

# 适用多传感器的卫星对地覆盖计算模型

胡雅斯<sup>1,2</sup>, 孟新<sup>2</sup>, 李立钢<sup>2</sup>

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100190; 2. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

**摘要:**传感器视场范围不同, 对地覆盖区域形状也随之不同, 为了适应传感器视场多样化的特点, 提出一种适用不同视场传感器的卫星对地覆盖计算模型。该模型特点是通用性强、计算速度快、精度较高, 能够较准确描述卫星的瞬时覆盖区域。以 STK 计算结果作为参考, 试验表明本模型具有较高的准确性。

**关键词:**不同视场传感器; 卫星覆盖; 计算模型

**中图分类号:** TP 391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2009)04-0537-06

## 1 引言

航天技术在 21 世纪人类认识自然、改造自然中发展十分迅速, 对人类生活产生重大影响, 是显示一个国家科技实力的重要标志。卫星作为各类空间信息传感器的主要搭载平台之一, 其发展与应用一直是航天领域所关注的重点。对地覆盖是卫星的重要性能之一, 构建通用高效的覆盖方法, 探索并利用不同的空间信息, 在气象领域、地球资源探测、先进的军事应用及对月球和其它行星的探测等方面都有广泛的应用<sup>[1]</sup>。

卫星对地面的瞬时覆盖区域, 是指某一时刻卫星传感器可观测到的地球区域。卫星与地心的连线和地面的交点为卫星的星下点, 卫星在轨道上任一点对地覆盖区就是有一定张角的传感器所形成的曲面与地球表面相交形成的区域<sup>[2]</sup>。覆盖区是以传感器中心在地面上的投影点为中心, 传感器观测到的地球表面区域。其大小与卫星传感器的视场角和卫星姿态角有关。由于瞬时覆盖区域能够实时准确描述卫星传感器对地面的覆盖情况, 因此瞬时覆盖区的解析计算方法研究特别重要。

国外现有对卫星覆盖的研究主要是基于卫星轨道设计、卫星星座设计, 集中在连续全球覆盖分析(Continuous global coverage)、连续区域性覆盖分析(Continuous zonal coverage)、间歇性区域覆盖分析(Intermittent local coverage)三大类上。目前, 卫

星仿真系统的典型产品是美国 AGI 公司的卫星工具包 Satellite Tool Kit (STK), 功能强大、可视度高, 其 COVERAGE 模块是覆盖仿真模块, 可以对任意轨道的卫星和复杂传感器的地面覆盖情况进行仿真, 并提供多项修改功能如卫星参数、传感器参数、报表输出方式等。

国内学者在卫星对地覆盖问题上也进行了大量研究和探索。在覆盖边界算法研究方面, 李大耀提出了卫星对地面覆盖区域的通用求解方法和卫星沿轨道运动对地面覆盖带外沿轨迹求解方法。郗晓宁等从卫星轨道设计方面对卫星覆盖边界算法进行了讨论。王永刚、刘玉文<sup>[2]</sup>结合军事卫星的特点, 研究了卫星及卫星网对地面覆盖边界的算法。

一般而言, 传感器视场范围有多种, 有圆形、矩形等。但现有的大多覆盖算法只是研究特定传感器并将传感器的区域理解为圆锥投影, 未充分考虑传感器形状及成像特性。如果有一种能实现所有典型形状的传感器类型的覆盖算法, 就会更加方便、有效。为了解决传感器视场范围多样化的特点, 本文将提出一种适用多传感器类型的计算覆盖区域的数学模型。该模型特点是通用性强、计算速度快、精度高, 能够较准确描述卫星的瞬时覆盖区域。在实际工程应用中具有较高利用价值。

## 2 典型传感器工作原理

目前, 航天应用的传感器主要有成像传感器、探

测传感器及通信传感器几大类,其中成像传感器和通信传感器在对地瞬时观测或通信时会形成一定覆盖区域,其与传感器的形状、大小有一定的关系。

成像传感器主要包括了光学和合成孔径雷达(SAR)两大类,光学传感器通常以框幅式或线阵推扫式两种方式获取影像。框幅式成像在某一摄影瞬时获得一张完整的影像,一张影像上的所有像点共用一个摄影中心。如图 1。而线阵推扫方式的成像传感器只有一排,由于卫星不停地相对地面运动使得一排排像素可以组合成一张长长的平面图像,也就是一轨图像。这种成像过程有点类似于扫描仪的工作方式<sup>[3]</sup>如图 2 所示。

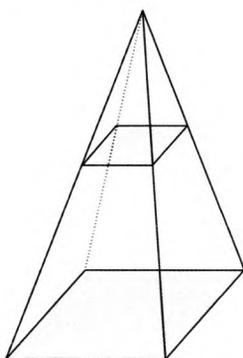


图 1 框幅式成像

Fig. 1 Frame imaging

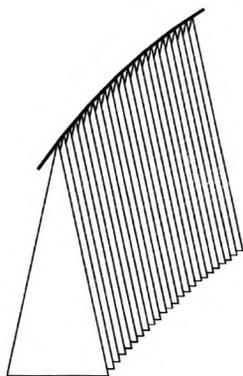


图 2 线阵推扫式成像

Fig. 2 Linear array push-broom imaging

SAR 是一种主动式获取影像的方式,它的基本原理是把很多小天线单元叠加在一起,构成一个长长的天线。通过卫星上搭载的天线向地面发射雷达波束,并接收地面反射的回波信号成像。利用雷达等对地面目标进行扫描,通过计算回波特性得到地面目标的物理特性。SAR 的特点是分辨率高、能全天候工作,能有效地穿透某些掩盖物和识别伪装。图 3 给出了 SAR 成像几何示意。

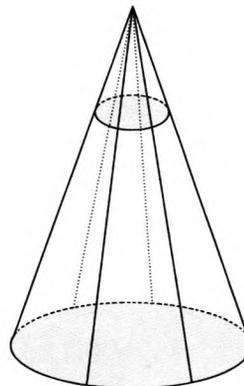


图 3 SAR 天线波束成像

Fig. 3 Antenna beam imaging

通信传感器通常基于天线发射电磁波信息实现通信覆盖,而探测类传感器是以瞬时点探测的形式实现地面信息探测获取,如激光高度计等,其在地面会形成探测点轨迹。

### 3 适用多传感器的卫星对地覆盖计算模型基本思路

适用多传感器的卫星对地覆盖计算统一模型的基本思路是:根据传感器的几何形状及参数建立初始观测矢量,同时基于卫星的星历参数、姿态参数和地球椭球模型,计算传感器边界单元对应的地球表面映射位置,从而实现覆盖计算。其核心是建立适应多传感器形状和参数的初始观测矢量。

上节中给出了典型传感器的工作机理,对各类传感器而言,其覆盖边界可认为是由其传感器边界点观测矢量与地面的交点连接而成。框幅式相机的边界点用 4 个点描述,线阵推扫式相机边界点用 2 个点描述,而 SAR 或通信天线则用多个点来描述其边界点。特别的,当侧摆角和传感器张角都为 0 时,就是卫星星下点。因此,根据传感器形状在圆锥截面选取边界点,点数不同,可以产生框幅式、线阵推扫式等,从而反映不同传感器的覆盖特性。下面具体描述初始矢量的建立过程。

传感器坐标系的定义是:原点为传感器中心, $Y$ 轴平行于扫描方向, $X$ 轴平行于飞行方向, $Z$ 轴指向地心, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴方向符合右手定则。示意图如下:

如图 4,以传感器表面中心为原点  $O$ 、 $F$  为传感器焦点, $N$  点是传感器圆边界上任意一点, $M$  点是边界上且在  $Y$  轴上一点,则在圆边界上任何一点的观测矢量  $FN$  可由  $FM$  沿  $Z$  轴转  $\theta$  角得到。记  $l$  为传感

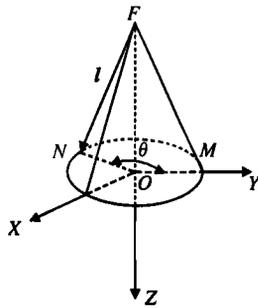


图 4 初始矢量建立示意图

Fig. 4 Initial vector setting profile

器的观测矢量,  $l = [x, y, z]^T$ , 设  $|OF| = f$ , 圆锥截面圆半径  $|OM| = r$ , 则  $M = [0, r, 0]^T$ ,  $F = [0, 0, -f]^T$ ,  $FM = M - F = [0, r, f]^T$ , 具体定义如下所示<sup>[5]</sup>:

$$l = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} FM$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ r \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r\sin\theta \\ r\cos\theta \\ f \end{bmatrix}$$

归一化则得

$$\begin{cases} x = \frac{r}{f} * \sin\theta \\ y = \frac{r}{f} * \cos\theta \\ z = \frac{f}{f} = 1 \end{cases}$$

又  $\frac{r}{f} = \tan\alpha$ , 则代入上式可得:

$$\begin{cases} x = \tan\alpha * \sin\theta \\ y = \tan\alpha * \cos\theta \\ z = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\alpha$  为传感器半视场角,  $\theta$  为传感器半场范围内  $0 \sim 2\pi$  的中间角, 单位均为弧度, 具体数值与所取数  $n$  有关,  $\theta = \frac{2\pi}{n}$ . 当  $n = 1$  时就是星下点的坐标, 当  $n = 2$  时就是线阵推扫式, 当  $n = 4$  时就是框幅

$$T_{sat \rightarrow orb} = \begin{bmatrix} \cos(yaw) & \sin(yaw) & 0 \\ -\sin(yaw) & \cos(yaw) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(roll) & \sin(roll) \\ 0 & -\sin(roll) & \cos(roll) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(pitch) & 0 & -\sin(pitch) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(pitch) & 0 & \cos(pitch) \end{bmatrix}$$

卫星轨道坐标系到地心惯性坐标系 (ECI) 的转换矩阵  $T_{orb \rightarrow eci}$  是由当前卫星星历求得的, 卫星星历包括了卫星位置矢量和卫星速度矢量。

地心惯性坐标系到地心固定坐标系 (ECR) 的转换矩阵  $T_{eci \rightarrow ecr}$  是依照 IAU2000 给出的标准建立的。

于是可以得到从传感器坐标系到地心固定坐标

式,  $n$  越大, 越逼近 SAR 型传感器。

观测矢量建立好后, 通常还需要将传感器观测矢量、卫星位置矢量经过一系列坐标转化, 进而构建矢量三角形, 从而解算出地面点坐标。这些坐标系包括传感器坐标系、卫星本体坐标系、卫星轨道坐标系、地心惯性坐标系、地心固定坐标系、地心大地坐标系等, 图 5 是覆盖算法的基本流程图。

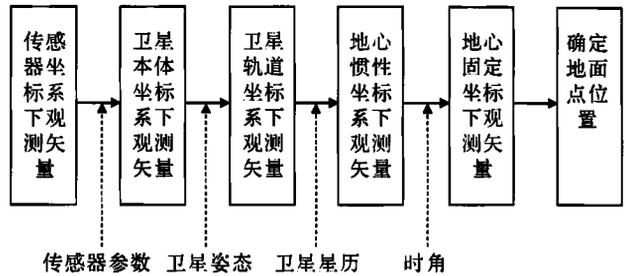


图 5 覆盖算法流程图

Fig. 5 Flow chart of covering algorithm

## 4 算法具体实现

### 4.1 初始观测矢量的建立

上节已经建立了传感器坐标系下观测矢量  $los_{sen} = [x, y, z]^T$ , 具体定义如式 (1) 所示。

### 4.2 初始观测矢量的转换

基于式 (1) 建立的观测矢量, 然后利用卫星姿态、卫星星历等信息, 实现观测矢量从传感器坐标系到地心固定坐标系的转换, 具体如下:

传感器坐标系到卫星本体坐标系的转换矩阵  $T_{sen \rightarrow sat}$  由安装参数决定, 通常认为这种坐标变换是一种角度的旋转变换, 在本文研究中, 将其近似认为是单位阵。

卫星本体坐标系到卫星轨道坐标系的转换矩阵  $T_{sat \rightarrow orb}$  是由当前时间的卫星姿态得到的, 卫星滚动角 roll、俯仰角 pitch、偏航角 yaw 构成转换矩阵为  $T_{sat \rightarrow orb}$ , 即:

系的转换矩阵  $T_{sen \rightarrow ecr}$ :

$$T_{sen \rightarrow ecr} = T_{eci \rightarrow ecr} T_{orb \rightarrow eci} T_{sat \rightarrow orb} T_{sen \rightarrow sat}$$

最后得到地心固定坐标系下的观测矢量:

$$los_{ecr} = T_{sen \rightarrow ecr} los_{sen}$$

### 4.3 地面点坐标位置的确定

图 6 中, 卫星质心为 S、地心质心为 O, F 是卫星星下点, P 是传感器中心在地面上的投影,  $los_{ecr}$  为地

心固定坐标系下观测矢量;  $s_{\text{ecr}}$  表示地心固定坐标系下的卫星位置矢量;  $\alpha$  是传感器的半视场角,  $\varphi$  是卫星侧摆角,  $E_1$ 、 $E_2$  是观测视线和地面的交点, 即卫星对地覆盖边界点。可以通过联立观测视线和地球椭球体的方程求出。

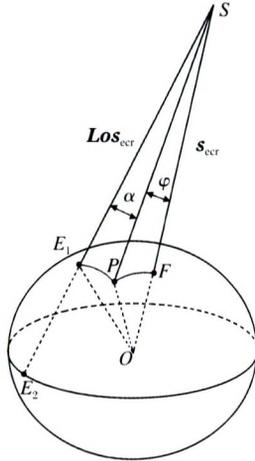


图6 观测矢量示意图

Fig. 6 Observing vector profile

观测视线经过卫星所在位置, 且方向和观测矢量共线, 其中观测矢量  $los_{\text{ecr}}$  和卫星位置矢量  $s_{\text{ecr}}$  是

已知量, 记  $los_{\text{ecr}} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix}$ ,  $s_{\text{ecr}} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix}$ ,  $(X, Y, Z)$  是地

固坐标系下直线上任一点的坐标, 则传感器观测视线的直线方程可以表达如式(2):

$$\frac{X - s_1}{l_1} = \frac{Y - s_2}{l_2} = \frac{Z - s_3}{l_3} \quad (2)$$

本文使用的国际大地测量学与地球物理联合会 IUGG1975 参考椭球的几个参数:

- 长半径  $a = 6\,378\,140.0 \text{ m}$
- 短半径  $b = 6\,356\,755.2881575287 \text{ m}$
- 第一偏心率  $e^2 = 0.006694384999588$
- 第二偏心率  $e'^2 = 0.006739501819473$

$(X, Y, Z)$  是地固坐标系下地球上任一点的坐标, 地球椭球体方程可表达如式(3):

$$\left(\frac{X}{a}\right)^2 + \left(\frac{Y}{a}\right)^2 + \left(\frac{Z}{b}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可以求出视线与地球表面交点的空间直角坐标  $(X, Y, Z)$ , 取其中离卫星最近的交点。

下面需要将大地空间直角坐标  $(X, Y, Z)$  转换成大地坐标系下的经纬度和高程  $L, B, H$ 。

$$\begin{cases} L = \arctan \frac{Y}{X} \\ B = \arctan \frac{z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(1 + \frac{ae^2}{Z} \cdot \frac{\sin B}{W}\right) \\ H = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos B} - N \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$  (5)

计算大地纬度  $B$  时, 需用迭代法, 由于  $e$  远小于 1, 所以收敛很快。

另外还有一种简略地理坐标计算方法, 指的是忽略了高度信息的地理坐标。

简略地理坐标系坐标为  $(L, B)$ , 地球固定直角坐标系坐标为  $(X, Y, Z)$ , 两者的转换关系如式(6):

$$\begin{cases} L = \arctan \frac{X}{Y} \\ B = \arctan \left( \frac{a^2 Z}{b^2 \sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

### 5 实验分析

基于所建模型, 编制仿真程序, 开展实验分析及验证。

程序中设置卫星轨道六根数为: 半长轴为 7 123. 177 km, 偏心率为 0, 轨道倾角为 93. 1°, 升交点赤经为 79. 196715°, 近地点幅角为 140°, 真近点角为 0°, 历元时刻为 01 Jan 2009 00 : 00 : 00. 000。卫星传感器半视场角为 10°, 设置卫星姿态角中滚动角为 15°、俯仰角为 20°。

选用 STK 作为仿真验证工具, 图 7 示意了 01 Jan 2009 00 : 00 : 00. 000 到 01 Jan 2009 00 : 00 : 59. 000 时间区段内卫星星下点轨迹比较, 图 8 示意

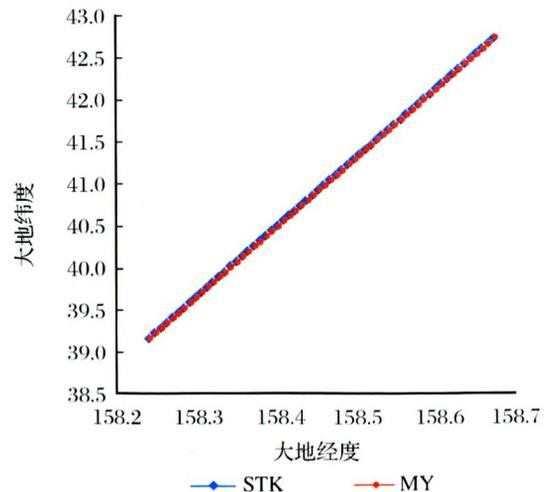


图7 星下点轨迹比较示意图

Fig. 7 Comparative diagram of subsatellite point tracks

了 01 Jan 2009 00 : 00 : 00.000 时刻框幅式相机覆盖范围比较,图 9 示意了 01 Jan 2009 00 : 00 : 00.000 时刻 SAR 天线覆盖范围比较。

以 STK 计算结果作为参考,计算本算法结果与其差的绝对值,统计一万个点的纬度差曲线如图 10,是随着经度变化纬度误差变化的曲线,图 11 是误差值

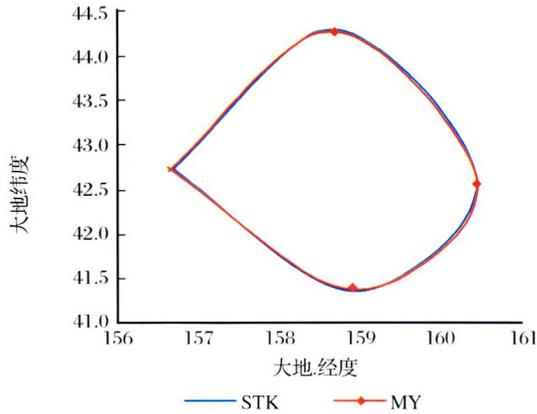


图 8 框幅式相机覆盖范围比较示意图

Fig. 8 Comparative diagram of frame-type camera coverage

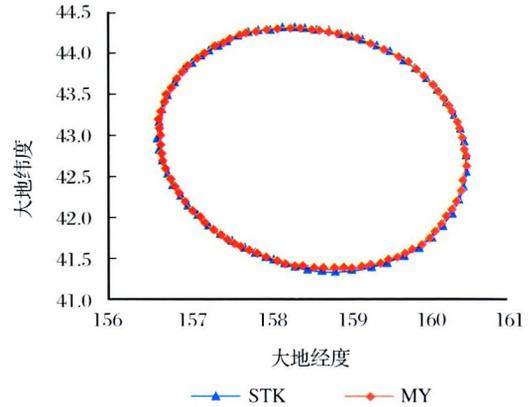


图 9 天线波束覆盖比较示意图

Fig. 9 Comparative diagram of antenna beam coverage

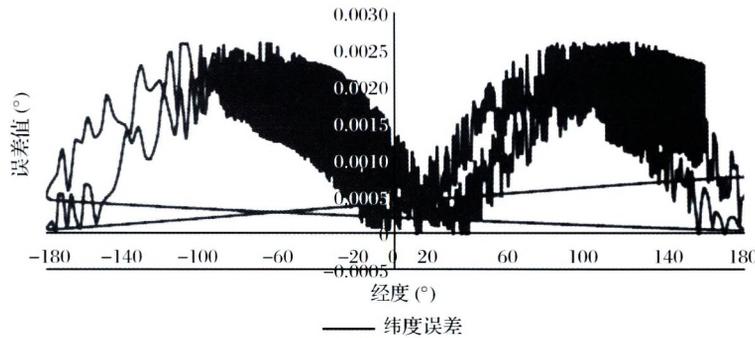


图 10 纬度随经度变化的误差曲线

Fig. 10 Graph of error in latitude with the variation of longitude

大小的曲线图。

由曲线可知,纬度误差在低经度附近最小,在 100°附近误差最大。这个曲线图能很好地展现纬度误差随着经度大小的变化趋势。

由图 12 可以看出,当纬度在 80°之后经度误差值急速上升达到峰值 0.12,在中低纬度时误差非

常小。

图 13 中纬度差最大值不超过 0.0026°,均值为 0.00174,经度差在高纬处达到 0.11°,平均误差为 0.011417,这是由于经度线在高纬附近密集,同样的绝对距离差在此处被放大,而其它中低纬处差值仍能控制在 0.001°左右。

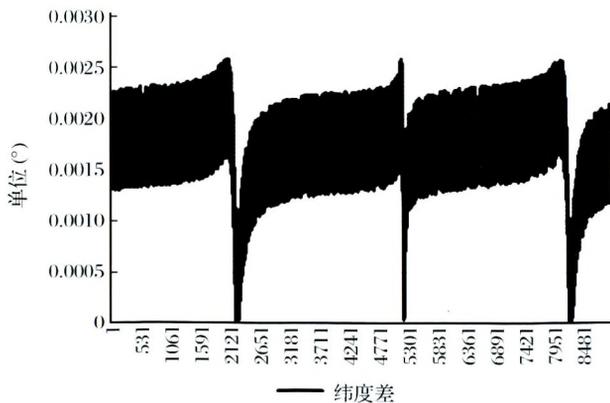


图 11 纬度误差曲线

Fig. 11 Graph of error in latitude

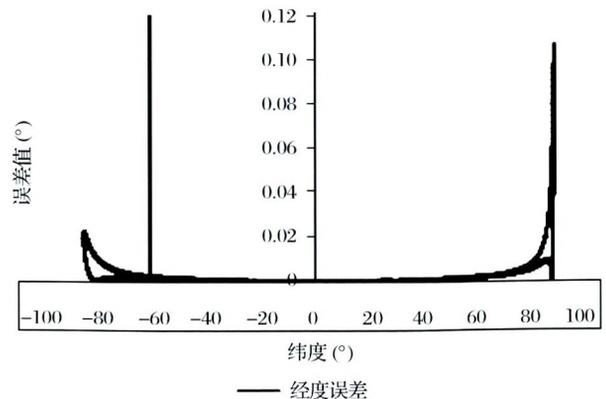


图 12 经度随纬度变化误差曲线

Fig. 12 Errorbar of longitude subject to latitude

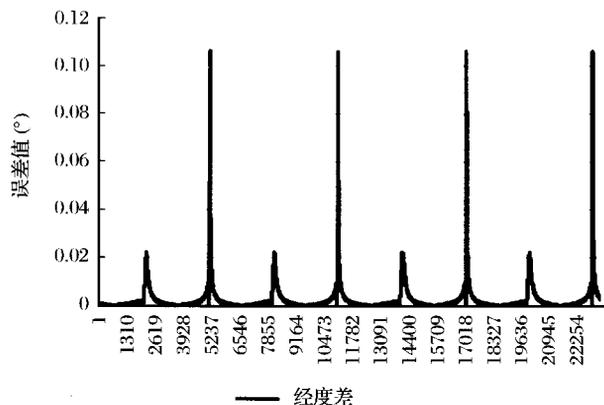


图 13 经度误差曲线

Fig. 13 Errorbar of longitude

## 6 结 语

本文所提出的适用多种传感器的覆盖算法,既考虑了不同传感器类型的成像特点及地球椭圆模型,也引入了滚动、俯仰及偏航等姿态角变化,计算精度较高、普适性强,具有较高的实用价值。在模型中,如何进一步修正相关坐标转换矩阵,解决高纬处经度误差被放大的问题,进一步提高计算精度,这将是下一步重点解决的问题。

### 参考文献:

- [1] Chen Shupeng. Introduction to Geographic Information System[M]. Beijing: Science Press, 1999. [陈述彭. 地理信息系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [2] Xu Qing. Three-dimensional Terrain Visualization Technology[M]. Beijing: Survey and Mapping Press, 2000. [徐青. 地形三维可视化技术[M]. 北京: 测绘出版社, 2000.]
- [3] Wu Xincan. GIS Principles and Methods[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. [吴信才. 地理信息系统原理与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.]
- [4] Nadaoerlige. Study of Adaptive Multi-Resolution Real-time Terrain 3D-Visualization System[M]. Dalian: Dalian University

- of Technology, 2004. [那道尔力格. 具有自适应分辨率的地形三维实时可视化系统研究[M]. 大连: 大连理工大学, 2004.]
- [5] Xia Nanyin. Aerospace Control System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. [夏南银. 航天测控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.]
- [6] Yang Ying. STK in the Computer Simulation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. [杨颖. STK 在计算机仿真中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.]
- [7] Weng Huihui. Remote Sensing Satellites for Coverage Analysis and Simulation[D]. PLA Information Engineering University, A Master's degree thesis, 2006. [翁慧慧. 遥感卫星对地覆盖分析与仿真[D]. 中国人民解放军信息工程大学硕士学位论文, 2006.]
- [8] Zhang Zhanyue. Study on Graphics Display Arithmetic of Spy Satellite's Instantaneous Access Area[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2006, 17(3): 40-44. [张占月. 侦察卫星瞬时覆盖区域图形显示算法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2006, 17(3): 40-44.]
- [9] Tang Hairong, Xiang Maosheng, Zhu Minhui. Study on Systematically Geometric Algorithm of Landsat7 Image[J]. China Journal of Image and Graphics, 2003, 8(9): 1008-1014. [唐海蓉, 向茂生, 朱敏慧. Landsat7 图像系统级几何校正算法研究[J]. 中国图像图形学报, 2003, 8(9): 1008-1014.]
- [10] Yang Daming. Control System of Spacecraft Attitude[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000. [杨大明. 空间飞行器姿态控制系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.]
- [11] Xi Xiaoning, Wang Wei. The Basis of Near-Earth Orbit Spacecraft[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003. [郝晓宁, 王威. 近地航天器轨道基础[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003.]
- [12] Li Dayao. General Solution of Satellite Coverage[J]. Launch Vehicle Technology with the Return, 1999, 1: 19-22. [李大耀. 卫星对地面覆盖区域的通用求解方法[J]. 运载火箭与返回技术, 1999, 1: 19-22.]
- [13] Zhu Huatong, Huang Jiwen. Calculation of the Earth Ellipsoid[M]. Beijing: 81 Press, 2001. [朱华统, 黄继文. 地球大地计算[M]. 北京: 八一出版社, 2001.]

## A Satellite Coverage Computing Model for Multi-sensor

HU Ya-si<sup>1,2</sup>, MENG Xin<sup>2</sup>, LI Li-gang<sup>2</sup>

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Different sensor-viewers require different computing model for land coverage. In order to unify the computing model for different sensor-viewers, a new computing model is proposed to solve the problem. The advantage of the model is universal, fast computing and with high precision. Moreover, the coverage can be described timely with high accuracy. As referenced with STK, the model reaches highly accuracy in the experimental results.

**Key words:** Multi-sensor; Satellite coverage; Computing model