫。图 4 为沿卫星飞行方向上目标凝视扫描分析图。

如图 4 所示,AC 为规划地表上沿飞行方向上的扫描长度, ab_1 、 b_2c 为地面上沿飞行方向上实际扫描的长度,虚线标识的部分(a_1a 、 b_1b_2 、 cc_1)为沿飞行方向上漏扫的长度。假定规划地表的高度 h ,卫星最大俯仰角(pitch)为 θ ,由下式可获得卫星的漏扫

区域沿飞行方向上的距离为:

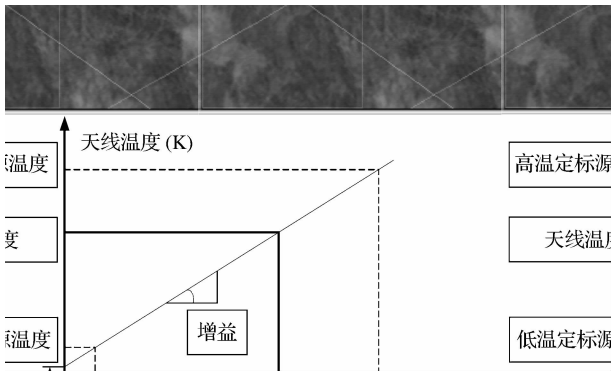


图 4 目标漏扫分析图
Fig. 4 Analysis on target missing

$$b_1b_2 = 2 * h * \tan(\theta)$$

$$a_1a = cc_1 = h * \tan(\theta)$$

由上式可以得到,当俯仰角为 30°,漏扫区域沿飞行方向上的距离为 $b_1b_2 = 2.3 * h$ 。

2.2 目标重复扫描

同样的,对于某一高度的规划地表,当目标区域较大,卫星需要两次或多次过境目标区域才能完成对目标区域的覆盖,且目标的高程高于规划地表时,这有可能引起重复扫描的现象。如图 5 所示,黑色粗线标识的部分为在飞行方向上目标重复扫描的部分。

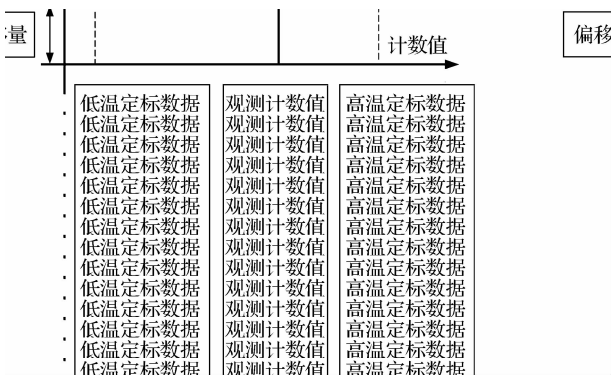


图 5 目标重复扫描分析图
Fig. 5 Analysis on target scanned repetition

假定规划地表的高度为 h ,目标高程为 $h + h_1$,卫星最大俯仰角(pitch)为 θ ,则根据图 5 可以计算出重复扫描区域沿卫星飞行方向上的长度大约为 $h_1 * b_1b_2/h$,其中 $b_1b_2 = 2 * h * \tan(\theta)$ 。

3 研究方法

卫星的 3 个姿态角分别为俯仰角、滚动角、偏航角,由于改变偏航角会改变扫描目标中心的位置,又会使物体产生较大的变形,因此这里主要考虑结合

当地的 DEM 数据来控制卫星俯仰角和滚动角,以避免目标漏扫、重复扫描。具体实现过程主要包括以下几个步骤:

(1) 收集当地低精度的 DEM 数据以及感兴趣区域的经纬度数据,将其作为编程规划的输入数据。

(2) 在有效载荷参数范围,根据卫星轨道的两行根数计算凝视模式下卫星过境感兴趣区域的时间,则由卫星此时的位置通过坐标转换可以推算出此时卫星的姿态(星体坐标系相对于轨道坐标系的姿态)。

坐标转换流程图如图 6 所示:

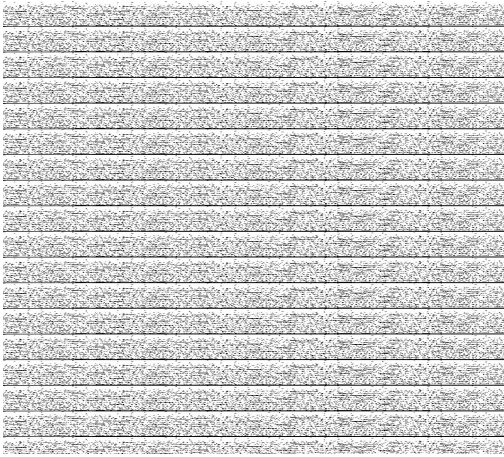


图 6 坐标系转换流程图

Fig. 6 Coordinate transform flow chart

图 6 中, d 为卫星质心和地面点的距离。

(3) 对 Wind World 进行二次开发,模拟卫星运行情况。

3.1 由地面点推算高分辨率卫星姿态

根据已知目标区域的大地坐标和卫星的星历数据,通过坐标转换可以求得卫星的姿态。

涉及到的坐标系定义如下:

WGS84 坐标系 ($O-X_{CTS}Y_{CTS}Z_{CTS}$): 原点 O 为地球质心; X_{CTS} 轴指向国际时间局(BIH)1984 定义的协议子午面与 CTP 相应的赤道的交点; Z_{CTS} 轴指向国际时间局(BIH)1984 定义的协议地极; Y_{CTS} 轴在赤道平面内与 X_{CTS} 、 Z_{CTS} 构成右手系。

天球坐标系 ($O-X_IY_IZ_I$): 原点 O 为地球质心; X_I 轴指向 JD2000.0 春分点; Z_I 轴指向天球北极; Y_I 轴在赤道平面内与 X_I 、 Z_I 构成右手系。

轨道坐标系 ($E-X_eY_eZ_e$): 原点 E 为卫星质心; X_e 轴地球质心与卫星质心的连线的法向平面内,指向卫星飞行方向; Z_e 轴由卫星质心指向地心; Y_e 轴与 X_e 、 Z_e 构成右手系。

星体坐标系 ($E-X_eY_eZ_e$): 原点 E 为卫星质心;

X_e 、 Y_e 、 Z_e 轴为卫星 3 个转动惯量主轴。

3.1.1 各坐标系之间的转换关系

(1) WGS84 坐标系到天球坐标系

假设已知的地面点坐标在 WGS84 中的坐标表示为 (B, L, H) , 即纬度、经度、高度; 在天球坐标系下的坐标为 (X_I, Y_I, Z_I) , 如果不考虑岁差、章动、极移的影响, 上述两个坐标系的关系为:

$$\begin{aligned} X_I &= (N + H) \cos(B) \cos(L + SG) \\ Y_I &= (N + H) \cos(B) \sin(L + SG) \\ Z_I &= (N * (1 - F) + H) \sin(B) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: N 为法线长度, F 为椭圆第一偏心率, SG 为格林尼治恒星时角, 即当前时刻天球坐标系 X_I 轴和 WGS84 坐标系 X_{CTS} 轴的夹角。

(2) 天球坐标系到轨道坐标系

$$\begin{pmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{pmatrix} = L_{00} R_z(u) R_x(i) R_z(\Omega) \begin{pmatrix} X_I - X_s \\ Y_I - Y_s \\ Z_I - Z_s \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中: (X_s, Y_s, Z_s) 是卫星在天球坐标系中的位置矢量。

$$R(\Omega) = \begin{pmatrix} \cos u & \sin u & 0 \\ -\sin u & \cos u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R(i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & \sin i \\ 0 & -\sin i & \cos i \end{pmatrix}$$

$$R(u) = \begin{pmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega & 0 \\ -\sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$L_{00} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

u 的计算公式为 $u = \omega + f$, 其中 ω 为近地点角距, f 为卫星的位置相对于轨道近地点的角距。 i 为轨道倾角, Ω 为升交点赤经。

(3) 轨道坐标系到星体坐标系

$$\begin{pmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{pmatrix} = R_{FB} \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中: $R_{FB} = R_z(\text{roll}) R_y(\text{pitch})$

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \text{roll} & -\sin \text{roll} \\ 0 & \sin \text{roll} & \cos \text{roll} \end{pmatrix}$$

$$R_y(\text{pitch}) = \begin{pmatrix} \cos \text{pitch} & 0 & -\sin \text{pitch} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \text{pitch} & 0 & \cos \text{pitch} \end{pmatrix}$$

其中： $\begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{bmatrix}$ 。

3.1.2 卫星姿态参数计算

根据式(5)可以推出卫星平台俯仰角和滚动角的计算式如下：

俯仰角 $\text{pitch} = \arctan(X_{se}/Y_{se})$ (6)

滚动角 $\text{Roll} = \frac{Y_{se} * Z_e + \sqrt{Y_e^4 - Y_e^2 * Y_{se}^2 + Y_e^2 * Z_e^2}}{Y_e^2 + Z_e^2}$ (7)

根据式(6)、式(7)即可实现由地面点的经纬度坐标、高程信息推算卫星当前俯仰角及滚动角。

3.2 使用 World Wind 模拟卫星平台姿态

以上述研究结果为基础,我们对 NASA 的三维

地球数据浏览软件 World Wind 进行了二次开发,获得复杂地形条件下卫星凝视扫描模式演示系统,该系统可以直观地显示在轨卫星工作在凝视扫描模式下的运行情况,从而对卫星姿态进行控制。

3.2.1 开发环境介绍

World Wind 是 NASA(National Aeronautics and Space Administration)Ames 研究中心开发的一款三维地球数据浏览软件,它类似于 Google Earth,可以放大、缩小、拖动、转换角度来查看卫星影像,最新的版本是 1.4,它的代码是开源的,可以进行底层开发,并支持插件开发。主界面如图 7 所示：

World Wind 的主要功能包括：

(1)三维浏览,包括放大、缩小、拖动、转换角度等。

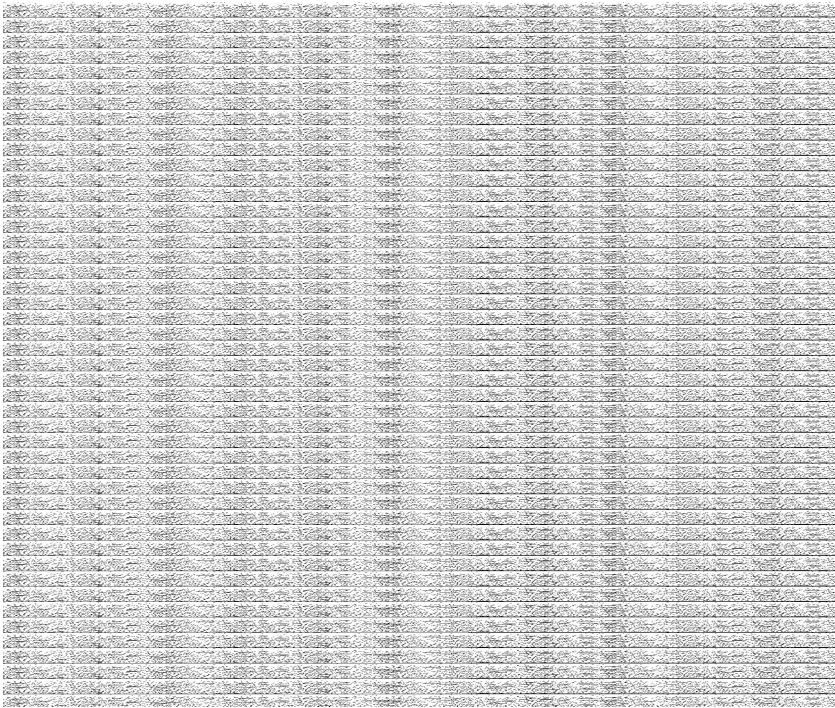


图 7 World Wind 启动界面

Fig.7 Start interface of World Wind

(2) 保存屏幕截图。

(3) 查找地球任何角落的城市、乡村、建筑物、人文资源等,并可以收藏喜爱的地点。

(4) 显示、隐藏工具条、经纬线、位置信息、地轴、十字准心等。

(5) 图层管理器。

(6) 全屏浏览。

(7) 读取由 Internet 上的 WMS (Web Map Service,网络地图服务)提供的图像。

(8) 读取生动的地球模型动画演示。

(9) 读取 MODIS 中的灾难信息。

3.2.2 卫星姿态实时模拟演示系统

在 World Wind 开发平台中,卫星运行模拟的过程主要是通过开发 Satellite Tracker 的插件来实现。它的主要功能是通过调用 NORAD SGP4/SDP4 轨道实时计算工具包(OrbitTools)计算卫星在当前系统时钟下的卫星的位置及相关参数,并使用 Direct3D 语言三维渲染卫星实体和轨道,以达到卫星运动可视化的效果。

图 8 为 NOAA15 轨道的属性页,通过二次开发,增加了新的属性项,借助 World Wind 中 90 m 分辨率的全球 DEM 数据,实现对卫星实时控制的

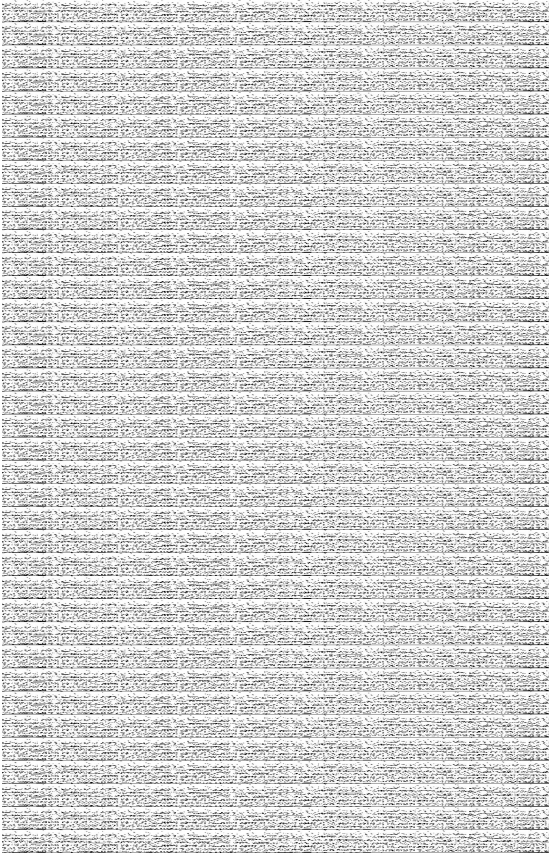


图 8 设置属性页示意图
Fig. 8 Property setting page

功能,如图 6 所示。

我们在属性页中增加了“使用规划数据”栏目,包括 intersectDEM, OutputData, useUserData 3 个选项卡。其中 intersectDEM 选项卡表示是否与 DEM 求交,useUserData 选项卡表示是否使用规划数据,OutputData 选项卡表示是否输出姿态数据。当 TrackDisplay 栏目中的 ShowTrack 变量设置为 TRUE 时,表示绘制轨道。向演示系统中输入目标区域的经纬度,以及俯仰角、滚动角范围,根据 NASA 网站上实时更新的两行根数或者用户自定义两行根数,就可以将卫星采用凝视扫描模式观测感兴趣区域的运行情况直观地显示出来。

3.2.3 卫星姿态模拟结果

图 9 模拟了卫星侧摆凝视扫描的工作情况,目标区域的地理经度范围为 113.6°E~113.643°E,纬度范围为 26.46°N~26.503°N,目标边界用白色线框出,灰色端点表示卫星位置,白色线条为扫描光束,浅灰色区域为已扫描过的感兴趣区域。若要获取实时的卫星姿态规划结果,可在前述的属性页 OutputData 选项进行设置,获得卫星针对特定区域扫描时俯仰角、滚动角的大小。在凝视模式下,需要根据地形起伏推算俯仰角和滚动角的大小,卫星根据推算出来的



图 9 凝视侧扫界面
Fig. 9 Imaging in side scanning under staring mode

姿态角可以扫描到除星下点以外的感兴趣区域,并实现对重点区域的持续观测,同时避免目标漏扫和目标重复扫描的现象。

4 结 语

由于凝视扫描模式的特殊性,QuickBird、SPOT

等高空间分辨率遥感卫星会引起目标漏扫、目标重复扫描。针对这些问题,本文提出结合低精度 DEM 来对卫星编程规划,从而获得高质量的数据,并且开发了一个基于 DEM 进行卫星姿态控制的演示系统,实时模拟卫星在轨运行的姿态状况。这是对于高空间分辨率卫星姿态控制方法的一次有益探索,研究成果同样也适用于机载光学、SAR、LiDAR 等载荷的高质量遥感数据的获取,或者是针对感兴趣区域的多角度观测。当然,在实际应用中,要考虑具体的约束条件,包括轨道要素、卫星侧摆约束、有效载荷工作状态等。

采用此方法对卫星硬件的要求较高,但是随着卫星各种性能指标的提高,姿轨控制技术的改进,实时地调整卫星姿态将成为可能,而且姿态微小的改变就会消除地形的影响。并且本方法是针对受灾地区或者军事侦察区域等一些紧急观测任务,通过对卫星进行编程规划,使其采用凝视扫描模式成像,对感兴趣区域进行重点观测。当没有特别的观测任务时,卫星采用同步扫描模式。

参考文献:

- [1] Luo Zhiqing, Zhang Huirong, Wu Qiang, *et al.* The Airborne LiDAR Technology[J]. Land and Resources Informatization, 2006, (2): 22-25. [罗志清, 张惠荣, 吴强, 等. 机载 LiDAR 技术[J]. 国土资源信息化, 2006, (2): 22-25.]
- [2] Shahid K, Okouneva G. Intelligent LIDAR Scanning Region Selection for Satellite Poses Estimation[J]. Compute Vision and Image Understanding, 2007, 107(3): 203-209.
- [3] Zhou Zhongmo. Measurement Theory and Application of GPS [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1991. [周忠谟. 卫星测量原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1991.]
- [4] Zhang Renwei. Orbit and Attitude Control on Geostationary Satellite [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005. [章仁为. 静止卫星的轨道和姿态控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.]
- [5] Chen Jie, Tang Guojian. Orbit Design of Sun-Synchronous Satellite[J]. Shanghai Spaceflight, 2004, (3): 34-39. [陈洁, 汤国建. 太阳同步卫星的轨道设计[J]. 上海航天, 2004, (3): 34-39.]
- [6] Liu Yang, Yi Dongyun, Wang Zhengming. Coordinate Transformation Methods from the Inertial System to the Centroid Orbit System[J]. Aerospace control, 2007, 25(2): 4-8. [刘洋, 易东云, 王正明. 地心惯性坐标系到质心轨道坐标系的坐标转换方法[J]. 航天控制, 2007, 25(2): 4-8.]
- [7] Sun Quanxing. Attitude and Orbit Control System of Earth-Observation Satellite[J]. Investigation Abroad on Spaceflight, 1993, (1): 138-149. [孙全性. 对地观测卫星姿态和轨道控制系统[J]. 航天出国考察技术报告, 1993, (1): 138-149.]
- [8] Zhang Xiaohong. Theory and Method of Airborne LiDAR Measuring Technology [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. [张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.]

Research on High-Resolution Satellite Programming Based on Complex Terrain and Development of the Simulation System

GAO Cai-xia^{1,2}, SU Guo-zhong¹, LI Chuan-rong¹

(1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10090, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The surface of the earth is considered as a unified elevation when satellite remote sensing platforms imaging, but these problems such as target missing and target detection repetition will be caused significantly with high-resolution sensor in staring mode. Based on the analysis to these problems, a new method to control the satellite attitude combining with low accuracy DEM within payload's ability is put forward in this paper. Furthermore based on World Wind a three-dimensional Earth data browsing software developed by NASA, the Effect Drawing of satellite's attitude control considering the DEM is shown, which provides a new method to obtain high-precision data.

Key words: High-resolution satellite; Staring scanning; Coordinate transform; Word Wind