

基于社团结构的天基信息网络结构设计构想与仿真

裴忠民, 任林涛, 熊 伟, 罗章凯

(航天工程大学复杂电子系统仿真重点实验室, 北京 101416)

摘要: 着眼卫星业务一体化发展, 基于分簇的思想和复杂网络理论与方法, 提出一种基于社团结构的天基信息网络结构设计构想, 并基于STK软件进行仿真, 建模生成6社团237个节点的虚拟网络。针对网络中的度分布、介数、聚类系数等静态参量进行分析, 揭示天基信息网络节点连接规律与网络结构特性, 为天基信息网络结构设计提供新的思路和方法参考。

关键词: 社团结构; 复杂网络; 天基信息网络

中图分类号: TN927.3

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200211

Design Conception and Simulation of Space Information Network Structure Based on Community Structure

PEI Zhongmin, REN Lintao, XIONG Wei, LUO Zhangkai

Science and Technology on Complex Electronic System Simulation Laboratory, Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract: Focusing on the integrated development of satellite business, based on the idea of clustering and complex network theories and methods, a design concept of space information network structure based on community structure was proposed and a virtual network with 237 nodes in 6 communities was generated with STK software. Several static parameters such as degree distribution, betweenness, and clustering coefficient in the network were analyzed. The connection rules and structural characteristics of the space information network were revealed.

Keywords: community structure, complex network, space information network

1 引言

当前我国天基信息网络发展建设尚处于起步阶段, 关于天基信息网络的结构设计, 很多专家学者做了大量的研究。吴巍等^[1]提出一种“天网地网双骨干”的天地一体化信息网络结构。MA等^[2]采用虚拟节点策略和卫星分组思想, 针对卫星覆盖率和卫星运行拓扑关系, 提出LEO/GEO双层卫星网络结构设计。装备建设方面, 中国航天科技集团有限公司提出了“鸿雁”卫星星座组网计划^[3]。航天科工集团有限公司的“虹云”“行云”星座计划^[4]以及中国科学院的“多媒体宽带卫星星座”计划等逐步得到实施。世域天基公司提出的“5G+卫星互联网”组网计划^[5]、连尚网络公司提出的Wi-Fi蜂群星座系统等标志着卫星组网研究在航天领域里已成为热点, 特别是以

SpaceX为代表的低轨卫星互联网上万颗高密度卫星组网计划的提出, 标志着卫星组网迅猛发展^[6]。总的来看, 按照发展阶段划分, 卫星组网可分为初始发展阶段的单体卫星天地直联、业务卫星星座局域组网、信息传输一体化组网和网络信息体系多网融合等几个阶段, 如图1所示。

问题在于, 经过多年发展, 卫星组网建设面临卫星通信、导航定位、遥感与环境监测等各类卫星星座独立设计, 已形成事实上的分离“网系”, 不同业务星座互联互通一体化发展的格局尚未形成。要想实现网络信息体系阶段的多网融合, 必须考虑业务整合、前向兼容和继承发展等问题, 推倒重来式的重新设计是不可能的。特别是在轨资源统筹分配和集约利用上还有很大的空间, 可以通过“合并同类项”的方式进行优化。比如, 很多星座都留有测控、管理的装备, 能否考虑在高轨设置统一的管理控制

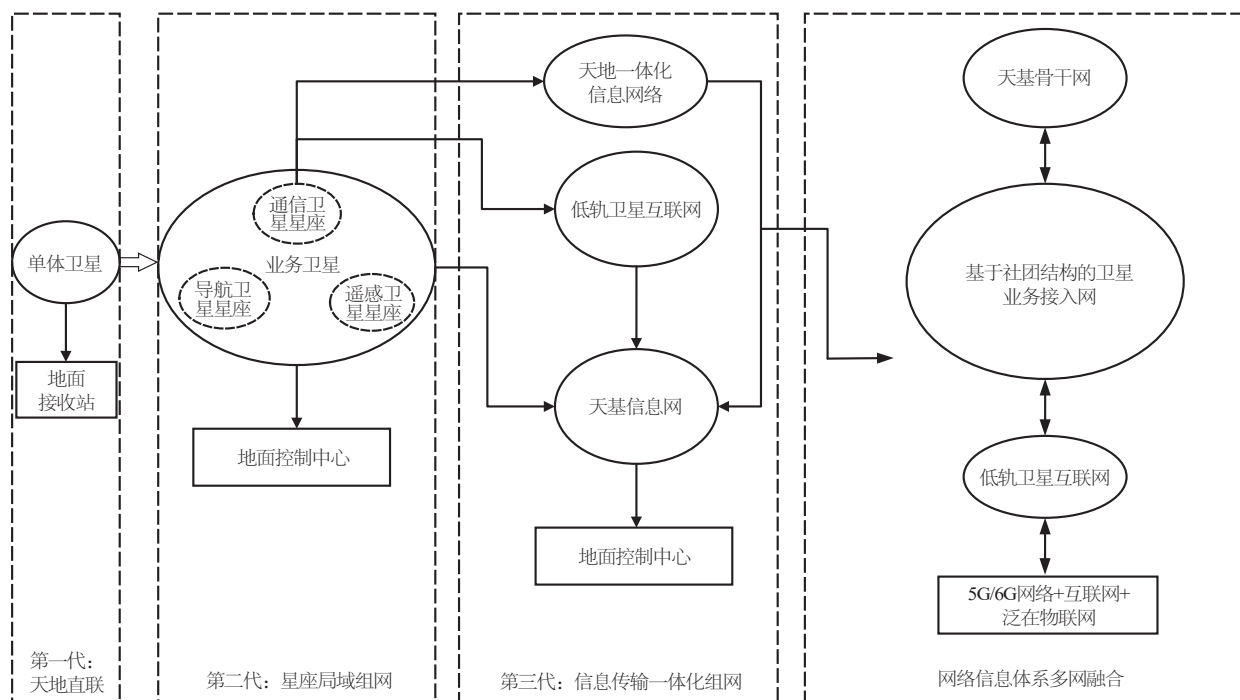


图1 卫星网络发展阶段

节点？各卫星星座之间目前很少存在星间链路的通信，能否实现天基信息网络的有机融合？

复杂网络中的社团结构理论与方法或许为解决以上问题提供了新思路。社团结构是复杂网络中一种高集聚系数的网络结构，社团的构建本质上是一个聚类问题，常见的方法有基于网络节点相对连接频数和基于网络连通性两种^[7]。卫星星座内部连接紧密，星座间连接较少，这和复杂网络中社团结构内部连接紧密、社团间连接稀疏结构的特征极为相似，可以将不同业务类型的卫星星座看作不同社团结构构建网络。这样既保持了各卫星星座业务逻辑的独立性，又考虑到了天基信息网络的整体性。

2 基于社团结构的卫星网络结构设计构想

基于社团结构的天基信息网络结构设计首先要明确卫星网络的组成及结构，刻画构成网络的基本节点，定义各个卫星节点之间的关系。其次网络结构设计要充分考虑各卫星星座业务数据的纵向融会贯通，打破以往只考虑信息传输为目标的设计局限。最后网络结构设计要突出整合的有效性，使每个节点均能充分发挥个体效能，又可实现统一的管控。概括而言，基于社团结构的天基信息网络结构设计，一是充分肯定各卫星星座业务处理逻辑的不同，把通信、导航、遥感、水文气象、地理测绘等不同业务场景的卫星星座看作不同的社团子网进行规划设计，最终形成一个动态、可控、可扩展的业

务一体化的天基信息网络结构；二是综合考虑星上信息处理、通信传输、天基任务规划与资源调度、天基测控与管理、安全防护等功能分工，统筹设计。

基于社团结构的天基信息网络总体结构如图2所示，就空间段而言，可规划为“3层5型5类”的总体结构。天基信息网与空基的临近空间通信平台、航空数据链平台，陆基的电台通信网、移动通信网、互联网，以及海基的海底光缆网、水下无线通信网等构成天空地海多维一体化的网络信息体系基础设施。

“3层”是指结构包括天基骨干网、天基业务接入网、卫星互联网3个层级。“5型”是指在天基骨干网设计中，充分考虑天基组网、全球覆盖的需要，将不同的业务按功能分配给不同的骨干节点承担，实现功能上的负载均衡。

天基骨干网由布设在地球同步轨道的多个天基骨干节点（或高椭圆轨道、倾斜地球同步轨道）通过激光或微波链路互联形成，提供全球骨干中继、天基互联及各类在轨信息服务。在天基组网、全球覆盖的基础上，将不同的业务按功能分配给不同的骨干节点承担，实现网络负载均衡，共设计“通信传输、数据处理与边缘计算、任务规划与资源调度、测控与网管、安全防护”5种基本类型中心节点。

天基业务接入网由布设在高轨或中低轨的若干接入节点组成。面向卫星通信、遥感、导航定位、水文气

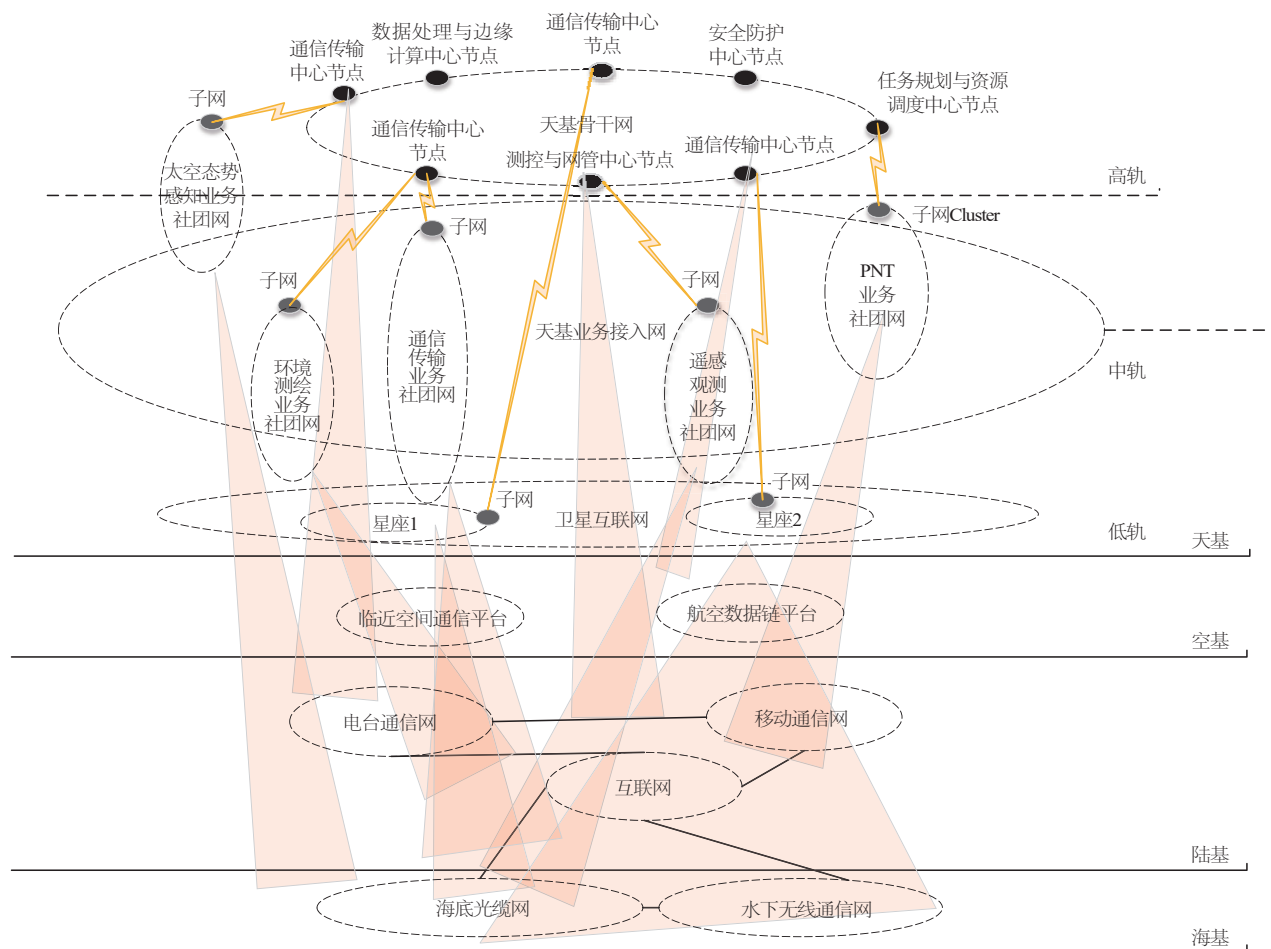


图2 “3层5型5类”天基信息网络总体结构

象、地理测绘等业务场景，引入社团的思想，把各业务卫星星座看作不同的社团子网进行规划设计。按照业务类型的不同，共规划“遥感观测、通信传输、导航定位授时（PNT）、环境测绘、太空态势感知”5类业务子网，业务子网由簇头节点实现与天基骨干网络的连接，同时子网间可协同工作，共同构成天基业务接入网。

卫星互联网是指着眼低轨卫星互联网发展趋势，面向地面终端用户，利用地球低轨道卫星星座提供以宽带移动通信服务和互联网接入服务为主的卫星网络系统。卫星互联网接收骨干网络节点的测控及网管，是卫星通信和互联网融合的新型网络。相比高轨卫星，卫星互联网具有低时延、易于实现全球覆盖的特点。以低轨卫星星座为核心构建的数据传输网络，一方面提供了全球覆盖的通信链路和互联网，为全球无缝连接的数据接入提供了支持，随时随地提供高速低成本的数据传输通道；另一方面提供了根据不同功能搭载的功能性载荷，以及导航增强等服务业务，具备较强的广域服务性和功能扩展性。

3 基于社团结构的天基信息网络结构建模

为深入挖掘天基信息网络中的特性规律，可以把基于社团结构的天基信息网络进一步抽象，将其简化为一个网络科学的学术问题进行量化分析和建模。为得到普适性的量化分析结论和规律，以下研究将天基信息网络中的天基骨干网、卫星地面控制网等同样抽象成复杂网络中的社团进行仿真分析和研究。

3.1 结构建模

(1) 网络节点模型与仿真环境参数设计

为生成体现社团结构的天基信息网络结构模型，本文共设计天基骨干社团网、通信社团网、导航社团网、遥感社团网、低轨互联社团网、地面控制中心社团网6个社团子网，利用STK软件进行仿真分析，每个社团网中节点参数如下。

1) 地面控制中心社团网节点：控制中心节点选择的原则是充分利用我国辽阔的地理位置，尽可能达到能够在卫星节点过境时连接到卫星的最大范围和最长时间。本文

选取6个地面站点，分别为站点1（109.8°E, 34.5°N）、站点2（98.5°E, 39.7°N）、站点3（76.0°E, 39.5°N）、站点4（118.1°E, 24.5°N）、站点5（116.3°E, 40.1°N）、站点6（110.8°E, 19.5°N），不考虑节点的海拔高度，其他参数为STK软件默认设置。

2）天基骨干社团网节点：设置8颗GEO轨道天基骨干卫星节点，其中6颗均匀分布于我国境内上空，经度分别为140°E、128°E、106°E、94°E、82°E和70°E。其余2颗根据剩余GEO轨道的经度范围，分布在27°W和123°W地区上空。

3）通信社团网节点：设置12颗通信卫星节点，同样分布在GEO轨道，其中8颗均匀分布于我国上空，经度分别为30°E、122°E、114°E、106°E、98°E、90°E、82°E、74°E，其余4颗根据剩余GEO轨道的经度范围，分布在13°E、48°W、109°W、170°W地区上空。

4）导航社团网节点：本文采用Walker- δ 星座^[8]来设计卫星布局，星座构型码为N/P/F（卫星数目/轨道平面数/相位因子），共设置27颗导航卫星，分为3个轨道面，每个轨道面9颗卫星，相邻轨道平面卫星相位差设为0。

5）遥感社团网节点：部署64颗低轨LEO遥感卫星，同样采用Walker- δ 星座对卫星进行部署，分为8个轨道面，每个轨道面8颗卫星，相邻轨道平面卫星相位差设为0。

6）低轨互联社团网节点：同样采用Walker- δ 星座部署卫星，分为12个轨道面，每个轨道面10颗卫星，总共120颗卫星，相邻轨道平面卫星相位差设为0。

需要说明的是，在STK仿真时，所有卫星节点都采用相同的设置参数：动力学模型选择J2Perturbation，坐标系选择J2000。设置STK仿真场景的开始时间为2020年5月1日00:00:00，结束时间为2020年5月2日00:00:00，仿真场景历元为2020年5月1日00:00:00，仿真时间间隔为60 s。轨道参数参照国际同类型卫星轨道参数进行设置，不考虑连接频率资源、链路干扰、跟踪卫星天线指向准确性等建立星间链路存在的问题，其余参数为STK软件默认设置，具体见表1。

(2) 不同社团网内部节点连接规则

为简化问题，社团网内部节点之间连接设定3个原则。一是各社团网内部的所有卫星节点都建立连接关系；二是同轨道面上的卫星节点间尽可能多的建立连接关系，异面轨道相同位置编号的卫星节点之间建立连接关系；三是假定在仿真时间内节点之间连接不发生中断，以满足网络连接的稳定性。

(3) 不同社团网之间节点连接规则

不同社团网间节点轨道参数各不相同，通信社团网以及天基骨干社团网中节点相对于地面控制中心社团网节点位置保持固定。这3个社团网中各个节点不受时变性的影响，社团网间节点若有连接，在整个仿真时间内可以一直保持稳定。而遥感社团网、低轨互联社团网以及导航社团网受时变性影响，使整个网络237个节点之间的相对位置时刻处于动态变化之中，无法通过规则描述各个节点的相对位置，因此很难建立像社团网内部节点之间那样固定的连接关系。因此，本文考虑将整个网络节点之间的连接问题拆分成若干个社团间的连接问题。若两个社团节点之间有连接，根据这两个社团节点之间连接情况的STK仿真结果，确定这两个社团网的连接规则。确定完社团网间连接规则后，通过MATLAB软件仿真出整个网络节点之间的连接情况，并根据多次仿真的结果，来模拟整个网络在仿真时间内节点的连接情况。

3.2 天基网络拓扑结构生成

如图3所示，本文利用MATLAB软件对网络连接矩阵进行仿真分析，得出整个天基信息网络的拓扑结构。图3中C1~C6分别表示低轨互联社团网、导航社团网、天基骨干社团网、地面控制中心社团网、通信社团网以及遥感社团网。其中社团网内部节点之间连接用黑色实线表示，社团网间节点连接用红色实线表示。

4 天基信息网络结构参数仿真分析

本文重点研究所生成网络的度及度分布、介数和聚

表1 不同轨道卫星参数

参数	天基骨干节点 (GEO)	通信节点 (GEO)	导航节点 (MEO)	遥感节点 (LEO)	低轨互联节点 (LEO)
半长轴/km	42 164.1	42 164.1	27 906	6 975	7 792
偏心率	0	0	0	0	0
轨道倾角/°	0	0	55	98	52
近地点幅角/°	0	0	0	0	0
升交点赤经	140°E、128°E、106°E、 94°E、82°E、70°E、 27°W、123°W	130°E、122°E、114°E、 106°E、98°E、90°E、82°E、74°E、 13°E、48°W、109°W、170°W	—	—	—
平近点角/°	0	0	—	—	—

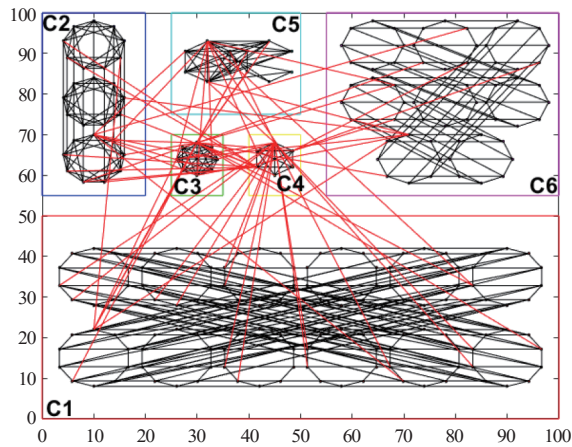


图3 天基信息网络拓扑结构

类系数、平均路径长度等参数来揭示网络拓扑结构的基本规律。所有仿真均通过100次仿真运行计算其平均值，得到的结果见表2。

表2 天基信息网络结构静态参数仿真

A	A0	$\langle k \rangle$	L	D	C
740	64	6.2359	4.6942	10.46	0.2676
7.21%	4.25%	19.68%	45.52%	10.81%	12.53%

由表2可以看出，整个网络平均连接数A（社团网内连接数和社团网间连接数）为740，社团网间平均连接数A0为64，占到总平均连接数的8.65%。网络的平均度 $\langle k \rangle$ 为6.2359，说明各个社团内部和社团之间节点连接较多，节点之间的联系较为紧密；整个网络的平均路径长度为4.6942，该指标的含义为从任意一个节点出发到另外一个其他节点平均需要转4.6942次。对一个具有237个节点，平均有740个连接边的复杂网络来说，节点之间具有较短的平均距离，具备扁平化特征；网络直径平均值为10.46，说明两个节点之间的最远距离需要经过10次连接到达；平均聚类系数值为0.2676，模块度度量值Q为0.5965，说明整个卫星网络节点聚集度较高，且拥有很高的社团网化程度^[9]。

(1) 度与度分布

本文首先对整个网络的度进行仿真分析，得出整个网络的度分布曲线，而后分析不同社团网的节点的度，得出度值大的节点与本社团网以及整个网络的关系。网络的度分布降序图如图4所示，网络的度分布双对数图如图5所示。

从图4可以看出，整个网络度大的节点只有极少数，而多数节点的度值都相对较小，但图5的度分布双对数图中，

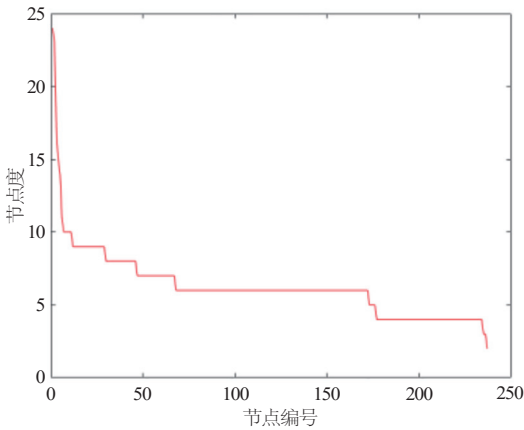


图4 网络的度分布降序图

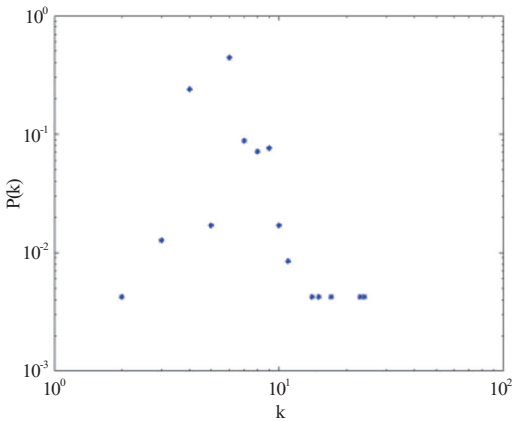


图5 网络的度分布双对数图

度分布呈现不规则的散点状，无法用一条直线进行拟合。综合分析，本文建模生成的网络是一个不规则社团网络。

(2) 介数

节点介数定义为网络中所有最短路径中经过该节点的路径的数目占最短路径总数的比例^[7]。它侧重于描述节点对于信息流动的影响程度，节点介数值越高，该节点对于整个网络就越重要。不同社团网节点介数平均值见表3。

表3 不同社团网节点介数平均值

社团网	C1	C2	C3	C4	C5	C6
节点介数平均值	679.45	400.30	1854.31	4288.57	1017.73	1180.03
比例	7.21%	4.25%	19.68%	45.52%	10.81%	12.53%

从表3中可以看出各个社团网的介数平均值，最高的是地面控制中心社团网C4，平均值为4288.57，占到所有社团网介数平均总值的45.52%；第二高的是天基骨干社团网C3，平均值为1854.31，占到平均总值的19.68%。这两个社团网的平均介数值占到了整个网络的65.20%，可

以得出结论：地面控制中心社团网和天基骨干社团网是整个网络中两个最重要的社团网，网络的信息流在这两个社团网中最为频繁。而其他社团网的平均介数相对较小，与其平均度分布结果相类似。但总的来看，所有社团网的介数平均值没有特别小的，即网络中的节点没有处于特别边缘的，整个卫星网络结构设计较为合理。

(3) 聚类系数

聚类系数是与同一节点相连接的两个节点之间相互连接的概率^[7]。本文在设计节点间连接规则时，分为社团网内部节点连接和社团网间节点连接两个部分。不同社团网聚类系数平均值见表4。

表4 不同社团网聚类系数平均值

社团网	C1	C2	C3	C4	C5	C6
社团网内	0.296 1	0.480 3	0.750 0	0.666 7	0.611 1	0
社团网间	0.150 9	0.059 3	0.031 9	0.015 7	0.026 0	0.004 2

从表4可以看出，不同社团网内部连接聚类系数的平均值各不相同，这是由于不同社团网内部节点连接方式不同引起的。天基骨干社团网C3值最大，达到0.750 0，地面控制中心社团网C4为0.666 7。因为两个社团网节点内部均为全耦合连接，所以聚类系数能达到很高的值。同时高的聚类系数意味着节点高度聚集，信息在这些高度聚集的节点中流转速度很快，由此得出结论为：这两个社团网是整个网络中信息流转速度最快的两个社团网，侧面印证了这两个社团网在整个网络中的重要性；通信社团网C5除了4个境外节点，其余节点全耦合网络连接，平均聚类系数达到0.611 1；导航社团网C2每个轨道内9个节点之间采用连接同轨道左右相邻各3个节点，平均聚类系数为0.480 3；低轨互联社团网C1每个节点连接左右相邻轨道各2个节点，平均聚类系数为0.296 1；遥感社团网C6每个节点在同轨道和异面轨道都只连接相邻的各1个节点，因此平均聚类系数为0。

参考文献：

- [1] 吴巍,秦鹏,冯旭,等. 关于天地一体化信息网络发展建设的思考[J]. 电信科学,2017,33(12):3-9.
WU W, QIN P, FENG X, et al. Reflections on the development and construction of space-ground integration information network[J]. Telecommunications Science, 2017,33(12):3-9.
- [2] YU Q. Space information networks[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2017.
- [3] 中国航天编辑部. “鸿雁”星座谱写我国低轨卫星互联网建设新篇章[J]. 中国航天, 2019(2):6-9.

China Aerospace Editorial Office. "Hongyan" constellation writes a new chapter in Chinese low-orbit satellite Internet construction[J]. Chinese Spaceflight, 2019(2):6-9.

- [4] 陈静. 虹云工程首星[J]. 卫星应用, 2019(3):77.
CHEN J. First star of hongyun engineering[J]. Satellite Application, 2019(3):77.
- [5] 郭正标. 天地大融合时代, 卫星通信何去何从——融合5G的卫星网络方案建议[J]. 卫星与网络, 2018(9):22-26.
GUO Z B. In the era of great integration of space and earth, where does satellite communication go?——5G satellite network solution suggestions[J]. Satellite and Internet, 2018(9):22-26.
- [6] 梁晓莉, 陈建光, 姚源, 等. 国外低轨卫星互联网发展现状分析[C]//第十五届卫星通信学术年会论文集. 北京:[出版社不详], 2019:19-22.
LIANG X L, CHEN J G, YAO Y, et al. Analysis of the development status of foreign LEO satellite internet[C]//Proceedings of the 15th Annual Meeting of satellite communication. [S.l.:s.n.], 2019:19-22.
- [7] 孙奎菁. 复杂网络算法与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2015.
SUN X J. Complex network algorithms and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [8] 张雅声, 莫薇. 星座设计与仿真[J]. 装备学院学报, 2016, 27(4):49-52.
ZHANG Y S, MO W. Simulation and designing of constellation[J]. Journal of Academy of Equipment, 2016, 27(4):49-52.
- [9] BLONDEL V D, GUILLAUME J L, LAMBIOTTE R, et al. Fast unfolding of communities in large networks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2018(10):P10008.

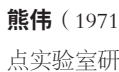
[作者简介]



裴忠民 (1975—)，男，博士，航天工程大学复杂电子系统仿真重点实验室副研究员、硕士生导师，主要研究方向为复杂网络、弹性空间信息系统等。



任林涛 (1989—)，男，航天工程大学复杂电子系统仿真重点实验室硕士生，主要研究方向为系统科学、复杂网络。



熊伟 (1971—)，男，博士，航天工程大学复杂电子系统仿真重点实验室研究员，主要研究方向为通信与信息系统。



罗章凯 (1989—)，男，博士，航天工程大学复杂电子系统仿真重点实验室助理研究员，主要研究方向为计算机科学与技术、系统科学。