

卫星组网可视化仿真系统设计与实现

张 健

(西昌学院 汽车与电子工程学院, 四川 西昌 615013)

摘要: 卫星组网是满足未来空间通信需求的有效方式, 为实现空间卫星组网的可视化, 设计了一种卫星组网可视化仿真系统; 系统由星座设计分系统、星座覆盖性能分析分系统、数据处理分系统和可视化分系统组成; 在组网过程中, 首先在星座设计分系统中设置星座的参数, 根据轨道参数模型计算出星座中每颗卫星的轨道参数, 并将计算结果输出给星座覆盖性能分析分系统, 完成对纬度、区域和全球覆盖效果的分析、评估和显示; 仿真结果表明: 系统能够对卫星组网进行实时计算和显示, 计算精度比 STK 仿真软件提高 12%, 系统运行稳定, 界面良好。

关键词: 卫星组网; 仿真系统; 可视化; 星座覆盖

Design and Realization of Satellite Network Visualization Simulation System

Zhang Jian

(School of Automotive and Electronic Engineering, Xichang College, Xichang 615013, China)

Abstract: Satellite network is an effective method to meet the demand of future space communication, in order to realize the visualization of satellite network, a satellite network visualization simulation system is design. The system includes constellation design sub-system, constellation coverage performance analysis sub-system, data disposal sub-system and visualization sub-system. In the course of networking, firstly the parameters of constellation are set up in constellation design sub-system, orbit parameters of the satellites in the constellation are calculated according to orbit parameter model, and the calculating results are exported to constellation coverage performance analysis sub-system, which accomplishes the analysis, evaluation and display of coverage effect for latitude, region and the global. The results of simulation demonstrate that the system can real-time calculate and display satellite network, the calculation precision is 12% higher than STK simulation software, the system runs stably and has a good interface.

Key words: satellite network; simulation system; visualization; constellation coverage

0 引言

随着数据通信业务需求的增加, 单颗卫星工作模式难以满足日益旺盛的通信业务需要, 因此, 将多颗卫星组网为数据通信提供服务已成为未来通信发展的趋势^[1]。合理的卫星组网可以实现全球通信能力的连续覆盖, 可以提高国防防御能力, 实现空间通信的可视化。本文设计了一种卫星组网可视化仿真系统, 给出了系统的总体结构和信息流程, 设计出系统的关键模型, 并利用系统进行了卫星组网仿真实验。

1 组网设计的原则

卫星组网设计时, 应考虑以下原则^[2]。

(1) 轨道平面与卫星个数的选取: 在构成星座的可选卫星总数一定时, 应尽力将卫星分布在较少的轨道平面内, 且在每个轨道平面布设一个备用卫星, 以满足星座性能台阶的需求, 当星座内个别卫星发生故障时, 星座可降低级稳定运行。

(2) 避免轨道摄动引起星座变形: 为了避免轨道摄动造成星座变形, 尽量选用分布在圆轨道的卫星, 且卫星的轨道平面应保持相同的高度和倾角, 确保星座中所有卫星的交点进动相等。

(3) 卫星轨道高度的选取: 为减少大气阻力对轨道摄动的

影响, 选取轨道高度较高的卫星组成星座, 且合理选择相邻轨道平面的相位, 确保星座对地覆盖的均匀性, 以便为地面用户提供较长的服务时间。

2 系统总体设计

2.1 总体结构

卫星组网可视化仿真系统由星座设计分系统、星座覆盖性能分析分系统、数据处理分系统和可视化分系统组成, 如图 1 所示。其中, 星座设计分系统主要完成星座内卫星轨道参数的计算、星座参数设置、计算结果的输出、保存和显示等功能; 星座覆盖性能分析分系统主要实现星座对地通信覆盖性能的分析, 重点包括星座对纬度覆盖分析计算、对区域的覆盖分析计算、对全球的覆盖分析评估等; 数据处理分系统主要完成动画数据处理、星间通信链路的数据处理, 包括动画绘制和渲染、星间通信时延、丢包率、链路带宽的配置与统计等; 可视化分系统主要实现星座三维动画显示、星座覆盖指标显示、用户操作界面、系统管理等功能。

2.2 信息流程

在星座组网过程中, 首先在星座设计分系统中设置星座的参数, 根据轨道参数模型计算出星座中每颗卫星的轨道参数, 并将计算结果保存后输出给星座覆盖性能分析分系统, 由星座覆盖性能分析分系统完成对纬度、区域和全球覆盖效果的分析、评估和显示。最后, 将星座对地覆盖结果输出到可视化分系统以列表、文本和 TeeChart 图^[3]等形式实时显示。仿真系统信息流程如图 2 所示。

收稿日期: 2014-01-09; 修回日期: 2014-02-28。

基金项目: 四川省教育厅重点资助项目(13ZA0156)。

作者简介: 张 健(1973-), 男, 四川富顺人, 讲师, 硕士, 主要从事计算机、通信网络及其应用系统开发等方向的研究。

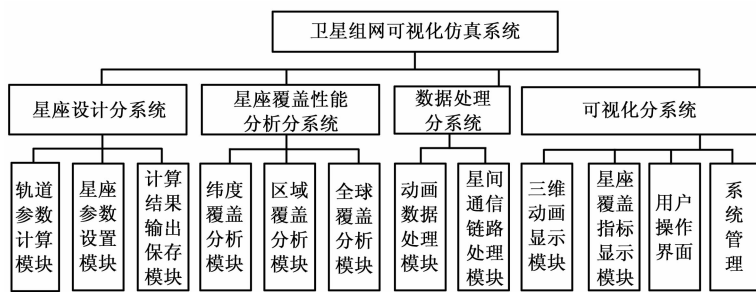


图 1 卫星组网可视化仿真系统总体结构

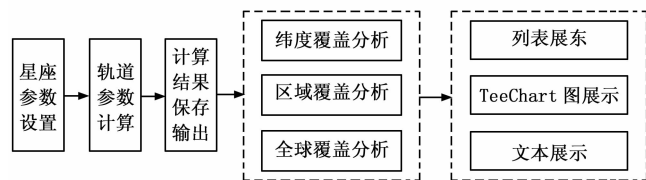


图 2 仿真系统信息流程

3 关键模型设计

在卫星组网设计中，需要建立星座设计和星座覆盖两个系统模型。其中，星座设计系统模型包括轨道参数计算模型、星座构型计算模型和赤道碰撞判断模型；星座覆盖系统模型包括覆盖角计算模型、星下点计算模型、纬度覆盖分析模型、区域覆盖分析模型和全球覆盖分析模型等。整个系统的模型如图 3 所示。卫星轨道参数计算、星座构型计算可参见文献 [4]，这里只建立星下点计算模型和覆盖角计算模型。

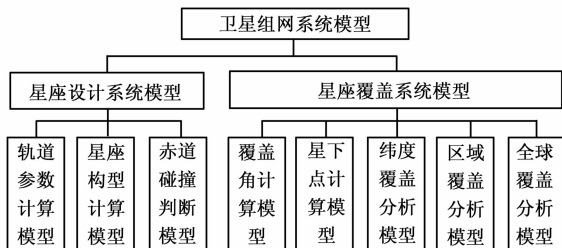


图 3 系统模型结构

3.1 星下点计算模型

星下点轨迹是指卫星在空间运行时投影到地面上的轨迹^[5]。设星下点的地心经度为 φ_s ，单位为°；星下点的地心纬度为 φ_s ，单位为°；升交点的地心经度为 φ_0 ，单位为°； i 为轨道倾角；地球自转角速度为 ω_e ，单位为°/s；在 t 时刻卫星与升交点之间的角距为 θ ，单位为°；卫星飞行时间用 t 表示，“±”分别表示顺行信道和逆行信道。为了计算方便，这里定义卫星运行通过右升节点的時刻作为零点，则：星下点的地理坐标可通过下面的方程进行计算：

$$\begin{cases} \varphi_s = \arcsin(\sin i \sin \theta) \\ \varphi_s = \varphi_0 + \arctan(\cos i \tan \theta) - \omega_e t + \alpha_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， α_0 的取值为：

$$\alpha_0 = \begin{cases} -180^\circ & (-180^\circ \leq \theta < -90^\circ) \\ 0^\circ & (-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ) \\ 180^\circ & (90^\circ < \theta \leq 180^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

3.2 覆盖角计算模型

地面上的目标点是否被星座覆盖，与星座中卫星的轨道参数、载荷的视场角、侧视角、卫星的最小仰角以及目标点的经纬度等有关^[6]。计算过程如下：

卫星覆盖视场示意图如图 4 所示，设卫星 S 的星下点为 $S'(\varphi_0, \varphi_0)$ ，已知卫星载荷的视场角为 $\angle KSK' = \theta_v$ ，侧视角为 $\angle S'SO' = \theta_s$ ，卫星载荷的最大视场角为 $2\angle MSO = \theta_m$ 。下面分侧视角 $\theta_s = 0$ 和侧视角 $\theta_s \neq 0$ 两种情况计算卫星对地覆盖角 $\beta = 2\angle MOS$ 。

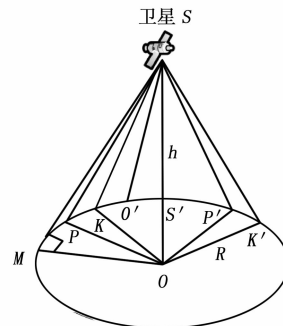


图 4 卫星覆盖视场示意图

1) 当侧视角 $\theta_s = 0$ 时：

此时，视场中心点为星下点 $S'(\varphi_0, \varphi_0)$ ，卫星对地覆盖角 β 为：

$$\beta = \begin{cases} 2\arcsin\left[\left(\frac{R+h}{R}\right)\sin\left(\frac{\theta_v}{2}\right)\right] - \theta_v, & \theta_v < \theta_m \\ 2\arccos\left[\frac{R}{R+h}\right], & \theta_v \geq \theta_m \end{cases} \quad (3)$$

2) 当侧视角 $\theta_s \neq 0$ 时：

此时，视场中心点为 $O'(\varphi, \varphi)$ ，设 $\beta_1 = \angle POS = \arcsin\left[\left(\frac{R+h}{R}\right)\sin\left(\frac{\theta_v}{2} + \theta_s\right)\right] - \left(\frac{\theta_v}{2} + \theta_s\right)$ ， $\beta_2 = \angle P'OS = \arcsin\left[\left(\frac{R+h}{R}\right)\sin\left(\frac{\theta_v}{2} - \theta_s\right)\right] - \left(\frac{\theta_v}{2} - \theta_s\right)$ 。当视场中心点 O' 落在 K' 和 K 之间时， $\angle P'SK'$ 和 $\angle PSK$ 在轴线 SO' 的两侧，否则， $\angle P'SK'$ 和 $\angle PSK$ 在轴线 SO' 的同侧。

(1) 在同侧时，卫星对地覆盖角 β 为：

$$\beta = \beta_1 - \beta_2 \quad (4)$$

此时，视场中心点的经纬度为：

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_0 \\ \varphi = \varphi_0 + \arccos\left[\frac{\cos\frac{\beta_1 - \beta_2}{2} - \sin^2\varphi_0}{\cos^2\varphi_0}\right] \end{cases} \quad (5)$$

(2) 在两侧时，卫星对地覆盖角 β 为：

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 \quad (6)$$

此时，视场中心点的经纬度为：

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_0 \\ \varphi = \varphi_0 + \arccos\left[\frac{\cos\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} - \sin^2\varphi_0}{\cos^2\varphi_0}\right] \end{cases} \quad (7)$$

4 关键分系统的实现

4.1 星座覆盖性能分析分系统

星座对纬度、区域和全球的覆盖效果是以点目标的发现为

基础的，当星座中某颗卫星的通信范围覆盖了点目标，则表示该星座覆盖了点目标。在圆形视场内，判断某颗卫星是否覆盖点目标，首先计算该卫星的星下点，然后根据侧视角和视场角计算出该颗卫星的覆盖角和视场中心，当视场中心和点目标的地心角小于或者等于覆盖角，且星下点和点目标的地心角小于或者等于卫星的最小仰角所对应的地心角时，则可以判断出该颗卫星发现了点目标。

当卫星发现点目标后，使用计数器记录仿真周期内点目标被覆盖的次数和时间，综合计算出该点目标的平均覆盖时间。具体实现流程为：首先，设置卫星和计数器的初始值，然后在每一个仿真步长内对星座内所有卫星对点目标的覆盖情况进行判断，如果星座内有卫星覆盖点目标，则将当前星座的状态加 1，并记录下覆盖该点的卫星个数、覆盖次数以及覆盖时间等；如果没有卫星覆盖到点目标，则将当前星座的状态置为 0，并记录下间隙时间、间隙数目等。重复上面的步骤，完成仿真时间内的所有仿真步长，最后综合计算，输出该点目标的星座覆盖平均时间、星座覆盖平均次数等覆盖性能指标。

在点目标覆盖性能指标计算的基础上，在仿真周期内计算星座对同一纬度上的每个采样点的覆盖分析结果，平均各个点的覆盖性能指标，得到该星座对纬度的覆盖性能指标，实现过程如图 5 所示。

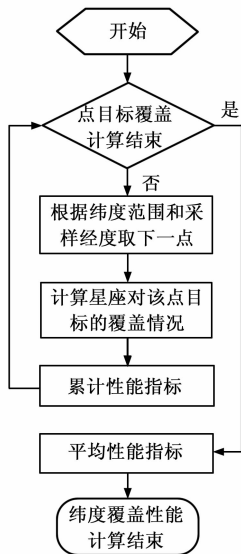


图 5 纬度覆盖分析实现过程

根据给定的经纬度间隔，将目标区域划分为网格，在网格中提取采样点，计算出每个采样点的经纬度和平均覆盖性能指标，最后综合计算出星座对目标区域的覆盖性能指标。设目标区域的经度范围为 $[\varphi_1, \varphi_2]$ ，纬度范围为 $[\varphi_1, \varphi_2]$ ，采样间隔为 d ，则在经度上的采样点个数为： $N_\varphi = [(\varphi_2 - \varphi_1)/d] + 1$ ，在纬度上的采样点个数为： $N_\varphi = [(\varphi_2 - \varphi_1)/d] + 1$ ，在目标区域内的总采样个数为： $N = N_\varphi \times N_\varphi$ ，在目标网格的第 i 行、第 j 列的采样点经纬度为：

$$\begin{cases} \varphi_i = \varphi_1 + d \times i \\ \varphi_j = \varphi_1 + d \times j \end{cases} \quad (8)$$

式中， $i = 0, 1, 2, \dots, N_\varphi, j = 0, 1, 2, \dots, N_\varphi$ 。

同理，按照纬度、区域覆盖分析的方法，可以计算出星座

对全球的覆盖性能指标，并将星座对点目标、纬度、区域和全球的覆盖性能指标输出给可视化分系统的星座覆盖指标显示模块，以列表、TeeChart 图和文本等形式实时显示。

4.2 数据处理分系统

数据处理分系统除了需要完成卫星、地球等对象的实时动画绘制、渲染等功能，最重要的功能是完成星间通信链路的数据处理。在组网的星座内，各个卫星之间通过星际链路 ISL 进行通信，通常处于同一轨道内的卫星之间的星际链路是静态的，而处于不同轨道的卫星之间的星际链路是动态的^[7]。用函数 $V_{m \rightarrow ij}(t)$ 表示 t 时刻第 m 个轨道面的第 n 颗卫星与第 i 个轨道面的第 j 颗卫星建立星际链路的情况，其表达式如下：

$$V_{m \rightarrow ij}(t) = \begin{cases} 1, \text{卫星 } S_{mm} \text{ 与 } S_{ij} \text{ 建立星际链路} \\ 0, \text{卫星 } S_{mm} \text{ 与 } S_{ij} \text{ 不能建立星际链路} \end{cases} \quad (9)$$

然后，系统按照如图 6 所示的流程绘制星座网络的拓扑结构。

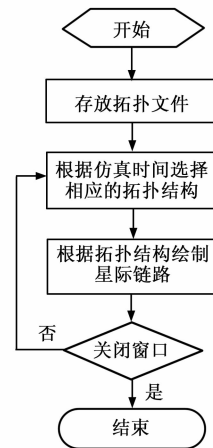


图 6 星际链路的绘制流程

5 系统集成与仿真

系统采用 VC6.0 作为开发平台，利用 TeeChart 绘制卫星星座的通信覆盖指标，并以 TXT 文件形式提供卫星轨道参数、星座覆盖指标的输入。通常按照几何构型将星座类型分为椭圆轨道星座、星形星座、对称星座和混合星座等^[8]，其中，对称星座又分为 σ 星座、 δ 星座、Walker 类星座、玫瑰星座等。为了验证系统的性能，设计了 3 种 δ 星座方案，并给出仿真结果。

3 种 δ 星座方案的星座参数如表 1 所示。将 3 种方案的星座参数输入该仿真系统，计算出每个方案的星座轨道参数，选择经纬度为 (80, 45)、(80, 20)、(130, 45)、(130, 20) 的 4 个区域为目标区域，计算出三种方案对目标区域的覆盖情况如表 2 所示。

从表 2 可以看出，虽然 3 种方案对目标区域均可实现百分之百覆盖，但是与其它两种组网方案相比，方案三对目标区域的覆盖时间百分比达到 94.75%，对目标区域的总覆盖时间最长、平均覆盖间隙最短，网内单颗卫星对地覆盖的重复率为 0，对目标区域通信覆盖的平均响应时间最短，可见采用方案三对该 δ 星座进行组网可实现对目标区域的最佳通信覆盖。同时，需要指出的是，采用方案三组网的星座对目标区域覆盖的次数小于其它两种组网方案，且同时覆盖目标区域的卫星没有备份，如果发生单颗卫星故障，就会导致该区域内的通信完全中断，所以，在实际的卫星组网设计中，需要不断地调整组网方案中的星座参数，力争实现卫星组网方案的最优解。

表 1 3 种 δ 星座方案的星座参数

输入参数	方案一	方案二	方案三	备注
星座类型	0	0	0	代表星座
卫星总数	10	10	10	代表卫星颗数
相位参数	0	0	0	单位:°
轨道平面数	10	5	2	代表轨道面数
轨道类型	0	0	0	代表回归轨道
回归天数	8	8	8	单位:天
轨道倾角	42	42	42	单位:°
轨道高度	4 182	4 182	4 182	单位:km
起始升交点赤经	59.5	59.5	59.5	单位:°
起始近地点幅角	0	0	0	单位:°
起始真近点角	0	0	0	单位:°

表 2 3 种方案的覆盖结果

指标	方案一	方案二	方案三
区域覆盖时间百分比(%)	15.13	52.74	94.75
区域覆盖百分比(%)	100.00	100.00	100.00
区域覆盖次数	40	65	30
区域总覆盖时间(s)	104 601.50	364 510.50	654 930.53
区域平均覆盖间隙(s)	13 966.64	5 537.11	1 250.67
区域平均覆盖时间(s)	2 615.03	5 607.85	21 831.02
区域最大覆盖间隙(s)	43 217.53	16 341.50	3 199.09
同时覆盖区域的最大卫星数	3	2	1
同时覆盖区域的最小卫星数	1	0	0
区域覆盖平均响应时间(s)	71.85	28.09	5.82

6 结束语

本文设计了一种卫星组网可视化仿真系统，介绍了系统

的总体结构和信息流程，设计了系统的星下点计算模型、覆盖角计算模型等关键模型，并利用该系统进行了卫星组网仿真实验。该系统可实现多种组网方案下的卫星组网可视化，给出组网星座的对地通信覆盖性能指标值，并将该系统仿真得到的结果与 STK 仿真软件运行结果进行比较，其计算精度比 STK 软件的计算结果提高 12%。该仿真系统实现了空间卫星组网的可视化，提高了组网评估能力，具有重要的工程应用价值。

参考文献：

- [1] 郭文韬, 郭道省, 李 湘, 等. HAPS 系统与卫星通信系统综合组网研究 [J]. 无线通信技术, 2012, (1): 26-32.
- [2] 董加强, 任 松. 基于 OpenGL 的卫星在轨运行可视化仿真系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (6): 824-826.
- [3] 韩晓东, 翟正军, 陆艳洪. 基于 PCI 总线的多功能可定制数据采集系统 [J]. 测控技术, 2011, 30 (10): 15-18.
- [4] 赵 砚. 低轨星座的目标跟踪算法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [5] 杨平利, 黄少华, 江 凌, 等. 卫星运行三维场景及星下点轨迹可视化研究 [J]. 计算机工程与科学, 2012, 34 (5): 101-106.
- [6] 沈 峰. 卫星星座网络路由算法研究及可视化平台设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [7] 李朝瑞. 卫星星座链路选择方法仿真 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [8] 张育林, 范 丽, 张 艳. 卫星星座理论与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.

(上接第 1639 页)

参考文献：

- [1] Gomez C, Paradells J. Wireless home automation networks: a survey of architectures and technologies [J]. Consumer communications and networking, 2010 (6): 92-101.
- [2] 魏叶华, 李仁发, 罗 娟, 等. 基于动态网格划分的移动无线传感器网络定位算法 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45 (11): 1920-1927.
- [3] Mrityunjay S, Monika S, Niranjana L, et al. A tree based routing protocol for mobile sensor networks (MSNs) [J]. International journal on computer science and engineer, 2010, 2 (15): 55-60.
- [4] 孙泽宇, 亢金轩, 李 蒙. 基于 WSN 改进 RSSI 井下定位算法设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (7): 1758-1763.
- [5] Lee E F, Chen W, Li X. A study of radio signal behaviors in complex environments [R]. Michigan: Computer Science Department, Michigan State University, 2006.
- [6] Liu J C, Wang W X, Shang Y T. An Improving Localization Algo-

rism for wireless sensor networks based on DV-Hop [A]. Proceedings of the international conference on measurement, information and control [C], Harbin, 2012.

- [7] 朱 博, 陈 曙. 一种无线传感器网络质心定位改进算法 [J]. 传感器技术学报, 2010, 23 (6): 868-872.
- [8] 王 洁, 王洪玉, 高庆华, 等. 一种适用于移动传感器网络的增强型蒙特卡罗定位跟踪算法 [J]. 2010, 4 (32): 865-858.
- [9] 梅 举, 陈 涤, 辛 玲. 基于蒙特卡罗的移动传感器节点定位优化算法 [J]. 传感技术学报, 2013, 5 (26): 689-694.
- [10] 叶飞虎, 沈 航, 曹 磊, 等. 移动无线传感器网络采样区域自调整的 MCL 定位算法 [J]. 计算机科学, 2011, 12 (38): 49-53.
- [11] Hu L X, Evans D. Localization for Mobile Sensor Networks [A]. Proceedings of ACM MobiCom [C], Philadelphia, Pennsylvania, USA. 2004: 45-57.
- [12] 蒲晓湘, 刘珍杰. WIA-PA 网络中的基于节能的 AODV 路由算法改进 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (5): 1246-1248.