



## 基于扫描线的卫星区域覆盖分析算法

汪荣峰, 胡 敏

(航天工程大学 航天指挥学院, 北京 101416)

**摘 要:** 针对传统网格点法评估卫星区域覆盖性能时运算量大且效率低的问题, 提出一种改进的卫星区域覆盖分析算法。在卫星覆盖带多边形生成和目标区域包围盒网格划分的基础上, 基于经度方向的网格点构造扫描线, 将扫描线与目标区域的相交部分作为初始计算对象, 通过初始计算对象与覆盖带多边形的求交实现扫描线的分段划分, 统计扫描线分段数据得到覆盖率、覆盖重数等指标。算例分析结果表明, 该算法具有较低的时空复杂度, 当网格数量超过 80 万时, 运算时间仅为传统网格点法的 1.19%。

**关键词:** 区域覆盖分析; 扫描线; 卫星; 覆盖率; 网格点法

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



**中文引用格式:** 汪荣峰, 胡敏. 基于扫描线的卫星区域覆盖分析算法[J]. 计算机工程, 2020, 46(1): 243-246, 254.

**英文引用格式:** WANG Rongfeng, HU Min. Algorithm for satellite regional coverage analysis based on scanline[J]. Computer Engineering, 2020, 46(1): 243-246, 254.

## Algorithm for Satellite Regional Coverage Analysis Based on Scanline

WANG Rongfeng, HU Min

(School of Aerospace Command, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China)

**[Abstract]** To address heavy and inefficient computations caused by traditional grid point-based regional coverage analysis of satellites, this paper proposes an improved algorithm for regional coverage analysis of satellites. After the coverage band polygon of the satellite is generated and the bounding box of the target region is divided into grids, the scanlines are constructed with grid points on the lines of longitude. The proposed method takes the intersection of scanlines and the target region as initial computational object, and calculates the intersection of the initial computational object and the coverage band polygon to segment scanlines. The data of segmented scanlines are analyzed to obtain indicators including the coverage rate and the number of repeated coverage. Analysis results of the example show that the proposed algorithm reduces the time complexity and space complexity, demanding only 1.19% of computing time of the traditional grid point method when the number of grids exceeds 800 000.

**[Key words]** regional coverage analysis; scanline; satellite; coverage rate; grid point method

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0052763

### 0 概述

卫星区域覆盖分析广泛应用于卫星任务规划<sup>[1]</sup>、成像侦察<sup>[2]</sup>等航天任务中。卫星区域覆盖分析指标<sup>[3]</sup>包括覆盖重数、面积覆盖百分比、覆盖累积面积、时间覆盖百分比、最大重访时间及平均重访时间等, 其中面积覆盖百分比(覆盖率)在很多应用中是核心指标。

卫星区域覆盖分析方法主要包括解析法、基于几何运算的方法和网格点法。解析法<sup>[4]</sup>基于卫星与地球的几何关系直接得到覆盖面积计算的解析公

式, 只适用于单颗卫星且目标区域包含卫星覆盖范围的情况。基于几何运算的方法<sup>[5-7]</sup>在经纬度平面上利用多边形布尔运算计算覆盖指标, 其中, 文献[5]算法只适用于卫星瞬时覆盖, 文献[6]算法的通用性和效率更高。卫星区域覆盖分析的经典算法是数值仿真的网格点法<sup>[8]</sup>, 该方法实现简单, 但计算量大、空间复杂度高、计算结果精度受网格大小影响, 文献[9-10]均直接采用网格点法。为提高网格点法的效率, 研究者对原始的网格点法进行改进, 其中, 文献[11]利用网格点的空间相关性和边界特征,

**基金项目:** 国家自然科学基金(61403416)。

**作者简介:** 汪荣峰(1973—), 男, 副教授, 主研方向为空间态势可视化与分析技术; 胡 敏, 副教授、博士。

**收稿日期:** 2018-09-27    **修回日期:** 2019-01-06    **E-mail:** wrfly@163.com

提出“池中投石法”“油环点火法”和“逐步吸收法”3种优化技术,文献[12]对网格点的卫星覆盖时刻集进行优化,文献[13]提出经度条带法,对每个条带应用解析方法。

网格点法的效率瓶颈为卫星采样点与网格点覆盖关系计算次数多,且网格点信息记录次数多。针对以上问题,本文算法通过扫描线与覆盖带多边形求交,将逐采样点、网格点计算优化为一次处理一个覆盖条带和一行网格点,并把扫描线划分为具有相同覆盖属性的分段,省略了网格点信息记录过程。

## 1 基于网格点的扫描线构造与数据维护

### 1.1 网格点法原理

网格点法的基本原理是:在经纬度平面上根据目标区域的包围盒划分网格,有等经纬度网格和等面积网格2种划分策略<sup>[14]</sup>,以网格中心点代表网格进行计算;按给定步长计算卫星采样点,计算并记录卫星采样点对网格点的覆盖情况;通过统计网格点覆盖信息得到覆盖指标,如覆盖网格点数除以总网格点数得到覆盖率。

算法需判断每个卫星采样点与网格点的位置关系,同时记录每个网格点的覆盖信息,因此时空复杂度均较高。

### 1.2 扫描线及其数据结构

扫描线是计算机图形学中的经典技术<sup>[15]</sup>,其基于目标区域的剖分网格定义扫描线,并利用扫描线实现卫星区域覆盖指标的快速计算。

如图1(a)所示,目标区域按等面积原则进行网格划分(实际空间大小接近,经纬度平面不均匀,纬度越高,网格越大),其中A、a、b等圆点为网格中心点。每行内各网格大小相同,网格中心点纬度值相同,构成水平扫描线,如图1(a)中1、2、3所指示的水平线。

扫描线划分为互不重叠的段,如图1(a)中扫描线2分为ab、cd、ef3个段。段数据结构定义为:

```
struct Seg{
    int x0,x1;
    vector<int> satellites;
    vector<time> times;};
```

其中包括几何和覆盖属性2类信息。以端点表示段几何信息,端点采用整型数据类型,以避免导致过细的段划分。覆盖属性包括覆盖卫星及覆盖时间,每个段的覆盖属性一致,可有多卫星覆盖段或同一卫星多次覆盖段。

每条扫描线由不重叠且坐标值由小到大的有序Seg数组构成,所有扫描线数据再组织为数组。如图1(b)所示,目标区域在纬度被划分为100行,采用100个元素的数组存储。其中扫描线50共有200个网格点,被分为3段,网格点50~80被Sat0覆盖,网格点110~130同时被Sat0和Sat1覆盖,网格点150~170被Sat1在不同时间进行2次覆盖。

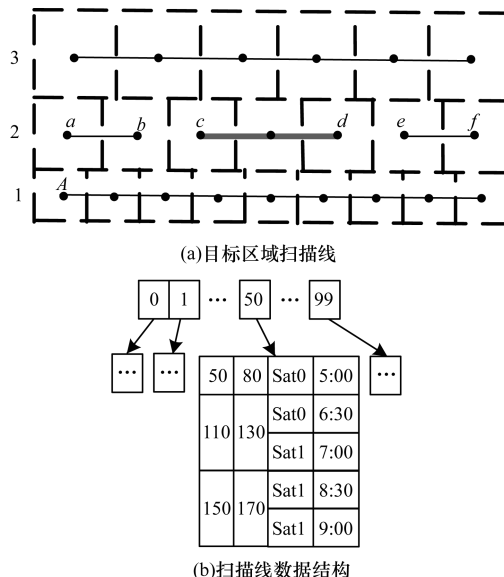


图1 目标区域网格的扫描线及其数据结构

Fig.1 Scanline of the target area grid and its data structure

### 1.3 扫描线数据维护方法

扫描线段数组初始为空,计算过程中不断插入新段,插入过程需保持数组中段不重叠、有序。

在插入新段时,按序判断与原有各段关系并进行处理,如图2所示,新插入段cd与已有段ab有5种位置关系:1)cd全部位于ab左侧,将cd插入到段数组ab之前;2)cd部分位于ab左侧、部分位于ab之间,从数组中删除ab段,将ca段(覆盖属性同cd)、ad段(覆盖属性为ab合并cd)、db段(覆盖属性同ab)插入数组;3)cd全部位于ab之间,从数组中删除ab段,将ac段(覆盖属性同ab)、cd段(覆盖属性为ab合并cd)、db段(覆盖属性同ab)插入数组;4)cd部分位于ab之间、部分位于ab右侧,从数组中删除ab段,将ac段(覆盖属性同ab)、cb段(覆盖属性为ab合并cd)插入数组,构造bd段(覆盖属性同cd),继续将其与数组中后续段进行处理;5)cd全部位于ab右侧,继续将其与数组中后续段进行处理。在上述过程中,需避免段之间重叠,如假设第2)种情况a点坐标为10,则形成的新段范围为(c,9)、(10,d)。

c da b c a d b a c d b a c b d a b c d

图2 待插入段与已有段的位置关系

Fig.2 Relationships between positions of the segment to be inserted and the existing segment

## 2 卫星区域覆盖分析算法

本文算法步骤具体如下:

**步骤1** 计算目标区域包围盒并进行网格划分,得到各扫描线纬度值和经度范围。如图3所示,目标区域为ABCDEFGH,根据其包围盒进行网格划分。

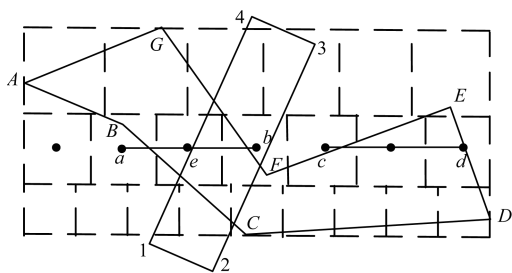


图3 卫星区域覆盖分析算法原理

Fig.3 Principle of the satellite regional coverage analysis algorithm

**步骤2** 扫描线与目标区域求交, 相交部分作为初始计算对象, 参与后续计算。在图3中, 第2条扫描线与区域求交结果为  $ab$ 、 $cd$ , 将其作为初始计算对象。

**步骤3** 计算卫星覆盖在经纬度平面的投影, 得到覆盖带多边形, 如图3中多边形1234所示。

**步骤4** 对于每条扫描线, 计算所有覆盖带多边形与初始计算对象的交, 并根据卫星信息构造段数据结构, 插入扫描线段数组中。在图3中,  $ab$  与覆盖带相交结果为  $eb$ , 根据卫星信息构造 Seg 数据结构, 插入第2行扫描线的段数组中。

**步骤5** 遍历所有扫描线的所有段, 统计满足条件的覆盖网格数。在图3中, 如  $eb$  段满足统计条件, 覆盖网格数为  $b - e + 1$ 。在计算总覆盖率时, 所有段均满足要求, 以网格点数除以总网格点数得到总覆盖率。

在本文算法中, 以段代表其上所有网格点, 几何运算本身决定了段与其网格点具有相同的覆盖关系, 与直接计算网格点相比不会发生错判。

### 3 算法实现中的关键技术

#### 3.1 覆盖带多边形生成

根据上文算法步骤生成目标区域过境时间范围内的覆盖带多边形。每个卫星采样点对应2个覆盖带边界点, 计算卫星采样点位置和覆盖角所确定射线与地球表面的交点, 根据交点坐标计算经纬度。在图4中,  $A$ 、 $a$ 、 $B$ 、 $b$  等点为覆盖带边界点。

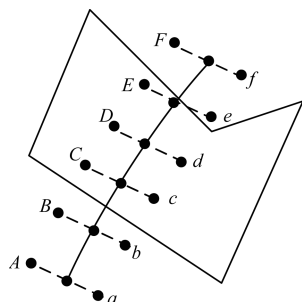


图4 覆盖带多边形生成过程

Fig.4 Generation process of coverage band polygons

覆盖带多边形生成算法的伪代码如下:

```
generateCoveragePolygon{
  for( 每个卫星采样点 ) {
    if( 采样点连线与目标区域有交 ) {
      if( 无已构造覆盖多边形 ) {
```

```
        构造点表 lpts 和 rpts;
        并将前一组边界点输出到点表中; }
    将边界点分别输出到两点表中; }
    else if( 点表不空 ) {
      边界点输出到两点表,
      合并两点表为多边形并输出; } } }
```

在图4中,  $Aa$ 、 $Bb$  与目标区域无交, 不必处理;  $Cc$  与目标区域有交, 需将  $BC$  输出到点表 lpts 中,  $bc$  输出到点表 rpts 中; 依次处理, 将  $DE$  加入到 lpts,  $de$  加入到 rpts 中;  $Ff$  不再与目标区域相交, 将  $Ff$  分别输出到两点表, 此时 lpts 中为  $BCDEF$ , rpts 中为  $bcdef$ , 合并点表, 得到覆盖带多边形  $bcdefFEDCB$ 。

#### 3.2 扫描线与多边形求交

在本文算法中, 扫描线需与目标区域多边形和覆盖带多边形求交, 具体步骤如下:

**步骤1** 计算扫描线所在水平直线与多边形的所有交点并排序。如图5所示, 对应扫描线  $AB$  到  $KM$  的交点集合分别为  $\{1, 2, 3, 4\}$ ,  $\{5, 6\}$ ,  $\{7, 8\}$ ,  $\{9, 10\}$ ,  $\{11, 12\}$ ,  $\{13, 14\}$ 。

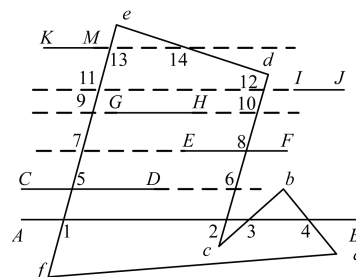


图5 扫描线与多边形的求交过程

Fig.5 Intersection process of scanlines and polygons

**步骤2** 处理扫描线起点。若起点位于所有交点右侧, 则清空交点集合, 转步骤4, 如图5中的扫描线  $IJ$ ; 若起点位于所有交点左侧, 则转步骤3, 如图5中的扫描线  $AB$ 、 $CD$ 、 $KM$ ; 否则, 将起点插入到交点数组, 并删除起点左侧所有交点, 如图5中的扫描线  $GH$  交点集合变为  $\{G, 10\}$ 。此时, 交点集合变为  $\{1, 2, 3, 4\}$ ,  $\{5, 6\}$ ,  $\{E, 8\}$ ,  $\{G, 10\}$ ,  $\{13, 14\}$ 。

**步骤3** 处理扫描线终点。若终点位于所有交点左侧, 则清空交点集合, 转步骤4, 如图5中的扫描线  $KM$ ; 若终点位于所有交点右侧, 则转步骤4, 如图5中的扫描线  $AB$ ; 否则, 将终点插入到交点数组, 并删除终点右侧所有交点, 如图5中的扫描线  $GH$  交点集合变为  $\{G, H\}$ 。此时, 交点集合变为  $\{1, 2, 3, 4\}$ ,  $\{5, D\}$ ,  $\{E, 8\}$ ,  $\{G, H\}$ ,  $\{13, 14\}$ 。

**步骤4** 交点数组中每2个交点形成一个输出段, 图5中输出段为  $12$ 、 $34$ 、 $5D$ 、 $E8$ 、 $GH$ 。

### 4 算法精度、效率及算例分析

#### 4.1 算法精度分析

网格点法以网格点代表目标区域, 计算结果存在误差, 精度取决于网格大小(网格点距离)和卫星采样频率, 网格点和卫星采样点越密, 精度越高。

多星区域覆盖分析计算本身无解析解,现有研究大多以网格点法随网格缩小所逼近的值作为分析依据,如将每千米的经线数作为计算精度,其实质仍是网格越密,精度越高。

本文算法以段代表包含的网格点,对于每个网格点的判断与网格点法一致,因此精度与网格点法一致,影响因素是扫描线间距(扫描线基于网格点定义,间距与网格点密度一致)和卫星采样点密度。

#### 4.2 算法效率分析

本文算法通过覆盖带多边形过滤未过境卫星采样点,传统网格点法也可通过其他技术进行过滤,因此假定 2 种算法都仅能计算过境时间范围采样点。

设卫星过境次数为  $k$ ,过境采样点数与步长、区域大小等有关,设为常数  $c$ 。目标区域网格数设为  $m$  行  $n$  列。

在传统网格点法中,采样点与网格点覆盖关系判断时间复杂度为  $O(ckmn)$ ,网格点信息记录时间复杂度也为  $O(ckmn)$ (每个网格点需多次记录信息)。每个网格点都需记录信息,因此空间复杂度为  $O(mn)$ 。

本文算法扫描线与覆盖多边形相交计算时间复杂度为  $O(km)$ ,如基于覆盖多边形顶点数分析的时间复杂度为  $O(ckm)$ ,但此时基本计算是坐标比较,效率远高于网格点法中的覆盖判断。扫描线处理过程中需插入新段,段数最大与过境次数相等,因此插入新段的时间复杂度为  $O(k)$ ,一行扫描线处理段的时间复杂度为  $O(k^2)$ ,全部扫描线处理段的时间复杂度为  $O(mk^2)$ 。因此,总的时间复杂度为  $O(ckm) + O(mk^2)$ 。一般应用中  $k$  值远小于  $n$ ,  $O(ckm) + O(mk^2)$  远优于网格点法的  $O(ckmn)$ 。由于扫描线采用整型数据类型定义段,在极端情况  $k > n$  时,段数不超过  $n$ ,此时算法时间复杂度为  $O(ckm) + O(mkn)$ ,效率仍远优于网格点法。本文算法空间复杂度取决于段的数量,为  $O(mk)$ ,但  $k > n$  时算法空间复杂度会限制在  $O(mn)$  内。

#### 4.3 算例分析

通过网格点法<sup>[8]</sup>、文献[12]算法和本文算法对 2 个算例进行覆盖分析:算例 1,目标区域为凹多边形,跨度约为  $20^\circ$ ,包含 8 颗卫星、过境 22 次;算例 2,目标区域为凹多边形,跨度为  $3^\circ$ ,包含 12 颗卫星、过境 29 次。算例 1 和算例 2 的耗时如表 1、表 2 所示。由此可知,本文算法效率高于网格点法,网格数越多,效率提升越明显,在网格数量超过 80 万时,耗时仅为网格点法的 1.19%。

表 1 算例 1 耗时对比

Table 1 Comparison of consumed time in Example 1

网格大小 /km <sup>2</sup>	网格数量	覆盖率 /%	耗时/ms		
			网格点法	文献[12]算法	本文算法
50	1 392	85.13	136	15	11
20	8 833	79.35	595	62	32
10	34 945	77.19	4 744	511	74
5	139 298	76.03	20 507	1 857	232
2	871 215	75.33	75 048	6 784	891

表 2 算例 2 耗时对比

Table 2 Comparison of consumed time in Example 2

网格大小 /km <sup>2</sup>	网格数量	覆盖率 /%	耗时/ms		
			网格点法	文献[12]算法	本文算法
10.0	1 440	93.33	123	15	12
5.0	5 676	92.79	411	44	39
1.0	138 330	92.30	10 663	927	303
0.5	550 162	92.24	39 851	3 674	532
0.2	3 439 957	92.21	181 201	17 207	1 934

## 5 结束语

本文利用网格点的空间相关性,基于扫描线思想实现覆盖带多边形生成、扫描线与多边形求交等关键技术,完成网格覆盖计算的批量处理。算例分析结果表明,本文算法的时间复杂度和空间复杂度均优于传统网格点法,尤其适用于大范围非规则目标区域的高精度卫星覆盖指标计算。下一步将在提高卫星区域覆盖分析效率的同时,对时间覆盖百分比、最大重访时间等相关指标的计算问题进行研究。

## 参考文献

- [1] WANG Huilin, QIU Dishan, HUANG Xiaojun, et al. Research on schedule technique for area-detecting electronic reconnaissance satellite[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(11): 1365-1372. (in Chinese)  
王慧林, 邱涤珊, 黄小军, 等. 面向区域覆盖的电子侦察卫星规划方法研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(11): 1365-1372.
- [2] QIU Dishan, TAN Qun, MA Manhao, et al. Research on satisfied degree evaluation method for satellite imaging reconnaissance requirement[J]. Computer Engineering, 2012, 38(8): 256-259. (in Chinese)  
邱涤珊, 谈群, 马满好, 等. 卫星成像侦察需求满足度评价方法研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(8): 256-259.
- [3] WEN Huihui. Remote sensing satellites for coverage analysis and simulation[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2006. (in Chinese)  
翁慧慧. 遥感卫星对地覆盖分析与仿真[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006.
- [4] ZHANG Run. Design of ground reconnaissance small satellite constellation based on revisiting cycle[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)  
张润. 基于重访周期的对地侦察小卫星星座设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [5] BAI Meng, LI Dalin, CHEN Mengyun. Research on fusion algorithm of satellite-to-ground coverage area[C]// Proceedings of the 23rd National Space Exploration Academic Exchange Conference. Xiamen: Chinese Academy of Space Sciences, 2010: 341-346. (in Chinese)  
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论文集. 厦门: 中国空间科学学会, 2010: 341-346.
- [6] WANG Rongfeng. Analysis algorithm for satellite regional coverage based on polygonal boolean operation[J]. Journal of Equipment Academy, 2016, 27(2): 83-87. (in Chinese)  
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, 27(2): 83-87.

(下转第 254 页)

- [12] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2014: 580-587.
- [13] GIRSHICK R. Fast R-CNN [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2015: 1440-1448.
- [14] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 39(6): 1137-1149.
- [15] DAI Jifeng, LI Yi, HE Kaiming, et al. R-FCN: object detection via region-based fully convolutional networks [C]//Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems. New York, USA: ACM Press, 2016: 379-387.
- [16] LIN T Y, DOLLÁR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection [EB/OL]. [2018-11-05]. <https://arxiv.org/pdf/1612.03144.pdf>.
- [17] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector [C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision. Berlin, Germany: Springer, 2016: 21-37.
- [18] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C. , USA: IEEE Computer Society, 2016: 779-788.
- [19] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection [C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Vision. Washington D. C. , USA: IEEE Computer Society, 2017: 2999-3007.
- [20] HE Kaiming, ZHANG Xiangyu, REN Shaoqing, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C. , USA: IEEE Computer Society, 2015: 770-778.
- [21] NGAN H Y T, PANG G K H, YUNG N H C. Automated fabric defect detection—a review [J]. Image and Vision Computing, 2011, 29(7): 442-458.
- [22] LI Wenyu, CHENG Longdi. New progress of fabric defect detection based on computer vision and image processing [J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(3): 158-164. (in Chinese)  
李雯羽, 程隆棣. 基于机器视觉和图像处理的织物疵点检测研究新进展 [J]. 纺织学报, 2014, 35(3): 158-164.
- [23] DENG J, DONG W, SOCHER R, et al. ImageNet: a large-scale hierarchical image database [C]//Proceedings of 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2009: 248-255.
- [24] MAK K L, PENG P. An automated inspection system for textile fabrics based on Gabor filters [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2008, 24(3): 359-369.

编辑 樊丽娜

(上接第 246 页)

- [7] GAO Huameng, LIU He. Design of regional coverage resource satellite constellation based on analytical method [EB/OL]. [2018-08-12]. [https://www.researchgate.net/publication/286715670\\_Design\\_of\\_Regional\\_Coverage\\_Resource\\_Satellite\\_Constellation\\_Based\\_on\\_Analytical\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/286715670_Design_of_Regional_Coverage_Resource_Satellite_Constellation_Based_on_Analytical_Method).
- [8] MORRISON J J. A system of sixteen synchronous satellites for worldwide navigation and surveillance: TSC-FAA-72-31 [R]. [S. l.]: FAA, 1973.
- [9] JIANG Yong, YANG Sen, ZHANG Gengxin, et al. Coverage performances analysis on combined-GEO-IGSO satellite constellation [J]. Journal of Electronics, 2011, 28(2): 228-234.
- [10] LI Zhenhai, JIAO Wenhai, FAN Jin, et al. Space coverage analysis of Beidou navigation satellite system regional constellation [C]//Proceedings of China Satellite Navigation Conference. Berlin, Germany: Springer, 2013: 305-310.
- [11] 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. (in Chinese)  
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.
- [12] HAN Chao, DENG Li, XU Jia. Improved grid simulation for constellation coverage performance evaluation [J]. Computer Simulation, 2005, 22(12): 21-23. (in Chinese)  
韩潮, 邓丽, 徐嘉. 星座覆盖性能评估的改进网格点仿真法 [J]. 计算机仿真, 2005, 22(12): 21-23.
- [13] 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. (in Chinese)  
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.
- [14] JIAN Ping, ZOU Peng, XIONG Wei, et al. Improved grid method for analysis on coverage performance of staring sensors based LEO [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2012, 13(3): 35-39. (in Chinese)  
简平, 邹鹏, 熊伟, 等. 改进的低轨凝视传感器覆盖性能网格分析方法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(3): 35-39.
- [15] HETLAND M L. Procedural elements for computer graphics [M]. Translated by SHI Jiaoying, PENG Qunsheng. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2002. (in Chinese)  
赫特兰. 计算机图形学的算法基础 [M]. 石教英, 彭群生, 译. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2002.

编辑 陆燕菲