

11-20-2019

Ground Coverage Stitching Simulation Algorithm for Remote Sensing Satellite

Shuhao Liu

Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

Wang Tong

Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

Zhang Yue

Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Ground Coverage Stitching Simulation Algorithm for Remote Sensing Satellite

Abstract

Abstract: Ground coverage stitching is the base of remote sensing satellite mission simulation. A coverage stitching simulation algorithm is proposed, considering big time step and attitude maneuver simulation. *Transient coverage region is computed by light of view intersection and tangent searching methods. Transient coverage boundaries of different simulation times are stitched by two-dimension convex hull algorithm. Between points of the stitched region polygon edges, new vertexes are interpolated.* With the method proposed, limb coverage problem and coverage fusion when time step is large can be solved. Computer simulation results show that the algorithm achieves a fine accuracy and has the ability of supporting remote sensing satellite simulation with long time and large time step.

Keywords

remote sensing satellite, ground coverage, region stitching, payload, mission simulation, convex hull

Recommended Citation

Liu Shuhao, Wang Tong, Zhang Yue. Ground Coverage Stitching Simulation Algorithm for Remote Sensing Satellite[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 648-654.

遥感卫星覆盖拼接仿真算法研究

刘书豪, 王通, 张玥

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 覆盖拼接计算是遥感卫星任务仿真的基础。针对卫星任务仿真中的大角度机动、大步长仿真等情况, 提出了一种卫星覆盖区域拼接仿真算法。利用视线相交方法与切线搜索算法, 计算卫星瞬时覆盖区域; 利用二维凸包算法实现不同仿真时刻覆盖区域的融合; 将融合后的区域边界进行细化。该算法处理了临边覆盖等特殊情况, 能够解决大步长仿真时覆盖区域融合问题。仿真分析表明, 该算法具有较好的计算精度, 能够为遥感卫星长时段大步长任务仿真提供算法支撑。

关键词: 遥感卫星; 对地覆盖; 区域拼接; 载荷; 任务仿真; 凸包

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 04-0648-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0131

Ground Coverage Stitching Simulation Algorithm for Remote Sensing Satellite

Liu Shuhao, Wang Tong, Zhang Yue

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Ground coverage stitching is the base of remote sensing satellite mission simulation. A coverage stitching simulation algorithm is proposed, considering big time step and attitude maneuver simulation. *Transient coverage region is computed by light of view intersection and tangent searching methods. Transient coverage boundaries of different simulation times are stitched by two-dimension convex hull algorithm. Between points of the stitched region polygon edges, new vertexes are interpolated.* With the method proposed, limb coverage problem and coverage fusion when time step is large can be solved. Computer simulation results show that the algorithm achieves a fine accuracy and has the ability of supporting remote sensing satellite simulation with long time and large time step.

Keywords: remote sensing satellite; ground coverage; region stitching; payload; mission simulation; convex hull

引言

在以事件与时间驱动的各类天基系统仿真任务中, 需要计算各类卫星的对地覆盖区域, 并以此为基础, 进一步开展探测、重访等系统

分析^[1-2]。因此卫星覆盖区域仿真是天基系统各类任务仿真的基础。目前覆盖区域的处理可分为网格法和边界点法。网格法将指定区域按照一定的间隔划分为网格点, 将对区域的覆盖问题转化为对各网格点覆盖情况的统计问题^[3], 网格法的算法简单, 适用于对指定区域的统计分析, 但计算精度受网格点间隔影响大, 计算量大, 无法反映卫星实时对地覆盖的情况。边界点法是将卫星的覆盖区域离散为多边形, 用多边形的坐标点集来描述卫星的瞬时覆盖区。边界点法精度高, 适



收稿日期: 2017-03-21 修回日期: 2017-05-13;
基金项目: 国家自然科学基金(61401022);
作者简介: 刘书豪(1986-), 男, 河南驻马店, 硕士, 工程师, 研究方向为卫星总体设计; 王通(1987-), 男, 陕西西安, 博士, 工程师, 研究方向为卫星体系仿真; 张玥(1979-), 女, 吉林长春, 硕士, 高工, 研究方向为卫星总体设计与仿真。

<http://www.china-simulation.com>

用于描述卫星实时覆盖的情况,但应用时有两方面问题需要关注。一方面,采用大步长仿真时,前后仿真步的覆盖区易出现间隙,需要进行拼接。另一方面,当卫星进行姿态机动时,视场可能扫出地球边缘,称为临边覆盖^[4]。

围绕覆盖问题已开展了相关工作。文献[4]推导了地球同步轨道卫星对地进行圆锥旋转扫描与推扫时的覆盖区域模型,并给出了临边覆盖的判定条件,但该方法仅适用于特定载荷类型,对复杂形状的区域覆盖适应性较差;文献[5]基于网格点仿真方法,设计和实现了几种适合于任何瞬时覆盖条件和覆盖区形状的通用网格边界搜索算法,但是该方法对于等间隔网格适应性较好,等面积网格适用性较差;文献[6]将不同时刻下卫星覆盖区投影到二维平面,利用计算几何的思想实现二维平面区域多边形的交、并等操作,从而实现了覆盖区域的融合计算;文献[7]以区域覆盖分析为目标,将卫星实时覆盖区与目标区域进行交、并操作,进而对覆盖百分比、重访等指标进行统计。

从上述文献可发现,研究工作的基本思路是将区域覆盖边界投影至二维平面,将曲面区域转化为平面问题,进而采用多边形交、并操作,实现不同时刻覆盖区域的融合;但是上述方法未充分考虑大步长仿真时区域融合的失真问题,且对临边覆盖情况均没有处理。本文主要面向时间推进仿真计算,考虑通用的载荷视场类型,研究卫星覆盖区域仿真方法。首先利用视线相交方法对卫星载荷瞬时覆盖区域进行建模,利用搜索算法处理临边覆盖情况;然后基于前后两步卫星瞬时覆盖区域,在二维平面上实现多边形区域融合;最后考虑到二维平面向三维曲面转换时的曲率影响,对融合后的二维边界进行插值,以充分反映曲面边界的弯曲程度,从而完成对卫星覆盖区域的计算。

1 考虑临边覆盖的瞬时区域边界点计算

1.1 坐标系定义

(1) 地心惯性坐标系

原点为地心; X 轴在赤道平面内,指向历元 J 2 000 平春分点; Z 轴垂直于赤道面,与地球自转角速度矢量方向一致; Y 轴按右手法则确定。后文中以下标“ I ”代表此坐标系。

(2) 地心固联坐标系

原点为地心; X 轴在地球赤道平面内,指向经度零点方向; Z 轴指向北极; Y 轴按右手法则确定。后文中以下标“ F ”代表此坐标系。

(3) 卫星本体坐标系

卫星本体坐标系固连在卫星上,其原点在卫星质心处。当卫星无姿态偏差时,本体系与轨道系重合,对于对地定向卫星而言, X 轴指向卫星飞行方向, Z 轴指向地心方向, Y 轴与另两轴构成右手直角坐标系。后文中以下标“ B ”代表卫星本体坐标系。

(4) 载荷坐标系

载荷坐标系相对本体坐标系定义,其原点在卫星质心处,令 Z 轴方向为视线方向。当载荷无安装偏差时,载荷坐标系与卫星本体坐标系重合。后文中以下标“ P ”代表载荷坐标系。

1.2 卫星载荷视场边界求取

卫星载荷覆盖其星下点周围一定范围,沿卫星飞行方向在地球表面形成覆盖带。根据载荷类型的不同,一般的视场形状可分为锥形、矩形、线阵等,所有视场的边界均可离散为一组视矢量。通过分别计算该组视矢量与地球表面的交点,即可获得卫星载荷覆盖区的边界。

记构成瞬时视场边界的视矢量集合为 \mathbf{r} , 其中任取一个视矢量 \mathbf{r}_i , 其在载荷坐标系下的坐标可表示为 $(\mathbf{r}_i)_P = (r_{pxi}, r_{pyi}, r_{pzi})^T$; 令载荷坐标系至卫星本体坐标系的转换矩阵为 \mathbf{T}_{B_P} , 该矩阵为 3×3 的坐标转换阵,可根据载荷安装角及载荷相对卫星平台的

运动状态确定;记卫星位置在地固系下的坐标分量为 $(s)_F=(s_{Fx}, s_{Fy}, s_{Fz})^T$,本体坐标系相对地心惯性坐标系的姿态四元数为 q ,则可求得卫星本体坐标系至地心惯性坐标系的坐标转换矩阵,记为 T_{1_B} ;根据卫星所处的飞行时刻,可获得惯性系相对地固系的坐标转换阵,记为 T_{F_1} ;基于以上信息,可求得视矢量 r 在地固系下的投影 $(r)_F=(r_{Fxi}, r_{Fyi}, r_{Fzi})^T$:

$$(r)_F = T_{F_1} \cdot T_{1_B} \cdot T_{B_P} \cdot (r)_P$$

进而可获得由卫星出发的视线方程:

$$\frac{x - s_{Fx}}{r_{Fxi}} = \frac{y - s_{Fy}}{r_{Fyi}} = \frac{z - s_{Fz}}{r_{Fzi}} \quad (1)$$

考虑地球扁率的椭球模型为:

$$\frac{x^2 + y^2}{R_e^2} + \frac{z^2}{R_p^2} = 1 \quad (2)$$

式中: R_e 为地球赤道半径; R_p 为地球极半径。联立视线方程与地球椭球方程共3个方程,可得到该视线与地球椭球的交点 P ,求得的解为点 P 在地固系下的坐标值。通常情况下交点 P 会存在两个解,选择距离卫星最近的解即可。

对视矢量集合内的各视线依次按照上述方法进行求解,可得卫星瞬时视场边界点集 P 。

1.3 临边覆盖的地球切点搜索算法

如果卫星存在大角度机动的情况,对于中高轨遥感卫星,很容易出现视场扫出地球的情况。此时对地覆盖的边界点应为视线方向与地球椭球相切的点。椭球切线的计算方法较为复杂,本文给出一种基于二分搜索的切点求解策略。算法将根据视线、角平分线与地球的交点关系,不断缩小搜索区间,最终获得与地球交点数量为1的空间直线,该直线与地球的交点即为切点。具体过程如下:

(1) 已知视线矢量 $(r_0)_F=(r_{0Fx}, r_{0Fy}, r_{0Fz})^T$ 与地球椭球无交点;

(2) 构造矢量 $(v_0)_F=(v_{0Fx}, v_{0Fy}, v_{0Fz})^T$ 与 $(v_1)_F=(-s_{Fx}, -s_{Fy}, -s_{Fz})^T$,其中 $(s)_F=(s_{Fx}, s_{Fy}, s_{Fz})^T$ 为卫星位置在地固系下的坐标分量;易知,矢量 v_1 必与地球有2个交点;

(3) 构造矢量 $v_2=(v_0+v_1)/2.0$,建立从卫星坐标点出发、方向与矢量 v_2 平行的直线,并计算该直线与地球的交点,记交点个数为 n ;

(4) 如果 $n=2$,则令 $v_1=v_2$,然后重复第3步;否则继续;

(5) 如果 $n=0$,则令 $v_0=v_2$,然后重复第3步;否则继续;

(6) 如果 $n=1$,则该交点即为卫星视线与地球边界的切点,算法退出。

上述过程如图1所示。在实际计算过程中, $n=1$ 的情况很难出现,通常如果空间直线与地球的两个交点距离小于阈值,就可以认为该直线是地球切线。根据经验,阈值设为10 m时,该搜索算法可在4~6次迭代后收敛。

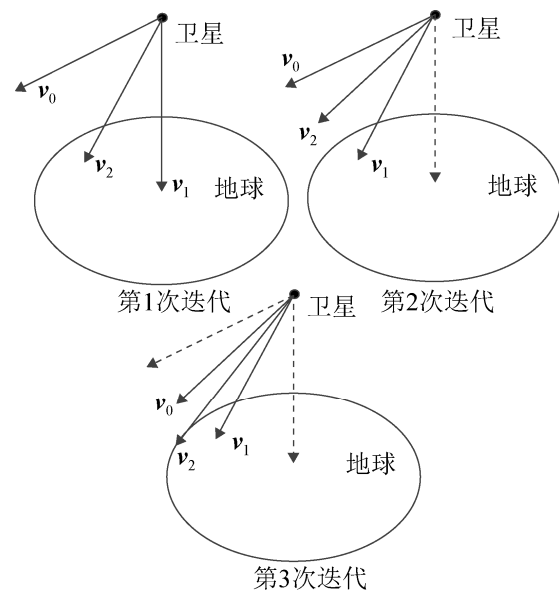


图1 切线搜索

Fig. 1 Tangent searching

1.4 边界三维坐标转化为二维坐标

上述过程可求得卫星瞬时覆盖区域的三维边界坐标点,本文通过地理经纬度转换的方式,将三维曲线点坐标转换为二维平面上,以方便后续对多边形的处理。转换算法可参考相关文献,不再赘述。

2 瞬时覆盖区的融合与细化

在实际仿真系统运行过程中, 根据每个步长卫星的位置、姿态、视场方向等, 可以计算各仿真时刻对应的瞬时覆盖区, 区域简化为二维平面上的多边形区域, 多边形的顶点坐标由边界点的经纬度值定义。进而在二维平面上对各瞬时覆盖区进行融合计算, 可以获得指定时间段内的覆盖区域。

2.1 基本约定与经度预处理

本文后续将会用到如下基本约定: 卫星瞬时对地覆盖的经度跨度不超过 90° 。根据遥感卫星的工程设计情况, 此约定可以满足。此约定对于不在极区成像的卫星具有适用性, 主要用于减少经度处理的复杂性。

在进行区域融合前, 首先需要对数据进行预处理, 其主要操作是统一经度的定义范围。在实际执行观测任务时, 经常会出现视场跨过 180° 经线的情况, 此时如果按照 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 的经度范围进行取值, 会引发后续区域融合的处理异常。基于 2.1 节的约定, 可以采用如下的简化处理方法: 计算区域边界点经度的最大值与最小值, 分别记为 l_{\max} 和 l_{\min} ; 如果 $l_{\max} - l_{\min} < 180^\circ$, 则认为该区域未跨过 180° 经线, 无须处理; 否则, 将所有经度值均转换至 $[0^\circ, 360^\circ]$ 范围内。

2.2 多边形区域融合

多边形区域融合问题可以简化为对多个多边形点的凸包边界求取问题。本文利用 Graham 扫描算法实现区域融合。该算法实质是寻找可包含瞬时覆盖区域的最小凸包, 以此作为融合后的曲域。其

算法过程分为幅角排序和幅角扫描两步。

第一步: 幅角排序, 将前后两个仿真步长内覆盖边界点形成集合, 记为点集 P , 该点集的个数为 m 。首先选取平面上 Y 轴坐标最小的点, 若这样的点有多个, 则选取这些点中 X 轴左边最小的点, 并把该点记为 P_0 。之后把 P_0 点作为坐标原点构造新的坐标系, 对点集 P 中的其他点进行坐标变换。对于坐标变换后的点, 以 P_0 为坐标原点, 计算其余点在极坐标下的幅角。然后把 P 中除 P_0 以外的点按降序的顺序排序, 若包含两个或两个以上的点幅角的大小相同, 优先选取最接近 P_0 的点。记排序之后的点的集合为 $P_{\text{sorted}} = \{P_1, P_2, \dots, P_{m-1}\}$, 其中 P_1 和 P_{m-1} 分别表示与 P_0 构成的幅角最小值和最大值。

第二步: 幅角扫描。初始化堆栈 $H_s(P_{\text{sorted}}) = \{P_0, P_1\}$, P_1 为栈顶的元素。然后按照极坐标幅角从小到大开始扫描, 即从 P_0 开始扫描直到 P_{m-1} 结束。若在某一时刻, 堆栈中的元素为 $H_s(P_{\text{sorted}}) = \{P_0, P_1, \dots, P_i, P_j, P_k\}$, 栈顶元素为 P_k , 则有栈中的元素依次构成一个封闭的凸多边形。设某一时刻扫描的点为 P_l , 若 P_j, P_k, P_l 构成一个左旋的路径, 则此时 $P_k P_l$ 将构成凸多边形中的一条边, 把 P_l 压入堆栈中, 接着扫描下一点; 若 P_j, P_k, P_l 三点构成的一条右旋的路径, 则 P_k 为凹包内的点, 将 P_k 从堆栈中弹出, 此时扫描仍在 P_l 处, 接着对 P_i, P_j, P_l 三个点进行处理和判断, 直到确定当前栈中的点为一个凸多边形的顶点为止。算法过程如图 2 所示。可以得到融合后的凸包边界点集, 记为点集 P_{hull} 。

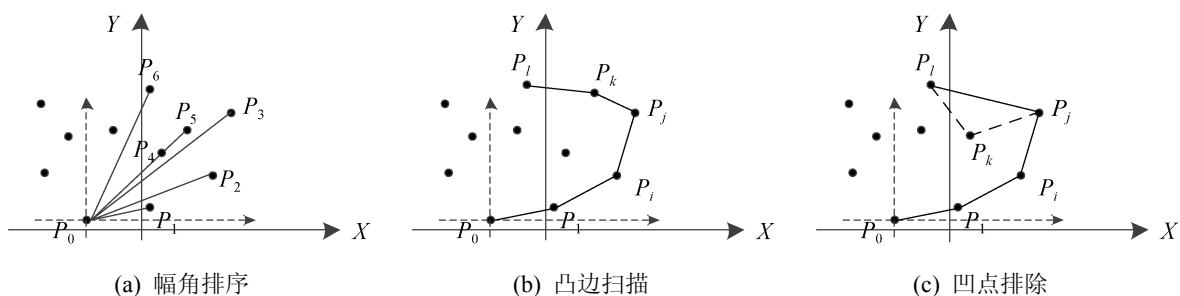


图 2 Graham 扫描
Fig. 2 Graham scanning

<http://www.china-simulation.com>

2.3 凹点删除

卫星对地覆盖经常会出现凹区域。这里考虑一般情况,如图3所示,其中黑线与绿线围成的区域分别为仿真前后两步得到的瞬时覆盖边界,当采用2.3节进行区域融合后,得到的为红色线段围成的凸多边形。根据文献[6]的凹点搜索算法,可得凹区域为图3中所示的阴影区域。其中区域a为原区域对应的凹块,区域b、c为拼接后得到的凹块。可以认为区域b、c是卫星载荷所扫过的区域,可以被卫星覆盖到,因此这两个区域保留,仅将区域a从红色围成的凸多边形中删去,得到新的覆盖边界,即图3中所示的多边形ABCDEF。

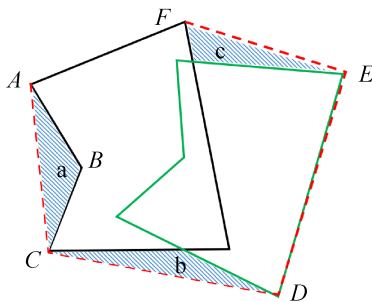


图3 凹点删除
Fig. 3 Concave deletion

在算法实现中,可判断组成凹区域的边界点是否属于同一瞬时覆盖边界,如果是,则删除该区域;否则,保留该区域。

2.4 区域边界插值

上述区域融合计算,将不同的覆盖区域通过线段进行了直接连接,这样的处理方式对于小步长仿真可以保持计算精度,但是对于大步长仿真,特别是对高纬度地区覆盖计算时,易引起失真,可能会对仿真系统的其他计算环节产生不利影响。此现象主要是由地球曲率引起。为此,在间隔较大的边界点中插入新的边界点,以细化区域边界,充分反映地球曲率的影响。

本文采用的方法如下:依次计算相邻边界点 P_i 、 P_j 的经度差,如果差值超过阈值,则在两点间依次插入边界点,所插入的点与 P_i 、 P_j 均处于同一

个大圆弧上,插入点的个数由经度差与阈值决定。具体算法如下:

- (1) 记 P_i 、 P_j 点的经度分别为 lon_i 、 lon_j ; 经度阈值为 Δ ,不失一般性,假设 $lon_i < lon_j$;
- (2) 计算差值点个数 $n = \text{int}((lon_j - lon_i) / \Delta)$,其中 int 为取整运算;
- (3) 依次计算所有插值点,其中第 k 个插入的坐标点经度为 $lon_k = lon_i + k \times \Delta$; 然后根据 P_i 、 P_j 两点间的大弧,计算大弧上经度为 lon_k 的点 P_k 。

经过上述处理后得到的点集即为最终的区域边界。

3 仿真验证与分析

为了验证本文算法的有效性,本节根据我国卫星的常见视场类型,选取了两个典型场景进行仿真,每个场景均采用大步长拼接、小步长密集仿真两种模式运行,然后对两种运行模式下的仿真结果进行对比,以此验证拼接算法的有效性。场景涵盖临边覆盖、高纬度地区覆盖、不同视场形状等。

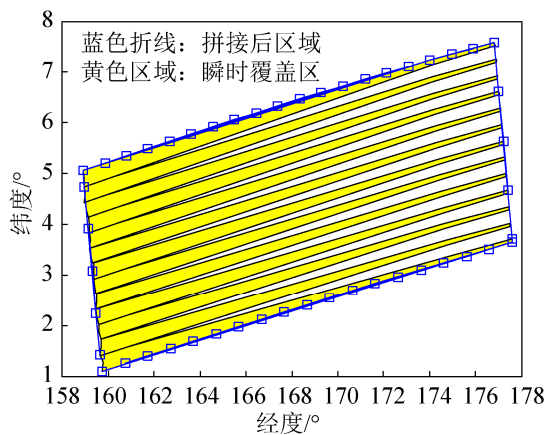
场景1:仿真开始时刻为UTC时间2007-07-01 T12:00:00,卫星初始轨道参数如表1所示。卫星绕滚动轴滚转 50° ;星上装载矩形载荷,视场大小为 $25 \times 0.5^\circ$,此类视场可以模拟近地遥感卫星侧摆观测。仿真初始时刻开始开机,持续1 min。根据以上设置,仿真中将出现临边覆盖情况。

表1 卫星轨道要素
Tab. 1 Satellite orbit elements

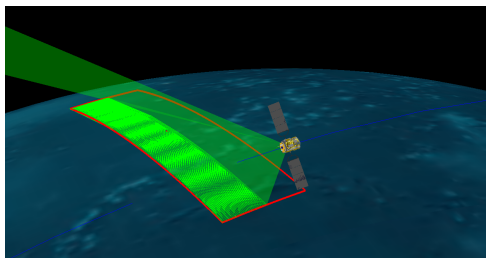
名称	数值
UTC 历元时刻	2007-07-01 T12:00:00
半长轴	6 778.1 km
偏心率	0
轨道倾角	97.0346°
近地点幅角	0°
升交点赤经	279.066°
平近点角	0°

本文采用大小步长数据对比分析、STK 仿真等方法,对拼接算法有效性进行验证。大小步长仿真对比结果如图4(a)所示;其中黄色区域为5 s步

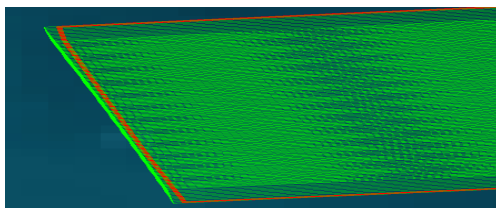
长得到的各时刻瞬时覆盖区; 蓝线围成的区域是采用本文算法, 在 60 s 步长下得到的拼接覆盖区。STK 对比结果如图 4(b)、图 4(c)所示, 图中绿色填充区为 STK 瞬时视场推扫结果, 红色边框为大步长拼接后的覆盖区, 图 4(c)进行了局部放大, 可以看到在扫出地球边界线计算上存在一定偏差。



(a) 不同步长下仿真数据对比



(b) 与 STK 对比



(c) STK 结果局部放大

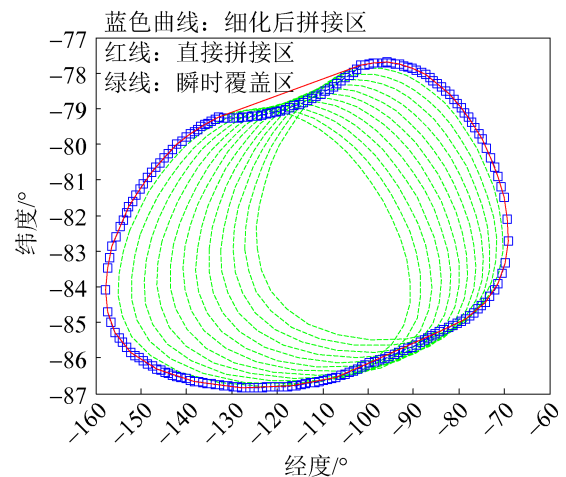
图 4 场景 1 卫星覆盖区域

Fig. 4 Satellite coverage in the 1st scenario

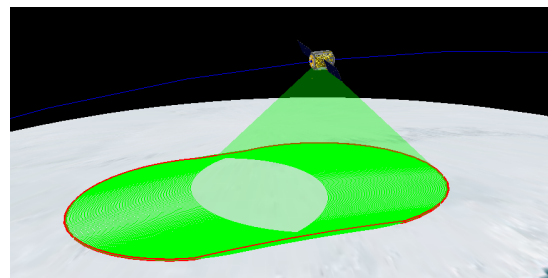
从图 4 中可看到, 本文算法较精确地完成了大步长区域拼接计算, 仅在卫星扫出地球的边界上存在一定的计算误差。进一步, 将覆盖区近似为一个四边形区域, 利用 STK 提供的测量工具, 得到图 4(b)中的绿色填充区的长和宽分别为 2 019.63 km、440 km, 本文算法得到的区域宽度与 STK 基本一

致, 长度为 2 002.54 km², 面积偏差在 0.9%以内。

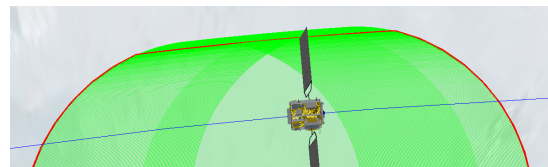
场景 2: 仿真开始时刻为 UTC 时间 2007-07-01 T14: 40: 00, 卫星初始轨道参数同表 1; 卫星保持三轴稳定姿态, 星上载荷改为锥形视场, 半锥角为 45°, 此类视场可以模拟电子侦察卫星等视场; 根据仿真设置, 在仿真开始时卫星将飞抵南纬 80°附近上空。同样采用大小步长数据对比分析、STK 仿真等方法, 结果如图 5 所示。



(a) 不同步长下仿真数据对比



(b) 与 STK 对比



(c) STK 结果局部放大

图 5 场景 2 卫星覆盖区域

Fig. 5 Satellite coverage in the 2nd scenario

大小步长仿真对比结果如图 5(a)所示; 绿色虚线为小步长仿真得到的各时刻瞬时覆盖区; 蓝色块围成的区域是采用本文算法得到的区域边

界。STK 对比结果如图 5(b)、图 5(c)所示, 其中图 5(b)绿色填充区为 STK 瞬时视场推扫结果, 红色边框为大步长拼接后的覆盖区; 图 5(c)为侧边局部放大图, 可以看到在扫出地球边界线计算上存在一定偏差。

上述偏差主要由于仿真计算中对圆形边界按照等间隔进行离散, 导致凸包融合时产生了部分失真。将图 5 所示覆盖区简化为两个半圆与一个四边形相加, 并利用 STK 测距工具, 可估算图 4(b)中的绿色填充区面积为 $1\,314\,999\text{ km}^2$, 本文算法得到的区域面积为 $1\,297\,369\text{ km}^2$, 面积计算偏差 1.3%。

综合上述分析, 本文算法对不同视场形状、不同纬度覆盖以及大步长仿真等具有较好的适应性。

4 结论

本文综合切线搜索、区域融合等多种算法, 对覆盖拼接问题进行了研究。为验证算法的有效性, 选取了典型场景进行仿真, 场景涵盖临边覆盖、高纬度地区覆盖、不同视场形状等情况。仿真结果发现, 本文算法具有较好的计算精度, 能够支持我国在轨、在轨遥感卫星长时期、大步长任务仿真, 已在多个仿真系统中得到了应用。需要说明的是, 文中引入了部分约定与假设, 对于跨南北极点等问题的处理尚有待改进, 后续将对更复杂的覆盖拼接情况进行研究, 以适用于更广泛的领域。

参考文献:

- [1] 余婧, 喜进军, 于龙江, 等. 敏捷卫星同轨多条带拼幅成像模式研究[J]. 航天器工程, 2015, 24(2): 27-34.
Yu Jing, Xi Jinjun, Yu Longjiang, et al. Study of One-orbit Multi-stripes Splicing Imaging for Agile Satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(2): 27-34.
- [2] 巫兆聪, 杨帆, 王楠. 不同类型遥感传感器对地覆盖区域仿真与计算[J]. 应用科学学报, 2015, 33(1): 1-8.
Wu Zhaocong, Yang Fan, Wang Nan. Coverage Area in Different Types of Remote Sensors Simulation and Calculation[J]. Journal of Applied Sciences, 2015, 33(1): 1-8.
- [3] 沈夏炯, 吴晓洋, 王更科, 等. 面向任意几何区域的遥感卫星对地覆盖法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(7): 1999-2002.
Shen Xiajiong, Wu Xiaoyang, Wang Gengke, et al. Remote Sensing Satellite Covering Method Over Ground Facing to Any Geometric Area[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(7): 1999-2002.
- [4] 钟宇, 吴晓燕, 黄树彩. 红外预警卫星对地覆盖区域近似计算模型[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(11): 2133-2137.
Zhong Yu, Wu Xiaoyan, Huang Shucui. Approximate Computing Model for Ground Coverage Region of Infrared Early Warning Satellites[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(11): 2133-2137.
- [5] 贺勇军, 戴金海. 多卫星非规则覆盖区域的通用求解算法[J]. 计算机仿真, 2005, 22(12): 24-27.
He Yongjun, Dai Jinhai. General Algorithms for Searching the Irregular Earth Coverage Regions of Multi-Satellite Systems[J]. Computer Simulation, 2005, 22(12): 24-27.
- [6] 白萌, 李大林, 陈梦云. 卫星对地覆盖区域的融合算法研究[C]// 第二十三届全国空间探测学术交流会议论文集. 厦门: 中国空间科学学会, 2010: 153-156.
Bai Meng, Li Dalin, Chen Mengyun. Stitching Algorithm for Satellite Ground Coverage Region[C]// Proceedings of the 23rd China Space Exploration Conference. Xiamen: China Space Science, 2010: 153-156.
- [7] 汪荣峰. 基于多边形布尔运算的卫星区域覆盖分析算法[J]. 装备学院学报, 2016, 20(2): 83-87.
Wang Rongfeng. Analysis Algorithm for Satellite Regional Coverage Based on Polygonal Boolean Operation[J]. Journal of Equipment Academy, 2016, 20(2): 83-87.
- [8] 胡雅斯, 孟新, 李立钢. 适用多传感器的卫星对地覆盖计算模型[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(4): 537-542.
Hu Yasi, Meng Xin, Li Ligang. A Satellite Coverage Computing Model for Multi-Sensor[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(4): 537-542.
- [9] 曾德林. 快速响应小卫星星座设计及覆盖性能仿真分析[J]. 计算机仿真, 2014, 31(6): 73-77.
Zeng Delin. Design of Operationally Responsive Small Satellite Constellation and Simulation Analysis of Coverage Ability[J]. Computer Simulation, 2014, 31(6): 73-77.
- [10] 宋志明, 戴光明, 王茂才, 等. 卫星星座区域覆盖问题的快速仿真算法[J]. 航天控制, 2014, 32(5): 65-70.
Song Zhiming, Dai Guangming, Wang Maocai, et al. The Fast Simulation Algorithm for Solving Area Coverage Problem of Satellite Constellation[J]. Aerospace Control, 2014, 32(5): 65-70.