

8-14-2020

Model and Method of Space Objects Multi-scale Expression

Qunshan Shi

1. Institute of Surveying & Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;;

Chaozhen Lan

1. Institute of Surveying & Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;;

Liang Jing

2. Zhengzhou School for Surveying and Mapping, Zhengzhou 450015, China;

Wanjie Lu

1. Institute of Surveying & Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;;

See next page for additional authors

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.

Model and Method of Space Objects Multi-scale Expression

Abstract

Abstract: To allow users to acquire accurately and efficiently information, which they need, from vast amounts of space situational information, *the thought of multi-scale expression was used, on the basis of analysis of various factors, which influenced space objects expression, multi-scale expression models were established, space objects multi-scale expression was achieved combined with the construction of the voronoi diagram.* The experiments were done to verify the validity of the model and methods, the results show that: this method can largely control the amount and level of detail of information, can meet the requirements of clarity and legibility of space situational expression, and can effectively improve the effect of space objects expression.

Keywords

space objects, multi-scale model, multi-scale expression, voronoi diagram

Authors

Qunshan Shi, Chaozhen Lan, Liang Jing, Wanjie Lu, and Wang Dong

Recommended Citation

Shi Qunshan, Lan Chaozhen, Liang Jing, Lu Wanjie, Wang Dong. Model and Method of Space Objects Multi-scale Expression[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2235-2245.

空间目标多尺度表达模型及方法

施群山¹, 蓝朝桢¹, 梁静², 卢万杰¹, 王栋¹

(1.信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450002; 2.郑州测绘学校, 郑州 450015)

摘要: 为了让用户从海量的空间目标态势信息中准确、高效的感知所需信息, 引入多尺度表达思想, 在多方面分析空间目标态势表达影响因素的基础上, 建立多尺度表达模型, 并结合 Voronoi 图实现空间目标多尺度表达。最后通过实验验证了模型和方法的有效性, 结果表明: 该方法可以有效控制空间目标态势表达的信息量和各层次态势信息的详略程度, 满足空间目标表达的清晰性和易读性的要求, 提高空间目标表达效果。

关键词: 空间目标; 多尺度模型; 多尺度表达; Voronoi 图

中图分类号: P208; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 09-2235-11

Model and Method of Space Objects Multi-scale Expression

Shi Qunshan¹, Lan Chaozhen¹, Liang Jing², Lu Wanjie¹, Wang Dong¹

(1. Institute of Surveying & Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;

2. Zhengzhou School for Surveying and Mapping, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: To allow users to acquire accurately and efficiently information, which they need, from vast amounts of space situational information, the thought of multi-scale expression was used, on the basis of analysis of various factors, which influenced space objects expression, multi-scale expression models were established, space objects multi-scale expression was achieved combined with the construction of the voronoi diagram. The experiments were done to verify the validity of the model and methods, the results show that: this method can largely control the amount and level of detail of information, can meet the requirements of clarity and legibility of space situational expression, and can effectively improve the effect of space objects expression.

Keywords: space objects; multi-scale model; multi-scale expression; voronoi diagram

引言

随着航空航天及遥感探测技术的突飞猛进, 太空已经成为继陆地、海洋、空中之后人类又一新的活动领域。世界各国尤其是欧美、俄罗斯等传统航天强国, 为确保空间安全, 维护空间利益, 不断发展空间目标感知能力, 研究空间目标

表达的理论与方法, 以便为空间信息优势和决策主动权的获取奠定基础^[1-5]。空间目标表达是以计算机为载体, 借助数字地球技术, 采用图形符号将空间中各类空间目标直观、有效地展现给用户的一种方式。

自从人类发射第一颗人造卫星以来, 地球轨道上的空间目标日益增多, 据文献[6]统计, 目前近地空间中直径超过 10 cm 的空间目标大概有 22 000 个, 包括可以被美国空间监视网(Space Surveillance Network, SSN)观察到的活动卫星, 废弃卫星和人造碎片。据美国国家航空航天局(National Aeronautics



收稿日期: 2015-06-10 修回日期: 2015-07-24;
基金项目: 国家 863 计划(2014AA7035059J);
作者简介: 施群山(1985-), 男, 江苏盐城, 博士, 讲师, 研究方向为空间态势认知与表达; 蓝朝桢(1979-), 男, 福建龙岩, 畲族, 博士, 副教授, 研究方向为数字摄影测量、空间信息可视化。

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

• 2235 •

and Space Administration, NASA)估计, 直径在 1~10 cm 之间(无法被现有 SSN 监测到)的物体数量超过 500 000 个, 直径在 1 cm 以下的物体数量更是数以千万计^[7]。

面对如此海量的空间目标, 用户在感知空间目标态势过程中, 所面临的主要困难不再是空间目标态势信息的缺乏, 而是如何从纷繁复杂的海量空间目标态势信息中准确、高效地感知空间目标态势。由于用户对空间目标态势信息的感知能力有限, 根据空间目标态势的特点, 若采用图形符号将所有空间目标表现出来, 势必会产生大量的空间目标信息压盖, 甚至出现信息“雾霾”, 使用户感知空间目标态势时产生态势“晕眩”, 影响用户感知空间目标态势信息的效果。如何提高空间目标态势的表达效率, 保证空间目标态势表达的清晰性、内容适宜性和可读性, 从而提高用户对空间目标态势的感知效果是空间目标表达值得研究的问题。

多尺度表达是一种有效处理多层次、海量数据信息从而满足人类认识需求的重要方式。此处引入多尺度表达思想, 多方面分析空间目标多尺度表达的影响因素, 从而建立空间目标多尺度表达模型。当对表达界面进行缩放时, 利用相应的多尺度表达算子综合取舍和概括所表达的空间目标, 避免空间目标之间出现重叠、遮挡等影响态势信息表达的情况出现, 使空间目标态势始终保持清晰、内容适宜又重点突出, 以解决空间目标态势信息过多带来的空间目标表达问题。

1 空间目标多尺度表达模型

依据用户对空间目标的关注特点, 空间目标多尺度表达模型可以理解为: 当关注的空间目标集合确定后, 为了使这些空间目标无论在用户关注范围放大还是缩小的情况下, 都能按照用户所关心的详略程度, 清晰、恰当地进行表现的一组表达尺度。即在一定的关注范围内, 需要使用多个表达尺度控制空间目标的显示才能保证空间目标表达的层次性、清晰性、内容适宜性和可读性。建立空间目标

多尺度表达模型就是确定表达尺度以及各个表达尺度中所要显示的空间目标。

1.1 空间目标多尺度表达影响因素分析

依据空间目标的分布特点、用户对空间目标信息的要求以及多尺度表达的特性, 空间目标多尺度表达与空间行动任务、层次要求、视点距离、空间目标自身属性和空间位置分布等因素有密切关系(如图 1), 下面详细分析这些因素对空间目标多尺度表达的影响。

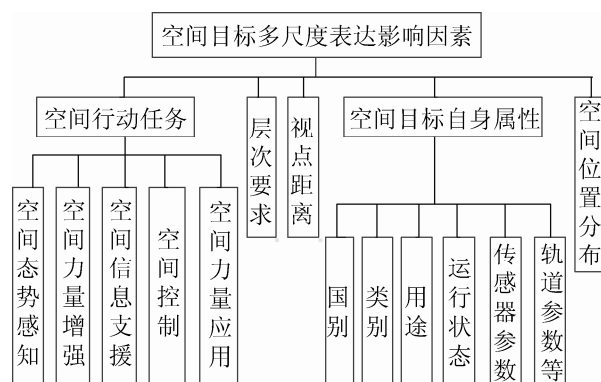


图 1 空间目标多尺度表达影响因素

(1) 空间行动任务。美国 2013 版的《空间作战条令》将空间行动划分为空间态势感知、空间力量增强、空间信息支援、空间控制和空间力量应用五大类, 空间态势感知主要负责探测、跟踪识别空间目标, 威胁预警与评估, 特征识别, 数据融合与开发等任务; 空间力量增强包括军事情报侦察、导弹预警、航天器发射监视、空间环境监测、卫星通信、定位导航授时等; 空间信息支援包括航天器发射、卫星操作、空间力量重构; 空间控制又可分为进攻和防御控制; 空间力量应用包括反导系统与兵力投送等领域。以上各类任务中除空间态势感知需要关注所有空间目标, 其它行动关注的目标主要是与任务相关的空间目标。不同的空间行动任务对不同类别的空间目标的关注程度不同, 相应的空间目标表达尺度也会有所不同。

(2) 层次要求。不同的空间行动任务对空间目标多尺度表达的级数 Lod_{max} 及各尺度空间目标信

息的详略有不同的要求, 表达的层次越高, Lod 值越小, 关注的内容越宏观, 反之 Lod 值越大, 关注的内容越详细。

(3) 视点距离。本文的空间目标表达是以数据地球为基础, 在数字地球虚拟环境中, 表达内容的缩放是通过调整视点的距离来实现的, 视点到地面的距离能够确定显示的 Lod 级及 Lod 级之间的切换时机, 其是表达尺度的参照, 当显示的 Lod 级确定后, 该级要表达的空间目标即可以确定。

(4) 空间目标自身属性。空间目标自身属性包括国别、类别、用途、运行状态、传感器参数、轨道参数等要素, 这些属性决定了其在各尺度上显示的必要性, 即决定每个空间目标显示的尺度。如当进行空间侦察类型目标态势显示时, 导航类型的空间目标则无需显示, 同一类型的空间目标, 轨道高的空间目标的Lod值要比轨道低的空间目标的Lod值小。

(5) 空间位置分布。空间位置分布是各方空间力量部署的现状和发展趋势的体现, 多尺度表达时应该尽量保持目标的空间位置分布特征, 但同时也要减少目标之间出现重叠、遮挡等影响空间目标态势表达的情况出现。

1.2 空间目标多尺度表达模型的建立

空间目标多尺度表达模型的建立主要解决两个问题: 一是在关注的空间目标确定后, 根据影响因素建立多尺度表达的层级, 即确定 Lod_{max} ; 二是确定每个被关注目标的显示级别, 即 Lod 值, 同一个空间目标可能在多个层级中表达, 因此空间目标的显示级别也可以是一个 Lod 区间。对应于空间目标表达的影响因素, 空间目标多尺度表达模型建立流程如下所述:

步骤 1: 建立空间目标信息要素集合 O , $O=(O_1, O_2, \dots, O_n)$ 。要素集合的建立可以采用多种方式完成, 如前面的智能选取方法以及根据不同的空间行动任务手工筛选等方式。

步骤 2: 根据具体的空间行动任务需求确定空

间目标表达的最大级数 Lod_{max} 和各级显示范围, 表示为:

$$Lod_{max} = n \times (L_{high} - L_{low}) + j$$

$$Altitude = \{Ai : i = 1, 2, \dots, Lod_{max}\}$$
(1)

式(1)中, L_{high} 表示最高级别; L_{low} 表示最低级别; n 表示倍数, $n \geq 1$; j 表示级数, $j \geq 0$ 。为了两个级别空间态势信息能够平滑切换, 在两个级别之间可以增加过渡显示级别, 这时即可通过 n 和 j 进行设定; Altitude 为各级显示对应的视点距地面高度范围集合。

步骤 3: 对集合 O 中的要素依据用户对其空间目标信息的关注程度进行属性权值设定。如在同级别空间目标态势信息中, 轨道高度越高, 属性权值重要性越高。另外, 在多尺度表达时, 并不需要选择所有的影响因素, 而是应根据实际空间目标表达的需要对影响因素进行选择。

步骤 4: 对集合 O 中元素各类属性权值进行综合分析, 根据空间态势多尺度表达的最大级数对空间态势信息要素进行逐级筛选, 确定各空间目标的显示级别, 表示为:

$$Lod_{O_x} = f(V_{p1}, V_{p2}, \dots, V_{pn})$$
(2)

式(2)中, Lod_{O_x} 为空间目标 O_x 的 Lod 级别, 其可以是一个区间; f 为筛选方法; $V_{p1}, V_{p2}, \dots, V_{pn}$ 为空间目标的各类属性权值。通过以上流程可以得到空间目标多尺度表达模型, 表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Lod_1 : (\infty, A_1] \\ Lod_2 : (A_1, A_2] \\ \dots \\ Lod_{max} : (A_{Lod_{max}}, 0] \\ LOD = (Lod_{o_1}, Lod_{o_2}, \dots, Lod_{o_m}) \end{array} \right.$$
(3)

式(3)的含义是: 视点在距离区间 $(\infty, A_1]$ 之间变化时, 所有显示 Lod 级数包含 Lod_1 的目标都需要进行表达; 视点在距离区间 $(A_1, A_2]$ 之间变化时, 所有显示 Lod 级数包含 Lod_2 的目标都需要进行表达, 其它依次类推。式(3)对应关系如图 2 所示。

步骤 5: 设定集合 O 的空间位置分布控制权值。

确定了各尺度需要表达的空间目标后, 在实际的空间目标表达中, 由于各空间目标的空间位置分布及视点原因, 空间目标之间会出现重叠、遮挡、分布不均等影响空间态势表达的现象。如图 3 所示, 空间目标表达场景中, 大量目标聚集在一起, 甚至很多空间目标标号之间出现重叠、遮挡现象, 影响了目标的识别(图 3(a)), 尤其是采用空间态势标号进行空间目标表达时(图 3(b)), 标号的遮挡对目标的识别影响更大, 因此需要设定每个空间目标的分布控制权值, 以此判断该空间目标是否表达, 保证空间目标的空间分布合理, 提高空间态势表达效果。

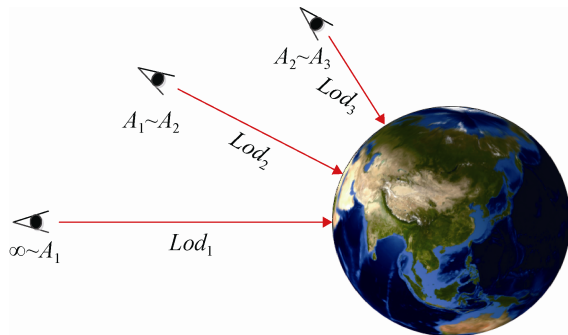
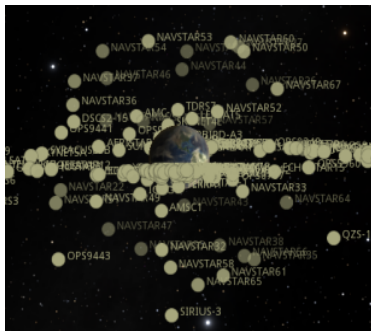


图 2 多尺度表达模型示意图



(a) 简单标号表示的空间目标



(b) 空间态势标号表示的空间目标

图 3 空间目标表达重叠、遮挡现象

2 空间目标多尺度表达方法

空间位置分布控制权值确定是空间目标多尺度表达模型构建中的重要一步, 其直接决定了建立的多尺度表达模型能否既能反映空间目标的原有分布态势, 又能使表达内容清晰合理, 便于用户对空间目标态势的感知。空间目标态势表达时, 空间目标都是按照坐标点在空间态势系统中进行配置, 一定范围内, 空间目标可以看作是点状要素的表达, 因此其空间位置分布控制权值确定可以参照点状要素。当前, 制图综合中点状要素的空间位置分布关系确定算法可在方法上提供参考^[8], 点状要素的空间位置分布关系确定算法主要有: 空间比例算法、重力模型法、圆增长法、凸壳简化法、Voronoi 图法等^[9-10]。

Voronoi 图又称泰森多边形或 Dirichlet 图, 其具有良好的空间等分特性, 能够在空间位置分布关系确定中, 保持点集的空间分布特征。因此, 本文将 Voronoi 图用于空间目标多尺度表中的空间位置分布控制权值的确定。

2.1 基于 Voronoi 图的空间位置分布控制权值确定

下面以执行某空间行动任务为例, 阐述基于 Voronoi 图的空间目标多尺度表达的实现方法。假定空间行动任务中需要关注的是通信、导航和侦察监视三类空间目标, 根据文献[11]的统计, 这几类卫星的轨道高度分布主要集中在 $[320 \text{ km}, 1\ 620 \text{ km}]$, $[18\ 620 \text{ km}, 20\ 620 \text{ km}]$, $[34\ 620 \text{ km}, 36\ 620 \text{ km}]$ 3 个区间。其中尤以在 $[320 \text{ km}, 1\ 620 \text{ km}]$ 区间分布的空间目标最多, 因此将空间目标表达层次确定为 3 级基本层次, 但是为了让相邻两级空间态势能够平滑过渡, 再增加 3 级表达层次, 确定表达层次级别为 6 级, 选取空间目标实体自身属性中的轨道高度、所属国家、任务类别、是否工作等作为空间目标的属性权值, 共同决定每个空间目标的 Lod 值范围, 将空间目标的 Voronoi 图面积作为位置分布控制权值。数据采用 STK 网站 2013-06-18 的空间

目标数据, 从中筛选出具有轨道根数的通信、导航和侦察监视 3 类空间目标, 共计 2 424 条, 包含已经失效的空间目标, 其中通信类 1 691 条, 导航类 393 条, 侦察监视类 340 条。具体流程如下:

步骤 1: 建立的空间目标点集 O 中一共有 2 424 个目标。

步骤 2: 根据表达层次级别计算各级显示对应的高度区间。该空间行动任务中 Lod_{max} 值初步定为 6, 根据空间目标的分布特点, 分布在 [320km, 1 620 km] 的空间目标较多, 因此将这一区间段再细分为 3 个区间, 最终 Lod_{max} 取值为 9, 同时根据关注的 3 类空间目标的轨道分布特点, 将各级 Lod 对应的高度区间初步确定为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Lod_1 : (\infty, 50\ 000\ \text{km}] \\ Lod_2 : (50\ 000\ \text{km}, 36\ 620\ \text{km}] \\ Lod_3 : (36\ 620\ \text{km}, 34\ 620\ \text{km}] \\ Lod_4 : (34\ 620\ \text{km}, 20\ 620\ \text{km}] \\ Lod_5 : (20\ 620\ \text{km}, 18\ 620\ \text{km}] \\ Lod_6 : (18\ 620\ \text{km}, 1\ 620\ \text{km}] \\ Lod_7 : (1\ 620\ \text{km}, 920\ \text{km}] \\ Lod_8 : (920\ \text{km}, 320\ \text{km}] \\ Lod_9 : (320\ \text{km}, 0\ \text{km}] \end{array} \right. \quad (4)$$

式(4)中各级 Lod 对应的高度区间并不均匀, 主要是因为所关注的三类目标的轨道高度并非均匀分布。由于本文的空间目标表达是以数据地球为基础, 为了使用户感知到空间目标的全球分布, 根据本文所用的空间态势表达系统的实际情况, 将各级 Lod 对应的高度区间在式(4)基础上统一增加 10 000 km, 其中表达系统的视场角为 50° 。

步骤 3: 空间目标属性权值的确定需要根据具体的空间行动任务需求进行确定。本例中选取轨道高度、所属国家、任务类别、是否工作等作为参考属性, 对于各属性权值的确定方法各不相同。轨道高度反映了空间目标的高度分布特点, 本文将其和显示等级相对应, 属性权值确定为 1~9, 每个目标根据具体的高度及式(4)来确定轨道高度权值, 如轨道高度在 $(\infty, 50\ 000\ \text{km}]$ 之间的取值为 9, 在

$(50\ 000\ \text{km}, 36\ 620\ \text{km}]$ 之间的取值为 8, 其它依次类推。将所属国家分为敌方、中立方和我方三大类, 据此确定所属国家的权值依次为 3、2 和 1。任务类别中依次将侦察监视、导航、通信类空间目标的权值确定为 3、2 和 1。是否工作属性中的工作权值为 2, 不工作的权值为 1。公式(5)是各参考属性的权值集合。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_A = (1, 2, 3, \dots, 9) \\ P_C = (1, 2, 3) \\ P_M = (1, 2, 3) \\ P_W = (1, 2) \end{array} \right. \quad (5)$$

公式(5)中, P_A 表示轨道高度的属性权值集合, P_C 表示所属国家的属性权值集合, P_M 表示任务类别的属性权值集合, P_W 表示是否工作的属性权值。为了使各属性权值具有统一的量纲, 确定各属性权值后, 将各权值规划到 [0,1] 区间, 规划后的属性权值公式(6)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_A = (\frac{1}{9}, \frac{2}{9}, \frac{3}{9}, \dots, 1) \\ P_C = (\frac{1}{3}, \frac{2}{3}, 1) \\ P_M = (\frac{1}{3}, \frac{2}{3}, 1) \\ P_W = (\frac{1}{2}, 1) \end{array} \right. \quad (6)$$

步骤 4: 确定每个空间目标的 Lod 级别。空间目标的属性权值对某一特定的空间目标是固定不变的, 但是目标的空间位置是变化的, 因此可以首先根据属性权值确定每一个空间目标 Lod 级别, 在空间态势表达时, 显示出对应 Lod 的空间目标后, 根据空间目标的 Voronoi 图的面积进一步确定每个目标是否需要显示, 以保证表达的空间目标态势的清晰度。

在步骤 3 中确定了各参考属性的权值集合, 当考虑的参考属性较多时, 根据各因素重要性进行加权平均求得综合属性权值, 如式(7)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_S = W_A P_A + W_C P_C + W_M P_M + W_W P_W \\ W_A + W_C + W_M + W_W = 1 \end{array} \right. \quad (7)$$

式(7)中, P_s 是空间目标的综合属性权值, W_A , W_C , W_M , W_W 分别是轨道高度、所属国家、任务类别和是否工作的属性权值的权, 在本文中, 假定轨道高度最为重要, 所属国家、任务类别和是否工作视为同等重要, 因此将 W_A , W_C , W_M , W_W 的值分别取为 0.4, 0.2, 0.2, 0.2。其它的空间行动任务则需要根据需求具体确定相应的加权值。

确定每个空间目标的综合属性权值后, 需要完成属性权值与 Lod 级的映射, 由于空间目标的空间和属性分布的不均匀性, 不能采用线性映射的方法完成空间目标 Lod 级别确定。为此在本文首先对空间目标的综合属性权值进行直方图分布统计, 然后依照直方图进行映射, 以保证每个 Lod 级内的空间目标尽量均衡。图 4 是本例中统计的综合属性权值直方图, 表 1 是本文确定的综合属性权值与 Lod 级别映射。

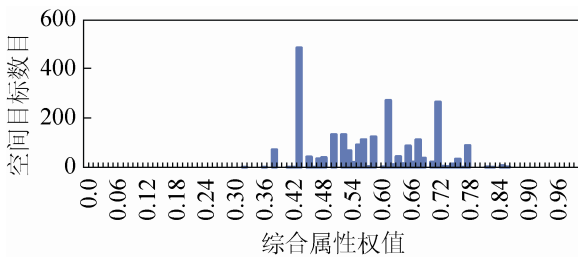


图 4 综合属性权值直方图

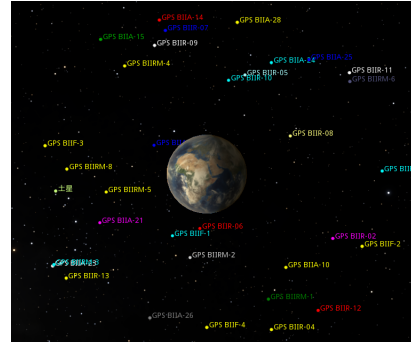
表 1 综合属性权值与 Lod 级别映射表

Lod	9	8	7	6	5
P_s	0.00~0.40	0.40~0.45	0.45~0.51	0.51~0.56	0.56~0.61
数目	75	487	253	313	244
Lod	4	3	2	1	
P_s	0.61~0.64	0.64~0.71	0.71~0.75	0.75~1.0	
数目	326	298	289	139	

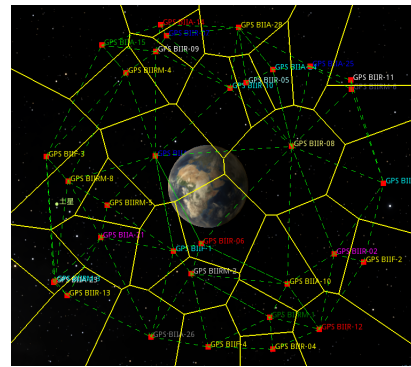
步骤 5: 构建 Voronoi 图。虽然空间目标全球分布, 如图 5(a)所示, 在基于虚拟现实的空间态势表达中, 用户具有三维立体感受, 但是用户真正观察到的仍然是二维平面图, 只不过该图是经过一系列的空间变换而来^[12]。因此本文仍然从二维平面出发, 通过构建空间目标经过一系列变换后的二维平面位置的 Voronoi 图来确定空间位置权值, 图 5

图(b)是构建的 Voronoi 图及其偶图 Delaunay 三角网的示意图, Voronoi 的构建方法参见文献[13]。构建完 Voronoi 图后, 计算各空间目标的 Voronoi 图的面积 S_i , 得到集合 S 如公式(8)所示。

$$S=(S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (8)$$



(a) 空间目标全球分布



(b) 构建的二维 Voronoi 图及 Delaunay 三角网

图 5 空间目标全球分布及构建的 Voronoi 图

在空间态势表达时, 根据视点高度显示出对应 Lod 的空间目标后, 由于虚拟环境中, 视点方向是可以任意调整, 因此会出现空间目标遮挡的问题, 为此给定一个 Voronoi 图面积阈值 S_T , 当空间目标的 Voronoi 图的面积 S_i 小于该阈值时, 不显示该目标, 从而减少遮挡, 保证空间目标态势清晰。面积阈值 S_T 的取值需要根据具体的表达需求确定, 本例中 S_T 取值为 1 200 像素面积。由于空间目标随着时间在不停地做高速运动, 一段时间后, 原先的空间位置分布会发生变化, 并且视点方向也会经常发生变化, 因此在一段时间间隔以及视点方向发生变化后, 必须重新进行空间目标 Voronoi 图的构建。

在空间目标表达时, 当空间目标很多时, 必然会对态势表达系统造成一定的压力, 因此还需要结合视锥体裁剪和遮挡剔除技术将不会出现在视野内的目标剔除掉, 不再对这些目标进行位置计算和渲染, 这样不仅能保证显示效果还可以节约计算资源, 提高表达的性能。

2.2 空间目标注记重叠处理

通过前面的多尺度表达处理后, 空间目标的重叠可以有效的缓解, 但是由于空间目标的注记占有一定的面积, 即使空间目标符号之间没有重叠, 但是注记之间仍有可能重叠, 如图 6(a)所示, 因此采用删除算子对空间目标注记重叠进行处理。



(a) 注记重叠



(b) 空间目标注记处理后的效果

图 6 注记重叠及处理

采用删除算子对空间目标注记重叠进行处理的步骤如下:

步骤 1: 计算每个空间目标的注记面积范围

$Rect_1, Rect_2, \dots, Rect_n$;

步骤 2: 判断注记范围是否有重叠, 记录下有重叠的目标;

步骤 3: 有重叠的目标进一步根据空间目标的综合属性权值来确定哪个目标的注记显示, 本文采用的判定准则是综合属性权值大的注记予以保留, 小的予以删除, 权值相等时保留更靠近视点的目标的注记。图 6(b)是空间目标注记处理后的效果, 由于随着时间以及视点的变化, 注记重叠情况会发生变化, 因此一段时间及视点调整后要重新进行注记重叠处理。

3 实验结果与分析

3.1 多尺度表达的定量分析

空间目标多尺度表达模型的建立与具体的应用有密切的关系, 其需要反复实践, 不断总结完善, 多尺度表达层次的确定是否合理, 各个目标的 Lod 级别设置是否适合, 显示的效果是否满足要求等都需要一个定量的评价标准, 以综合分析建立的多尺度表达模型。通过定量分析可以不断优化多尺度表达模型, 改善多尺度表达效果。

在确定定量评价指标前, 首先分析一下空间目标多尺度表达的目的, 空间目标多尺度表达的主要目的是: 保留主要信息, 略去次要信息, 减少空间目标之间出现重叠、遮挡, 使空间态势图保持清晰、详细。从空间目标多尺度表达的目的中可以看出, 重叠少, 内容清晰、详细是多尺度表达的关键, 本文从这两个要点出发, 建立多尺度表达的定量分析指标, 分别为目标重叠率、面积载负量。

(1) 目标重叠率

目标重叠是指表示空间目标的符号及注记在二维屏幕上出现重叠、压盖的现象, 本文的目标重叠率主要用来衡量生成的空间态势图是否清晰, 可以定义为屏幕中出现重叠的目标数量占目标中所有目标的比例, 可以用如下计算公式表示:

$$\text{Ratio}_{\text{overlap}} = \frac{\text{Num}_o}{\text{Num}_{\text{all}}} \times 100\% \quad (9)$$

式(9)中 $\text{Ratio}_{\text{overlap}}$ 为目标重叠率, Num_o 为屏幕中出现重叠的目标数目, Num_{all} 为屏幕中所有的目标数目。

依据公式(9), 统计了建立的多尺度表达模型的目标重叠率。统计方式是: 每一个 Lod 层次中选取一个视点高度, 在该高度上, 调整视点位置, 使视点分别处于地球惯性系中坐标轴的正负 6 个方向上, 如图 7 所示。表 2 是选取的具体视点高度值。图 8 是根据所统计出的目标重叠率结果绘制的变化趋势图, 其中每个视点分别统计了没有加上空间位置分布控制、加上空间位置分布控制、注记重叠处理后三种情况的重叠率, 图 8 中—、—和—分别代表前面 3 种情况的目标重叠率, 横坐标轴表示对应的 Lod 级别, 纵坐标轴表示目标重叠率, 重叠率的量纲是%。实验中的仿真时间是 2013-06-19 T 12:31:34(UTC 时)。

从实验结果可以看出, 在不同的表达层次, 不同的视点处, 通过本文的多尺度表达处理后, 目标重叠率都维持在 20% 的较低水平, 没有加上空间位置分布控制时目标重叠率保持在 80% 左右, 加上空间位置分布控制后可以使目标重叠率下降到 50% 左右, 在同一高度上, 不同视点处的目标重叠率基本保持一致。综合实验结果来看, 本文多尺度表达方法能有效减少重叠, 使空间态势图保持清晰。

为了进一步分析基于 Voronoi 图的空间位置分布控制对多尺度表达的贡献, 本文在不对空间目标进行标注的情况下, 统计了不同 Lod 层次中没有进行空间位置控制和进行空间位置控制后的目标重叠率, 图 9 是统计结果绘制的曲线图。情况 1 和情况 2 分别对应空间位置控制前后, 视点的高度同表 2, 视点位置采用图 7 中的视点 1。

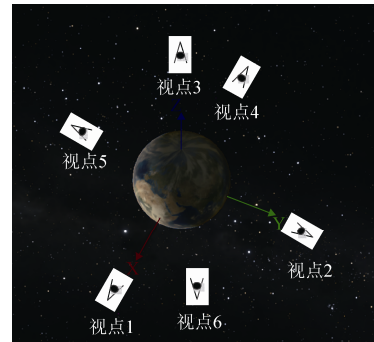


图 7 视点分布示意图

表 2 各 Lod 层次中选取的视点高度

Lod 级别	1	2	3	4	5
视点高度/km	100 000	50 000	45 000	40 000	30 000
Lod 级别	6	7	8	9	
视点高度/km	20 000	11 000	10 600	10 000	

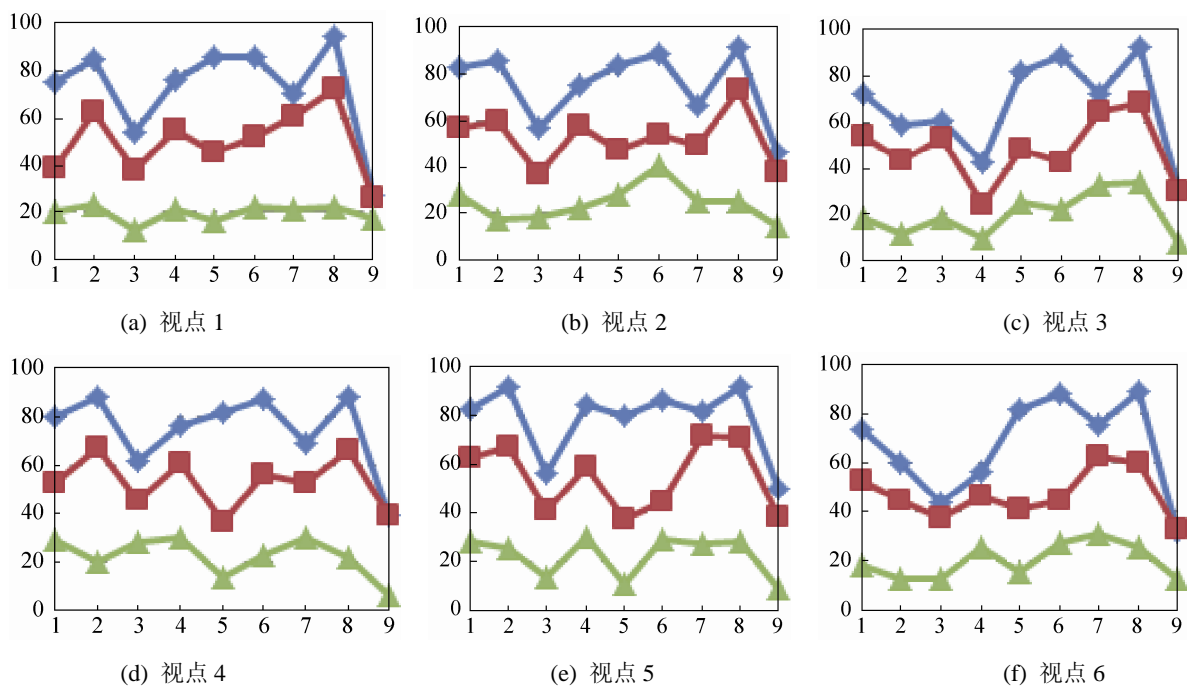


图 8 目标重叠率变化趋势图

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

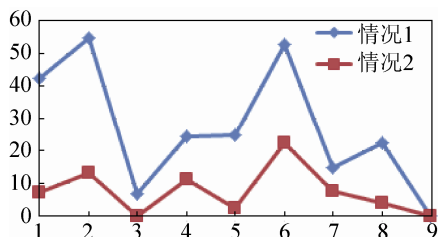


图 9 没有注记时目标重叠率变化趋势图

(2) 面积载负量

面积载负量是传统地图学中地图载负量的一种^[14], 地图载负量是衡量地图内容多少的数量标志^[15], 其定义为地图上所有符号和注记所占面积与图幅总面积之比。本文主要用面积载负量来衡量空间态势表达内容是否详细, 即通过面积载负量来衡量各个尺度所表达的空间目标数量是否适中, 在本文中, 面积载负量通过计算空间目标的符号及注记在屏幕上所占像素面积与屏幕面积之比即可, 计算公式如下:

$$\text{Ratio}_{\text{area}} = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Area}_i}{\text{Area}} \times 100\% \quad (10)$$

式(10)中 $\text{Ratio}_{\text{area}}$ 为面积载负量, Area_i 为空间目标 i 所占的屏幕像素面积, Area 为屏幕像素面积。

依据公式(10), 统计了所建立的多尺度表达模型的面积载负量。统计方式同样是: 每一个 Lod

层次中选取一个视点高度, 在该高度上, 调整视点位置, 计算该视点时的面积载负量, 具体视点的高度值及视点位置同前面的表 2 和图 7。图 10 是根据所统计出的面积载负量结果绘制的变化趋势图, 其中每个视点同样分别统计了没有加上空间位置分布控制、加上空间位置分布控制、注记重叠处理后三种情况的面积载负量, 态势表达场景的屏幕像素面积为 1322×777 , 图 10 中 \blacklozenge 、 \blacksquare 和 \blacktriangle 分别代表前面 3 种情况的面积载负量, 横坐标轴表示对应的 Lod 级别, 纵坐标轴表示面积载负量, 面积载负量的量纲是%。实验中的仿真时间同样是 2013-06-19 T 12:31:34。从实验结果可以看出, 随着 Lod 级的增加, 面积载负量逐渐平稳上升, 这一特点同层级越高关注越宏观, 层级越低, 关注越详细的出发点相符合, 不同 Lod 级之间的面积载负量虽有变化, 但是相邻之间变化较为平缓, 同一 Lod 级不同的视点位置, 面积载负量变化值较小。没有加上空间位置分布控制、加上空间位置分布控制、注记重叠处理后 3 种情况的面积载负量相差不大, 说明本文的多尺度表达方法既降低了目标重叠率, 又没有对面积载负量产生较大影响。

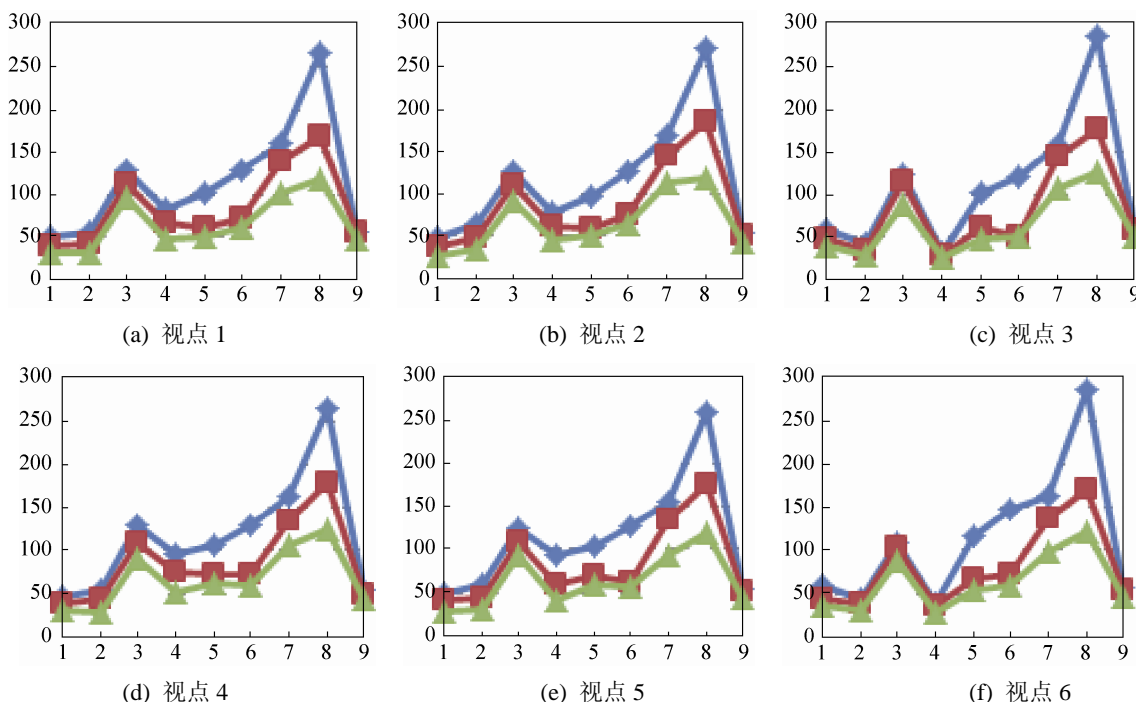


图 10 面积载负量变化趋势图

通过这两个指标可以来定量分析建立的多尺度表达模型的优劣,定量分析对于空间目标多尺度表达具有很好的指导意义,例如在某个显示尺度上的目标重叠率过大,则需要在该尺度上增大空间目标删除的数量,尽量使目标重叠率保持在一个合理的水平。

3.2 空间目标多尺度表达效果

上面给出了定量分析实验结果,下面给出部分空间目标多尺度表达的实际效果图。图 11 是第 4.3.2 节多尺度表达案例的部分效果图,图 11(a)~图 11(c),依次是 Lod 级别为 1、5、9 时的空间目标表达效果,每个 Lod 级别中展示了 4 张效果图,依次是没有进行多尺度表达处理的空间目标运行

态势、没有进行空间位置分布控制处理的多尺度表达效果、基于 Voronoi 图的空间位置分布控制后的多尺度表达效果和进行过注记重叠处理后的多尺度表达效果。

图 11 图的实验效果表明,没有进行多尺度表达处理的空间目标表达时会出现大量的重叠、遮盖,而本文的空间目标多尺度表达能有效减少重叠使表达更清晰。在多尺度表达中,基于 Voronoi 图的空间位置分布控制和注记重叠处理都可以减少空间目标的重叠。另外从图 11 的实验效果可以看出,虽然多尺度表达减少了目标重叠,但是在各级态势显示时仍然能保持空间目标位置分布的总体特征。

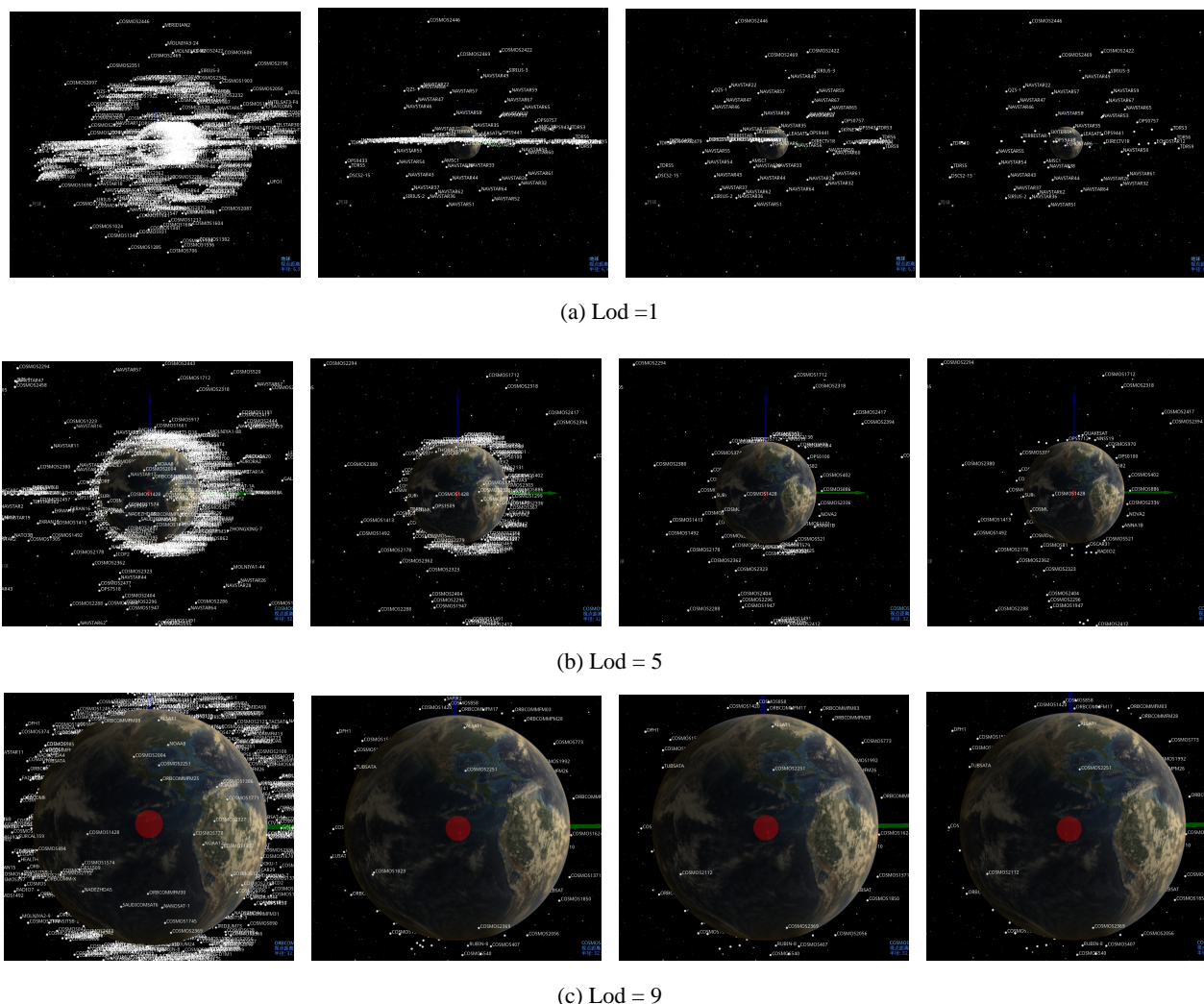


图 11 不同级别的空间态势显示效果图

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

上述的定量分析以及实际表达的结果, 分别从不同侧面验证了本文空间目标多尺度表达方法的有效性。

4 结论

在分析了空间态势多尺度表达影响因素的基础上, 对空间态势多尺度表达模型进行了研究, 并利用该模型结合 Voronoi 图的构建实现了空间目标多尺度表达。实验表明, 该方法可以有效控制空间目标态势表达的信息量和各层次对应的信息详略程度, 在很大程度上满足空间目标态势表达的清晰性和易读性的要求, 是实现空间目标态势表达的一种有效途径, 能有效提高空间目标表达效果。当然, 对于实际中的空间目标多尺度表达, 加入多少权值进行控制需要考虑具体的应用需要, 同时, 各权值的确定方法也需要结合具体情况开展进一步的研究。

参考文献:

- [1] Abbot R I, Wallace T P. Decision Support in Space Situational Awareness [J]. Lincoln Laboratory Journal (S0896-4130), 2007, 16(2): 297-335.
- [2] 尤政, 赵岳生. 国外太空态势感知系统发展与展望 [J]. 中国航天, 2009 (9): 40-44.
- [3] 夏禹. 国外空间态势感知系统的发展(上) [J]. 空间碎片研究与应用, 2010, 10(3): 1-9.
- [4] 夏禹. 国外空间态势感知系统的发展(下) [J]. 空间碎片研究与应用, 2011, 11(1): 1-8.
- [5] 陈杰, 潘峰, 苏同领. 美国天基太空监视系统 [J]. 国防科技, 2011, 32(1): 67-70.
- [6] Air Force Space Command. JSpOC Increases Tracking Capabilities [EB/OL]. (2014-03-11) [2015-05-13]. <http://www.afspc.af.mil/news/story.as p?id=123165722>.
- [7] NASA Orbital Debris Program Office. Orbital Debris Frequently Asked Questions [EB/OL]. (2009-07-03) [2015-05-01]. <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/faq.html>.
- [8] 武芳. 空间数据的多尺度表达与自动综合 [M]. 北京: 解放军出版社, 2003: 83-166.
- [9] 贾奋励. 电子地图多尺度表达的理论与方法研究 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2002: 20.
- [10] 闰浩文, 王家耀. 基于 Voronoi 图的点群目标普适综合算法 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(5): 633-666.
- [11] 王宏. 空间目标动态信息库的设计和实现 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2004: 35-41.
- [12] Shreiner D, Sellar G, Kessenich J, et al. OpenGL Programming Guide: the Official Guide to Learning OpenGL Version 4.3, Eighth Edition [M]. London: Pearson Education, Inc., 2013.
- [13] Berg M D, Kreveld M V, Overmars M, et al. Computational Geometry: Algorithms and Applications (Second Edition) [M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 2000.
- [14] 孟丽秋. 视觉载负量的计量方法及其应用 [D]. 郑州: 解放军测绘学院, 1985.
- [15] 王家耀. 普通地图制图综合原理 [M]. 北京: 测绘出版社, 1993.