

融合功能特征和拓扑结构的卫星物联网关键节点分析

蒋成洋¹, 张瀚阅², 孔槐聪¹, 刘笑宇¹, 欧阳键¹

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2. 南京邮电大学波特兰学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 针对现有卫星网络关键节点分析方法主要面向静态网络、评价指标单一、未针对网络特殊性考虑节点功能等问题, 提出了一种融合功能特征和拓扑结构的卫星物联网关键节点分析方法。首先, 将动态卫星网络进行离散时间划分, 得到拓扑快照序列图; 其次, 考虑卫星星下点的地理位置和覆盖时间, 构建时空业务流量模型, 获得卫星的物联网业务流量; 再次, 定义了基于权流量熵的卫星节点功能重要度指标以及基于网络节点的度和介数的卫星节点拓扑重要度指标, 进一步提出采用灰色综合评价法对这两个方面的指标进行融合, 得到综合的关键节点分析方法; 最后, 仿真结果表明, 与现有方法相比, 所提方法能够有效提升卫星网络中关键节点识别的准确度, 可为动态卫星网络关键节点分析提供一种技术手段。

关键词: 卫星物联网; 关键节点; 权流量熵; 灰色综合评价

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.WLW24037

Analysis of key nodes fusing functional characteristics and topology structure in satellite Internet of things

Jiang Chengyang¹, Zhang Hanyue², Kong Huaicong¹, Liu Xiaoyu¹, Ouyang Jian¹

1. School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Portland Institute of Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

Abstract: Aiming at the existing satellite network key node analysis methods which are mainly oriented to the static network and employ a monolithic evaluation index and overlook the node function for the network specificity, a satellite IoT key node analysis method integrating the functional characteristics and topology structure was proposed. Firstly, the dynamic satellite network was divided into discrete time to get the topology snapshot sequence graph. Secondly, considering the geographic location and coverage time of subsatellite points, a spatio-temporal transaction traffic model was constructed to obtain the IoT transaction traffic of satellites. Next, the functional importance index of satellite nodes based on the entropy of the weight traffic and the topological importance index of satellite nodes based on the degree and betweenness of the network nodes were defined, and it was further proposed to use the gray comprehensive evaluation to fuse the indexes of these two aspects to obtain a comprehensive key node analysis method. Finally, the simulation results show that compared with the existing methods, the proposed method can effectively improve the accuracy of key node identification in satellite networks, thus providing a technical means for the analysis of key nodes in dynamic satellite networks.

Key words: satellite Internet of things, key nodes, weight-flow entropy, comprehensive gray evaluation

收稿日期: 2024-04-15; 修回日期: 2024-07-29

通信作者: 欧阳键, ouyangjian@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61801234); 复杂电子系统仿真实验室基础研究课题 (No. 614201003012206)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 61801234), The Research Project of Science and Technology on Complex Electronic System Simulation Laboratory (No. 614201003012206)

0 引言

传统的地面物联网已经拥有完整的体系，而卫星物联网作为物联网与卫星通信的结合正处于快速发展的阶段^[1-3]。它主要由低轨道（LEO, low earth orbit）卫星和中轨道（MEO, medium earth orbit）卫星构成。相比于地面物联网，卫星物联网具有覆盖范围广、通信容量大、不受地理条件限制、高动态性和扩展能力强等优势^[4-6]，能够应用于遥感监测、气象预报、环境监测、智慧城市等多个领域，有望成为6G的重要组成部分^[7-9]。基于此，加强卫星物联网的建设是实现未来万物互联和全球覆盖的必然要求，具有极其重要的应用价值。然而，卫星物联网复杂多变，组网难度大，且网络的通信节点设施和通信链路不具备如同传统地面通信节点设施的隐蔽性，易受到干扰，导致网络产生局部连通性损坏，从而使整个网络性能下降甚至瘫痪，并且后续难以修复。因此，发掘网络的关键卫星节点，对其进行重点管控和保护，可以保证网络安全性，提高网络鲁棒性。

目前，针对关键节点分析问题，国内外学者已经展开了广泛的研究。最初，社会学网络分析领域中的相关研究提出节点重要性的概念^[10]。与网络中的普通节点相比，重要节点对网络的影响更大^[11-12]，此概念后来被扩展到其他网络中，成为分析复杂网络中节点重要性的基础方法，可以准确分析出节点在一个网络中的影响力，进而表示节点在该网络中的重要程度。针对复杂网络中关键节点分析问题，传统的方法是基于复杂网络拓扑结构而提出的各类结构中心性评价指标，包括度中心性（DC, degree centrality）、介数中心性（BC, betweenness centrality）、接近中心性（CC, closeness centrality）、特征向量中心性（EC, eigenvector centrality）^[13]。其中，DC以节点邻居数目越多，判定节点越关键，具有简单、直观的优点，但是只能体现网络的局部特征。BC是依据经过节点的路径数目与总节点对路径数目的占比来衡量节点重要性的，能够体现出网络全局特征，但是侧重于网络边信息。CC是依据节点到其他所有节点的距离来衡量节点重要性，也能体现网络全局特征，但也是侧重于边信息。EC认为节点的邻居越关键，该节点的重要性越高，其能够体现范围稍大的局部特征。上述几种方法都是基于单一

指标对节点重要度进行评估的，且每种方法各有侧重，会导致评估结果准确性较低且不具备全面性。

为了解决上述问题，文献[14]采用将不连通节点对数、剩余节点对最短距离、增量和生成树数减少值这3个单指标进行归一化的综合方法，使得网络关键节点分析更具全面性和鲁棒性。文献[15]基于K-Shell算法，综合自身和邻居节点对自己重要度的影响，同时结合BC，从局部和全局两个角度共同评估节点重要度。该方法提升了关键节点识别的准确性，但并不适用于动态网络。还有些学者利用邻居节点的重要度贡献构建重要度评估矩阵进行关键节点分析。其中，文献[16]将节点自身属性和 m 阶邻居节点的属性构成节点重要度评估矩阵，充分体现了节点的局部重要度，但是缺失全局重要度的考量；文献[17]针对时变网络拓扑，建立了划分时间片的加权静态网络拓扑集，结合节点的介数、紧密度和距离确定了节点的重要度矩阵，进一步定义了节点的重要度，综合考虑了节点的全局和局部位置重要性，进行关键节点分析，其适用于时变网络，但没有考虑卫星节点的其他功能特征。

总的来看，尽管国内外学者提出的关键节点分析方法具有很高的参考价值，但其仍存在一些不足，主要体现在：一是现有方法指标较为单一，网络拓扑结构分析不够全面，会造成分析结果在某些网络中评估不够准确；二是多数方法面向静态网络，没有考虑很多无线网络具有高动态时变性；三是对于特定场景网络，现有方法未能将节点的功能特征与拓扑结构进行良好的融合。以更加准确地分析节点重要度，如分析卫星网络节点重要性时，可以考虑卫星节点的业务流量等。

综合上述不足可知，提高卫星网络关键节点分析的准确性需要考虑卫星网络的特殊性，联合功能和结构两方面制定更加适合此网络的评估方法。因此，本文提出了一种融合功能特征和拓扑结构的卫星物联网关键节点分析方法。首先，将动态的卫星物联网进行时间片划分，得到静态拓扑图序列；其次，针对网络关键节点分析方法仅考虑网络拓扑结构，而忽略了节点本身功能这一问题，结合卫星网络的特殊性，首次考虑了卫星业务流量对卫星关键节点分析的影响，通过建立卫星时空业务模型获得卫星业务流量，并参考信息熵的概念定义了基于权流量熵的节点功能特征重要度指标，同时定义了基

于度和BC的卫星节点的拓扑结构重要度；最后，采用灰色综合评价法对时间加权后的两方面重要度进行融合得到最终分析方法。

1 模型建立

复杂网络具有其严格的定义：具有自组织、自相似、吸引子、小世界、无标度中部分或全部性质的网络称为复杂网络^[18]。在研究网络时，一般将其中的个体抽象为点，将网络中个体之间在某种性质上的关系抽象为边。生活中的许多关系都可以由复杂网络来表示，如人们的社会关系网络^[19]、城市中的交通路线网络^[20-21]、计算机网络^[22]、电力网络^[23-24]等。本文研究的卫星物联网中的卫星映射到复杂网络模型中为网络节点，而卫星之间的通信连接可看作网络中的连边，众多的卫星等航天器构成了复杂网络。卫星网络与复杂网络具有结构和特征上的相似性，因此，复杂网络相关知识可以作为研究卫星网络的可靠理论基础支撑。

1.1 卫星物联网拓扑模型

卫星物联网与传统地面通信网络的一个主要区别是：地面通信网络的节点和链路均是固定的，不随时间变化，而卫星网络具有很强的时间动态性，在不同时间的节点位置和节点间链路都会发生变化，进而导致其网络拓扑发生变化。基于此，时变卫星物联网可以建模为

$$G = (V, E(t)), t \in (0, T) \quad (1)$$

其中， $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 为网络的节点集合， N 为网络节点数目， $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{M(t)}\}$ 为网络节点间的链路集合， $M(t)$ 为时间 t 时的链路数目， T 为所研究的星座运行总时长。

本文考虑一种简单的时效网络建模方式，将时效网络利用快照的方式变成多个静态网络进行分析，不同拓扑图的节点数不变，节点之间的连接关系变化。在整个卫星网络研究周期 T 内，若出现链路断连或建立连接，则卫星网络拓扑出现变化，拓扑持续时间为两次链路变化的时间间隔。

在整个研究周期 $(0, T]$ 内，设链路发生断连或重新建立的时刻为 t_p ，若周期内 t_p 出现的次数为 $m-1$ ，则不同网络拓扑的数量应为 m 个。不同卫星网络拓扑序列集合可以表示为

$$G(t) = \{G_1, G_2, \dots, G_m\} \quad (2)$$

研究周期内拓扑的存在时间序列为 $[(0, t_1), (t_1, t_2), \dots, (t_{(m-2)}, t_{m(m-1)}), (t_{(m-1)}, T)]$ 。计算得到卫星网络拓扑的持续时间，记为 $\mathbf{p} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m)$ 。进一步依据拓扑持续时间长短，为拓扑分配不同的权重，得到权重为

$$\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_m) = \left(\frac{\tau_1}{T}, \frac{\tau_2}{T}, \dots, \frac{\tau_m}{T} \right) \quad (3)$$

1.2 卫星时空业务流量模型

在卫星物联网中，卫星的业务流量可以在一定程度上反映卫星轨迹的关键程度以及卫星处理信息的能力，同时也能够体现卫星的实时通信负载大小，因此，卫星业务流量也是影响其关键性的重要信息。卫星业务流量的获取方式为LEO、MEO卫星模拟抓取地面业务流量，因此须考虑以下因素。

1) 位置因素：地理环境的差异、陆地各大洲的经济发展程度不同、国内与国外等位置因素都会导致对卫星通信业务的需求不同。

2) 时区因素：各地区在24 h内的业务需求同样存在明显差异，此时间应为当地时间，同时为不同时区设置时间加权因子。

3) 相连卫星因素：在卫星物联网中，每颗卫星在不同时刻的业务流量差异较大，因此可以制定星间业务流量传递方案以最大化卫星资源利用率。

综合考虑上述因素，卫星时空业务流量建模过程如下。

1) 划分地面网格，并依据位置设置网格中的业务流量密度值。

2) 获取卫星实时位置信息，当卫星物联网确定后，可通过STK工具获取星下点，并根据卫星覆盖能力计算覆盖网格编号。

3) 根据格林尼治时间计算当地时间，对卫星覆盖的编号网格流量进行求和，再乘以时间加权因子即当前样本时刻的卫星业务流量值。

4) 根据某颗卫星的星间链路信息，获取星间传递的业务流量，最终结合地面获取的业务流量值作为卫星业务流量。

2 卫星关键节点分析

卫星网络承担着信息处理和转发任务，卫星节点存在流量负载且卫星之间也存在信息交互，因此节点的重要程度不仅取决于网络拓扑结构，还应取

决于卫星节点的业务流量值。本文所提出的融合业务特征和拓扑结构的卫星物联网关键节点识别方法具体内容如下。

2.1 信息熵

信息熵 (IE, information entropy) 是信息论中的重要概念, 由美国学者香农提出。信息熵可用于衡量信息的不确定性和信息量大小, 假设离散随机变量 X 的取值范围为集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 对应概率集合为 $\{p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)\}$, 则 X 的信息熵为

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \cdot \ln(p(x_i)) \quad (4)$$

由信息熵公式可知, 随着 X 取值数量越多, 信息熵越大; 当取值数量固定时, X 取到各值的概率越均匀, 信息熵越大^[25-26]。

2.2 网络的功能重要度

本文基于卫星时空业务流量模型获取流量数据, 借助信息熵的定义引出了节点权流量熵的概念。节点的功能重要度由自身的权流量熵与其邻居节点的权流量熵共同定义, 网络拓扑功能重要性分析示意如图1所示。

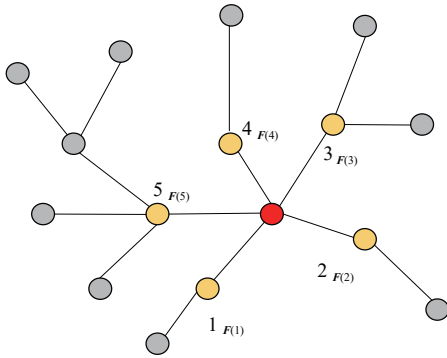


图1 网络拓扑功能重要性分析示意

设获取的 N 个卫星的业务流量为 $\mathbf{F} = [\mathbf{F}(v_1), \mathbf{F}(v_2), \dots, \mathbf{F}(v_N)]$, $\mathbf{F}(v_i) = (f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{il})$, l 为卫星节点 i 的流量样本数。在某个时间片内, 包含所有卫星流量均值 $\mathbf{F}_T$ 为

$$\mathbf{F}_T = [\mathbf{f}(v_1), \mathbf{f}(v_2), \dots, \mathbf{f}(v_N)] \quad (5)$$

卫星节点 i 的所有邻域卫星节点的业务流量均值之和 $\mathbf{F}_s(v_i)$ 为

$$\mathbf{F}_s(v_i) = \sum_{v_j \in \Gamma(v_i)} \mathbf{f}(v_j) \quad (6)$$

其中, $\Gamma(v_i)$ 表示节点 i 的邻域节点集合。

节点 i 的权流量熵 $\mathbf{F}_E(v_i)$ 为

$$\mathbf{F}_E(v_i) = - \sum_{v_j \in \Gamma(v_i)} \frac{\mathbf{F}(v_j)}{\mathbf{F}_s(v_i)} \cdot \lg \left(\frac{\mathbf{F}(v_j)}{\mathbf{F}_s(v_i)} \right) \cdot \lambda \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{\mathbf{F}(v_i)}{\mathbf{F}_s(v_i)} \quad (8)$$

其中, λ 为修正因子, 用于体现节点本身流量绝对值大小对熵值的提升效果。若没有 λ 的存在, 当某个节点的邻居节点数目相同, 且所有节点的流量均值都为1或都为100时, 所计算出的流量熵会相等。

最后, 计算所有节点的功能重要度。选取节点的所有邻域节点的权流量熵的和与流量系数矩阵之积作为节点 i 的功能重要度 $\mathbf{I}_{MF}(v_i)$, 其表达式为

$$\mathbf{I}_{MF}(v_i) = \mathbf{F}_E(v_i) + \mathbf{u} \sum_{v_j \in \Gamma(v_i)} \mathbf{F}_E(v_j) \quad (9)$$

其中, 流量系数矩阵 $\mathbf{u}$ 为节点 i 邻域节点的流量均值与总节点流量均值之和的占比, 其表达式为

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{F}_A(v_i)}{N(v_i) \sum_{j=1}^N \mathbf{F}(v_j)} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{F}_A(v_i)$ 表示包含节点 v_i 的所有邻居节点流量均值的矩阵, $N(v_i)$ 表示节点 v_i 的邻居节点数目。

2.3 网络的拓扑重要性

节点度是描述网络中节点的简单而重要的性质, 也是分析节点重要度最根本的指标, 节点 v_i 的度值表示该节点的连边数目 k_i 。 $D(v_i)$ 表示节点的DC, 其表达式为

$$D(v_i) = \frac{k_i}{N-1} \quad (11)$$

节点介数是一种表示节点全局属性的结构指标, 可以体现节点对整个网络的影响。节点BC表示所有除该节点外的节点对的最短路径中经过该节点的路径的占比。 $B(v_i)$ 表示节点 i 的BC, 其表达式为

$$B(v_i) = \frac{2 \cdot \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}}{N(N-1)} \quad (12)$$

其中, g_{jk} 表示节点 j 和节点 k 之间所有最短路径的数目, $g_{jk}(i)$ 表示节点 j 和节点 k 之间所有最短路径中经过节点 i 的最短路径数目。

针对现有卫星网络关键节点分析指标单一的问

题,考虑DC能够在一定程度上反映节点的局部重要度,而BC能够在一定程度上反映节点在网络中的信息处理能力以及与整个网络的信息交互能力和信息传递效率,因此局部和全局的结构指标相结合比较适合作为卫星网络的拓扑重要度分析指标,记节点 v_i 的拓扑重要度为 $I_{MC}(v_i)$,其表达式为

$$I_{MC}(v_i) = \alpha \cdot B(v_i) + (1 - \alpha) \cdot D(v_i) \quad (13)$$

其中, α 为权衡度中心性和BC的参数,若节点在网络中的直接连接更重要,则可以赋予DC更大的权重;若节点在网络中的桥梁作用更重要,则可以赋予BC更大的权重。

2.4 基于灰色综合评价的卫星物联网关键节点分析方法

上述卫星关键节点分析指标涉及两个方面,分别为拓扑结构和业务流量功能,本文依据这两个方面对卫星节点重要性进行分析。两种指标之间的关系是一种灰色关系,且灰色综合评价是一种多因素分析方法,它是以各指标的数据为依据,用灰色关联度来描述因素之间相关性的强弱^[27-28],因此本文利用灰色综合评价法对网络中各节点进行评估。

设卫星通信系统节点集合为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$,指标集合为 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_d\}$ 。其中具体指标分别为功能重要度和拓扑重要度,分别表示各个拓扑加权后的功能重要性和拓扑重要性。

首先,对数据进行预处理并根据节点集合和指标集合构建评估矩阵。其中数据预处理过程包括数据的正向化、无量纲化等。

其次,构建最优指标序列,即理想最重要卫星的各个指标。一般来说,选取每个指标的最大值。理想卫星的指标为

$$q_{0,j} = \max_{i=1,2,\dots,N} (q_{i,j}), j = 1, 2, \dots, d \quad (14)$$

再次,以最优指标序列为参考序列,每个评价对象的指标序列为比较序列,计算第 i 个评价对象的第 j 个指标与该指标最优值的灰色关联系数。理想卫星 v_0 和卫星 v_i 在第 j 个指标的关联系数记为 $r_{ij}(v_{ij}', v_{0j}')$,简记为 r_{ij} ,其表达式为

$$r_{ij} = \frac{\min_{i,j} |v_{ij}' - v_{0j}'| + \rho \max_{i,j} |v_{ij}' - v_{0j}'|}{|v_{ij}' - v_{0j}'| + \rho \max_{i,j} |v_{ij}' - v_{0j}'|} \quad (15)$$

最后,计算卫星节点 v_i 与理想卫星节点 v_0 的灰色关联系数 r_i ,将其作为重要度指标, r_i 的表达

式为

$$r_i = \frac{1}{d} \cdot \sum_{j=1}^d \omega_j \cdot r_{ij} \quad (16)$$

其中, $\omega_j, j = 1, 2, \dots, d$ 为各指标的重要度权重。

利用卫星节点 v_i 的重要度 r_i 可以计算出各个卫星节点与理想卫星节点的灰色关联系数,进而比较各卫星节点的重要性,并从高到低进行排序。

2.5 关键节点分析算法步骤

综合上述过程,本文所提出的卫星物联网关键节点分析算法步骤如下。

1) 对时变卫星网络进行时间分片,获取不同的网络拓扑及其存在时间,进而得到卫星网络每个拓扑的邻接矩阵和相应的权重。

2) 根据式(8)计算卫星网络每个静态拓扑中卫星节点的功能重要度。

3) 根据式(12)计算卫星网络每个静态拓扑中卫星节点的拓扑重要度。

4) 对所有静态拓扑的功能重要度和拓扑重要度求加权和,得到时变网络拓扑的功能重要度和拓扑重要度。

5) 采用灰色综合评价方法,根据式(16)计算每颗卫星的综合重要度,实现从拓扑结构和业务流量功能两个方面进行多指标综合关键节点分析。

3 仿真分析

3.1 评估指标

1) 相对网络效率 (RE, relative efficiency)

网络效率 E_v 是网络中所有两两节点之间距离的倒数的平均值,是一个能够量化网络连通性和通信效率的指标^[29-30],因此经常用攻击节点后对应网络效率的变化来验证关键节点识别结果的正确性。其具体计算式如下

$$E_v = \frac{1}{N(N-1)} \cdot \sum_{i \neq j \in V} \frac{1}{d_{ij}} \quad (17)$$

其中, d_{ij} 为两个节点之间的距离,若两个节点未连通,距离视为无穷大; V 表示网络节点集合。为了更好地对比攻击前、后的网络效率,需要将网络效率进行归一化处理,得到RE,其计算式如下

$$RE = \frac{E_{v'}}{E_v} \quad (18)$$

其中,RE表示相对网络效率, E_v 、 $E_{v'}$ 分别为网络节点被攻击前、后的网络效率; V 、 V' 分别为节点被攻击前、后的节点集合。

2) 相对剩余流量 (RF, relative flow)

相对剩余流量指的是在攻击网络中的某个节点后, 除去该节点与地面站的通信流量和与其邻接卫星节点的通信流量, 剩余流量与原总流量的比例。其在一定程度上可以描述网络的性能, 具体计算公式为

$$RF = \frac{\sum_{v_i \in V'} F(v_i)}{\sum_{v_i \in V} F(v_i)} \quad (19)$$

其中, $F(v_i)$ 表示卫星节点 v_i 与地面站和相连卫星的总通信流量, RF 表示相对剩余流量。

3.2 仿真分析

本文利用 STK 软件构建双层卫星物联网进行分析, 设置了 6 颗 LEO 卫星 (1 号~6 号) 以及 4 颗 MEO 卫星 (7 号~10 号), 总仿真周期为 6 h。仿真通过 STK 获取卫星星座之间的链路连接起始时刻以及各个时刻卫星星下点位置, 以此统计卫星流量。双层卫星物联网参数设置见表 1, 双层卫星物联网如图 2 所示。

表 1 双层卫星物联网参数设置

卫星编号	轨道高度/km	轨道倾角/(°)	轨道周期/min
1	1 688	86.9	120
2	1 688	98.2	120
3	1 688	48	120
4	1 688	48	120
5	1 688	52	120
6	1 688	52	120
7	10 365	45	360
8	10 365	45	360
9	6 400	56	240
10	6 400	56	240

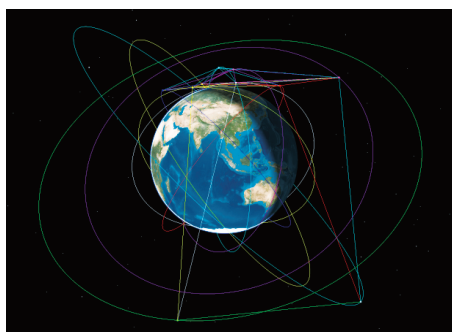


图 2 双层卫星物联网

有些链路在仿真周期内一直连接, 而有些链路在仿真周期内有多个连通时间段, 这会导致卫星拓扑变化频率增大。

本文根据各链路连接起止时间的数据分析得出, 在仿真时间内共有 218 个不同的拓扑图, 各个网络拓扑持续时间如图 3 所示, 可以看出不同拓扑存在时间差异很大, 但是大多数的拓扑存在时间均小于 200 s。持续时间最长的拓扑对应编号为 122 号, 持续时间为 618 s, 其次为 114 号的 558 s, 70 号的 511 s, 以及 147 号的 467 s, 也有一些存在时间非常短的拓扑。一些存在时间较短的拓扑对于仿真结果影响不大, 因此本文剔除了存在时间低于 30 s 的拓扑。

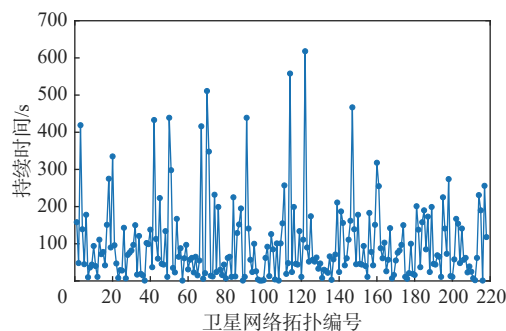


图 3 各个网络拓扑持续时间

根据各个卫星链路通断的起止时间, 获取相对应时间内网络拓扑的邻接矩阵, 用于分析网络节点拓扑重要度。根据卫星物联网业务流量模型, 获取各个卫星在相应的静态拓扑持续时间内的流量序列值, 用于分析卫星网络节点的功能重要度。

网络拓扑的差异以及不同时间段内卫星流量均值的不同, 会导致不同时间段内卫星网络拓扑的卫星节点重要度存在差异。两个存在时间较长的拓扑及其对应分析结果如下。

122 号网络拓扑关键节点分析如图 4 所示, 包括网络拓扑图、拓扑持续时间段内各个卫星节点的流量均值以及最终的综合重要度分析结果。从图 4 可以看出, 较为关键的卫星节点为 10 号、5 号、7 号、6 号等。10 号在拓扑持续时间段内流量均值较大, 并且处于卫星网络拓扑的枢纽位置, 故根据本文的分析方法得到 10 号为此拓扑中最重要的卫星节点。而 8 号、9 号虽然为 MEO 卫星, 但是其在此拓扑存在时间段内流量均值较低, 相对于 LEO 卫星并没有优势, 且其处于拓扑中不重要的位置, 故重要度较低; 1 号、2 号、4 号由于卫星流量值较低, 以及位置相对不重要, 在卫星网络拓扑中的重要度也较低。

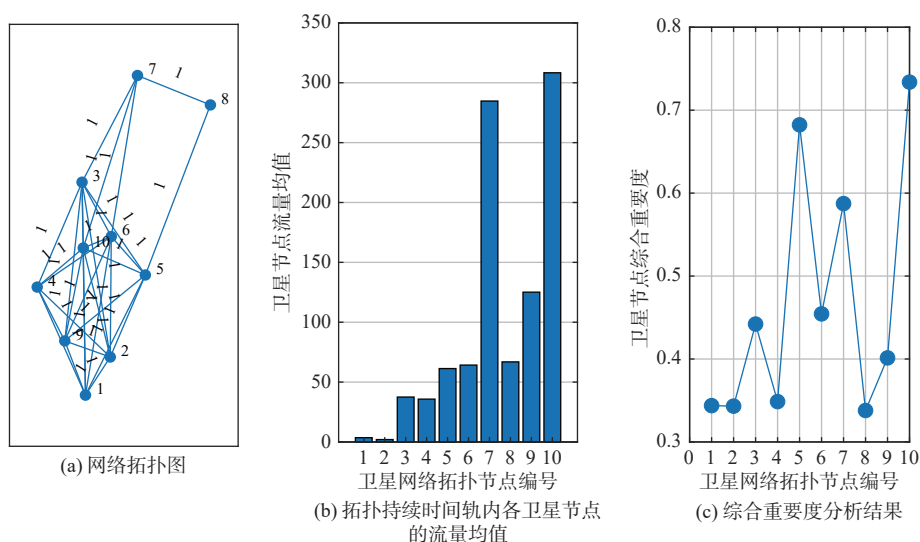


图4 122号网络拓扑关键节点分析

114号网络拓扑关键节点分析如图5所示,由图5可以看出,10号卫星和7号卫星在此拓扑存在时间内均有较高的流量均值,但是由于10号卫星处于网络拓扑内更为枢纽的位置,其拓扑重要度较高,其综合重要度相对于7号卫星更高。同样地,8号、9号卫星在此拓扑存在时间内的流量均值较低,且位置相对不重要,8号卫星的流量均值与位置重要度均不如9号,但是其综合重要度比9号高,这是由于8号与高重要度的7号卫星相连,而9号没有,表明本算法的性能不仅取决于节点本身重要度,也会受该节点邻居节点的重要度的影响。

时变卫星物联网节点重要性如图6所示。图6分别展示了拓扑重要度、功能重要度以及综合重要

度结果。首先,由图7可知,仅通过功能重要度或拓扑重要度得到的不同节点重要度相差较大,而综合重要度折线上许多点位于两条单角度重要度折线之间,说明综合重要度可以更加均衡合理地分析卫星节点关键性;其次,分析综合重要度折线得出,最关键卫星节点是7号卫星,且7号~10号卫星的重要度均高于1号~6号卫星。图4、图5中的MEO卫星节点重要度低于LEO卫星节点重要度,是因为拓扑存在时间内,该MEO卫星节点流量值未达到较高水平,但是从整个仿真周期来看,MEO卫星的流量均值大于LEO卫星。结果表明,在双层卫星物联网中,MEO卫星处于更加核心的位置,其连接状态较LEO卫星而言也更稳定,并承担了更多的信

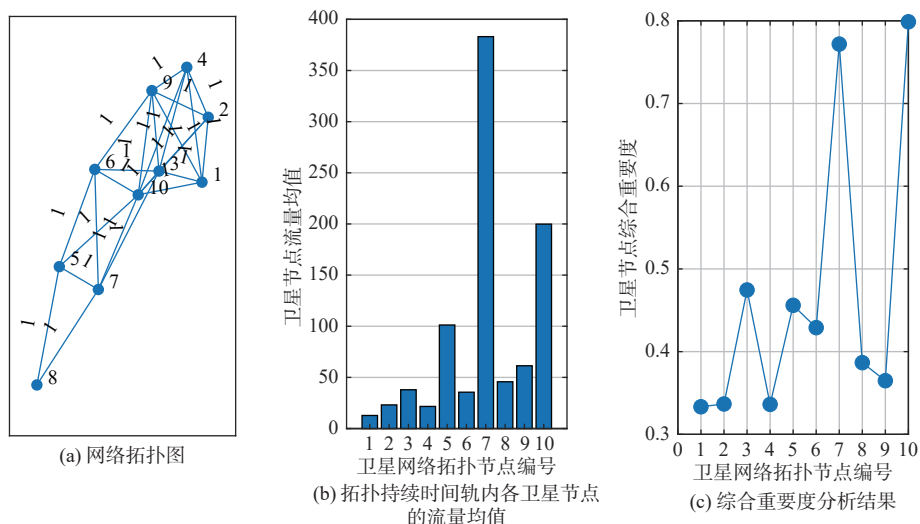


图5 114号网络拓扑关键节点分析

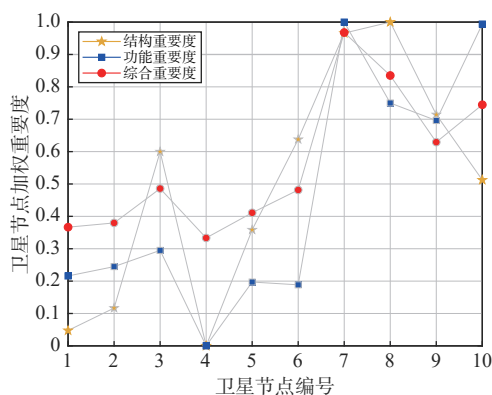


图6 时变卫星物联网节点重要性

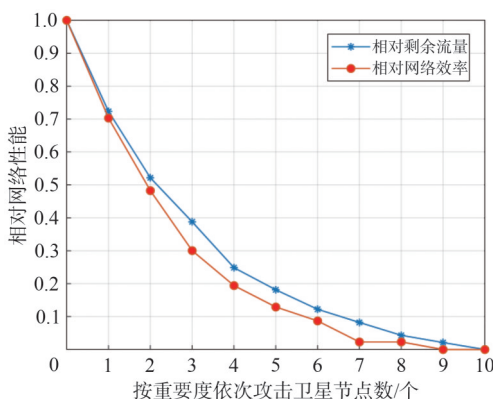


图7 攻击网络节点相对网络性能变化

息传输和信息处理的任务，由此验证了本文方法的正确性和有效性。

为了验证方法的有效性，本文根据获取的卫星节点重要度排名，利用节点攻击法依次攻击重要度排名靠前的节点，分析其相对网络效率和相对剩余流量，攻击网络节点相对网络性能变化如图7所示。由图7可知，相对网络效率开始的降幅较大，后面降幅较小，且攻击到第3个节点时，相对网络效率降低到30%左右，说明最开始攻击的节点对相对网络效率的影响较大。另外，相对剩余流量变化趋势与相对网络效率类似，且在攻击到第3个节点时，相对剩余流量降低到40%左右，说明前面攻击的节点对相对剩余流量性能影响较大。综合两个指标变化情况可以得到，攻击排名靠前的节点会导致这两个方面的网络性能均下降较多，也进一步验证了本文方法的有效性。

为了方便对比，本文对重要度进行了归一化，不同方法关键节点识别结果对比见表2。由表2可得出以下结论。

1) 在由DC和CC方法得到的结果中，卫星节

点重要度值均比较高，且区分度较低，某些节点重要度过于接近，识别效果不好，因此两种方法在此网络中并不适用。

2) 在由BC方法得到的结果中，部分节点的重要度过低，其他节点的重要度过高，重要度差异过大，因此在该卫星网络中的适用性也不高。

3) 在由流量方法得到的卫星节点重要度结果中，LEO卫星节点之间的重要度差异过小，MEO卫星节点之间也是如此，该结果仅能说明在流量重要度上MEO卫星整体比LEO卫星大，但无法很好地分辨出MEO卫星与LEO卫星之间的重要度差异。

4) 本文方法得到的重要度结果区分度较好，重要度差距适当，并且解决了其他结构性指标不全面、各有侧重的问题，能够准确有效地识别出卫星网络中的关键节点，也验证了本文方法的优越性。

表2 不同方法关键节点识别结果对比

卫星 编号	识别结果				
	本文方法	DC	BC	CC	流量
1	0.378 8	0.913 0	0.047 5	0.945 2	0.570 6
2	0.392 4	0.945 4	0.116 8	0.963 7	0.586 4
3	0.502 0	1.000 0	0.599 7	1.000 0	0.613 8
4	0.344 4	0.821 2	0.014 5	0.877 2	0.4523
5	0.424 9	0.710 7	0.358 5	0.842 3	0.560 3
6	0.497 6	0.918 5	0.637 8	0.967 2	0.555 6
7	1.000 0	0.873 0	0.965 9	0.937 8	1.000 0
8	0.862 8	0.850 9	1.000 0	0.927 8	0.863 1
9	0.650 1	0.817 7	0.714 3	0.907 0	0.833 5
10	0.769 5	0.784 7	0.512 5	0.897 9	0.996 7

4 结束语

本文将卫星网络建模为拓扑图，针对卫星网络的高动态性，建立了分时间片的卫星网络拓扑模型，得到卫星网络拓扑图序列，并进一步提出了一种基于时空流量特征的卫星网络关键节点分析方法。首先，建立了卫星时空流量模型，定义了权流量熵的概念用于分析卫星节点的功能特征重要度，同时借助卫星节点的度和BC定义了卫星节点的拓扑结构重要度；其次，根据拓扑图权重计算得到时变卫星

网络的业务流量功能和拓扑结构重要度；最后，利用灰色综合评价方法从两个角度分析卫星网络节点重要度，得到卫星网络拓扑节点重要度的多指标综合分析结果。本方法首次将卫星流量引入卫星关键节点分析中，综合考虑了卫星网络节点的流量功能特征和拓扑结构，能够更全面、合理、准确地分析卫星节点的重要度，同时基于灰色综合评价的多指标分析方法也克服了传统方法的权重选取主观性强的缺点，使得方法更具科学性。仿真结果表明，与现有方法相比，本文所提方法能够有效提高卫星网络关键节点识别的准确度，为时变卫星网络关键节点分析提供了一种技术手段。

参考文献:

- [1] Ji S J, Zhou D, Sheng M, et al. Mega satellite constellation system optimization: from a network control structure perspective[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(2): 913-927.
- [2] Li K X, You L, Wang J H, et al. Downlink transmit design for massive MIMO LEO satellite communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(2): 1014-1028.
- [3] 刘东, 吴启晖, Quek Tony Q S. 面向航空 6G 的频谱认知智能管控[J]. *物联网学报*, 2020, 4(1): 12-18.
Liu D, Wu Q H, Quek T Q S. Spectrum cognitive intelligent management and control for aviation 6G[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(1): 12-18.
- [4] 白卫岗, 盛敏, 杜盼盼. 6G 卫星物联网移动性管理: 挑战与关键技术[J]. *物联网学报*, 2020, 4(1): 104-110.
Bai W G, Sheng M, Du P P. Mobility management of the 6G satellite IoT: challenges and key techniques[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(1): 104-110.
- [5] 林敏, 李菲, 王子宁, 等. 智能反射面辅助的太赫兹卫星通信鲁棒安全波束成形算法[J]. *电子学报*, 2023, 51(10): 2715-2723.
Lin M, Li F, Wang Z N, et al. Robust secure beamforming algorithm for IRS-aided terahertz satellite communication systems[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(10): 2715-2723.
- [6] Han C, Liu A J, Huo L Y, et al. A prediction-based resource matching scheme for rentable LEO satellite communication network[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(2): 414-417.
- [7] Xu J J, Kishk M A, Alouini M S. Space-air-ground-sea integrated networks: modeling and coverage analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(9): 6298-6313.
- [8] 徐常志, 靳一, 李立, 等. 面向 6G 的星地融合无线传输技术[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(1): 28-36.
Xu C Z, Jin Y, Li L, et al. Wireless transmission technology of satellite-terrestrial integration for 6G mobile communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(1): 28-36.
- [9] You L, Li K X, Wang J H, et al. Massive MIMO transmission for LEO satellite communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1851-1865.
- [10] Estrada E, Rodríguez-Velázquez J A. Subgraph centrality in complex networks[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, 71(5 Pt 2): 056103.
- [11] Huang X L, Chen J, Cai M, et al. Traffic node importance evaluation based on clustering in represented transportation networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(9): 16622-16631.
- [12] Wang Z K, Wen X X, Wu M G. Identification of key nodes in aircraft state network based on complex network theory[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 60957-60967.
- [13] Ghanem M, Magnien C, Tarissan F. Centrality metrics in dynamic networks: a comparison study[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2019, 6(4): 940-951.
- [14] 李琳, 刘雅奇. 通信网节点重要性的多指标评价方法[J]. *海军工程大学学报*, 2010, 22(5): 69-73, 102.
Li L, Liu Y Q. Node importance evaluation in communication network with respect to multiple network performance measures[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2010, 22(5): 69-73, 102.
- [15] 吴英晗, 李明达, 胡枫. 基于熵的多属性决策超网络重要节点识别方法[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2023, 20(4): 40-46.
Wu Y H, Li M D, Hu F. A multi-attribute decision-making method based on entropy to identify important nodes in hypernetworks[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2023, 20(4): 40-46.
- [16] 张喜平, 李永树, 刘刚, 等. 节点重要度贡献的复杂网络节点重要度评估方法[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2014, 11(3): 26-32, 49.
Zhang X P, Li Y S, Liu G, et al. Evaluation method of importance for nodes in complex networks based on importance contribution[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2014, 11(3): 26-32, 49.
- [17] 朱林, 方胜良, 胡卿, 等. 卫星时变拓扑网络节点重要度评估方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(6): 1274-1279.
Zhu L, Fang S L, Hu Q, et al. Evaluation method for time-varying satellite topology network node importance[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(6): 1274-1279.
- [18] Ma Z, Huang G D. Image recognition and analysis: a complex network-based approach[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 109537-109543.
- [19] WASSERMAN S, FAUST K. Social network analysis: methods and applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [20] Li K, Gong X F, Guan S G, et al. Analysis of traffic flow on complex networks[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2011, 25(10): 1419-1428.
- [21] 张诚, 汪成银, 陈志伟, 等. 基于空间流量度的城市路网关键节点挖掘方法[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(6): 28-35.

- Zhang C, Wang C Y, Chen Z W, et al. Mining method of key nodes of urban road network based on spatial-flow degree[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2021, 40(6): 28-35.
- [22] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [23] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationships of the Internet topology[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1999, 29(4): 251-262.
- [24] 何铭, 邹艳丽, 梁明月, 等. 基于多属性决策的电力网络关键节点识别[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2020, 17(3): 27-37.
- He M, Zou Y L, Liang M Y, et al. Critical node identification of a power grid based on multi-attribute decision[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2020, 17(3): 27-37.
- [25] 张连怡, 沈喜生, 卿杜政, 等. 基于信息熵的复杂作战网络动态演化研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(12): 2605-2618.
- Zhang L Y, Shen X S, Qing D Z, et al. Research on complex combat network dynamic evolution based on information entropy[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(12): 2605-2618.
- [26] 蒋伟进, 杨莹, 罗田甜, 等. 基于全局-局部属性的复杂网络节点综合影响力评估算法[J]. 物联网学报, 2022, 6(3): 133-145.
- Jiang W J, Yang Y, Luo T T, et al. Comprehensive influence evaluation algorithm of complex network nodes based on global-local attributes[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(3): 133-145.
- [27] Esangbedo M O, Xue J W, Bai S J, et al. Relaxed rank order centroid weighting MCDM method with improved grey relational analysis for subcontractor selection: photothermal power station construction[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2024, 71: 3044-3061.
- [28] 范纪松, 任辉, 高俊. 合成旅工程保障能力多层次灰色系统评价方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(12): 137-141, 148.
- Fan J S, Ren H, Gao J. Evaluation methods of synthetic brigade engineering support capability based on multi-level grey system[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(12): 137-141, 148.
- [29] 李鹏, 王世林, 陈光武, 等. 基于改进的局部结构熵复杂网络重要节点挖掘[J]. 计算机应用, 2023, 43(4): 1109-1114.
- Li P, Wang S L, Chen G W, et al. Key node mining in complex network based on improved local structural entropy[J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(4): 1109-1114.
- [30] 刘剑慰, 姜斌, 杨蒲. 面向系统健康度的网络节点重要度评估[J]. 物联网学报, 2021, 5(3): 21-26.

Liu J W, Jiang B, Yang P. Health-based network node importance assessment[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2021, 5(3): 21-26.

[作者简介]



蒋成洋(2000—), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星通信、复杂网络分析。



张瀚阅(2000—), 男, 南京邮电大学波特兰学院硕士生, 主要研究方向为复杂网络、卫星网络路由选择。



孔槐聪(1995—), 男, 博士, 主要研究方向为协作通信、卫星通信和绿色通信。



刘笑宇(1996—), 男, 博士, 南京邮电大学通信与信息工程学院讲师, 主要研究方向为空天地一体化网络中的优化设计与性能分析。



欧阳键(1983—), 男, 博士, 南京邮电大学通信与信息工程学院副教授, 主要研究方向为空天地一体化通信网络、智能信号处理技术。