

卫星异质信息网络中节点重要度衡量方法

李静玲, 黎 军, 梁 薇, 崔 涛, 张 怡

(中国空间技术研究院西安分院空间微波技术重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘 要: 卫星网络中不同节点对于网络连通性及吞吐量的影响不同, 为了避免卫星网络关键节点失效导致的网络通信失常现象, 可通过衡量卫星网络节点重要度提前进行网络规划。针对卫星网络信息异质的特点, 定义卫星虚拟节点及虚拟子层, 并提出卫星多层异质信息关联网络模型, 定义虚拟节点的归一化度数、归一化节点介数及虚拟节点关联因子, 并通过所定义参数提出网络节点重要度计算函数, 可精准衡量卫星多层异质信息网络中的节点重要度。基于典型实例对网络连通度及吞吐量指标进行分析, 结果表明本文所提算法与经典图论算法相比, 能够综合考虑数据信息对于网络节点重要度的影响, 更精准描述卫星多层异质信息网络的连通度指标。

关键词: 卫星网络; 异质信息; 节点重要度; 网络连通度

中图分类号: TP927.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022021

Node Importance Measurement Method in Heterogeneous Information Satellite Network

Li Jingling, Li Jun, Liang Wei, Cui Tao, Zhang Yi

National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, CAST, Xi'an 710100, China

Abstract: In satellite network, different nodes have different effects on network connectivity and throughput. In order to avoid network communication disturbances caused by the failure of key nodes in the satellite network, network planning can be carried out in advance by measuring the importance of satellite network nodes. According to the characteristics of satellite network information heterogeneity, satellite virtual nodes and virtual sub-layers were defined, and the satellite multi-layer heterogeneous information correlation network model was proposed. The normalized degree, normalized node betweenness and virtual node correlation factor of virtual nodes were defined, and the network node importance calculation function was proposed through the defined parameters, which could accurately measured the node importance in the satellite multi-layer heterogeneous information network. Based on typical examples, the network connectivity and throughput indicators were analyzed. The results showed that the proposed algorithm was better than the classical graph theory algorithm, which could comprehensively considered the impact of data information on the importance of network nodes, and more accurately described the connectivity index of satellite multi-layer heterogeneous information networks.

Keywords: satellite network, heterogeneous information, note importance, network connectivity

0 引言

卫星网络作为天基信息体系建设的主要组成部分, 其基于任务的信息互联互通能力至关重要, 不仅需要网络保持连通状态, 而且需要承载任务的节点维持正常运

行, 否则将影响到空间任务完成程度, 甚至决定任务能否成功完成。从信息连通的角度来看, 由于卫星节点在网络中的作用、地位、能力不同, 不同星间链路所承担的信息负载也不同, 若卫星节点损坏或星间链路失效,

收稿日期: 2022-02-01; **修回日期:** 2022-03-09

通信作者: 黎军, lijun206@sina.com

基金项目: 国家重点实验室稳定支持基金 (No.HTKJ2021KL504006)

Foundation Item: The National Key Laboratory Stability Support Foundation (No.HTKJ2021KL504006)

可能导致网络连通性及网络吞吐量遭到不同程度的影响,若网络关键节点遭到破坏,会对网络信息互联造成极为严重的后果,甚至影响网络正常通信,继而影响整体任务的完成,因此需要衡量网络节点关键度,提前识别网络关键节点^[1-3]。

目前所提出的节点重要度衡量方法,通常是针对网络动态特性,基于图论方法,通过节点度、节点介数、聚焦系数等图论参数^[4-6]评价网络节点重要度;或针对异构网络中节点功能及作用不同,在Ad Hoc网络或复杂网络中,对节点和边赋予不同权值^[7-10],以及进行综合性评价^[11-12]。针对异质网络,参考文献[13-14]提出采用分层或级联的方法进行关键节点识别;对于卫星网络或空间信息网络,针对卫星网络拓扑所具有的时变特性,参考文献[3, 15-17]提出相应算法,准确评估动态拓扑下的卫星网络节点重要度及其对网络安全方面的影响;针对空间复杂环境特征,参考文献[18-19]提出关键节点识别算法。其中典型参考文献研究主要包括以下几种。

参考文献[13]提出异质网络模型,并针对该网络特性,利用统计特征评估法,制定反映网络连通性与网络脆弱性的可靠性指标,实现节点重要度评估和关键节点的发现。

参考文献[14]针对工业复杂网络具有多异质节点与多层网络互耦合性的问题,提出多层异质依存网络理论及其关键节点辨识方法。

参考文献[15]针对卫星网络拓扑结构的时变特征,通过构建时变拓扑图序列模型,以节点介数、节点紧密度和节点距离的重要度贡献为度量参数,提出稳态卫星网络节点重要度评估方法。

参考文献[18]基于时间片,并结合卫星的业务特点,提出基于累积模式的动态空间信息网络关键节点分析方法,该方法将不同时间片的节点强度进行累积,分析节点重要度。

卫星网络中的信息类型主要包括卫星状态信息(相对位置信息、三维姿态信息、相对运行速度、空间/时间/频率同步信息等),控制信息(姿态、轨道轨位等)以及大容量数据信息。其中星间链路需要通过状态信息、控制信息来维持链路正常连接,数据信息是与具体空间任务密切相关的^[20]。卫星的状态信息、控制信息和数据信息的产生、作用、传输路径均不同,为异质信息。

在基于任务的卫星信息网络中,一旦建立星间链路,则必须进行卫星状态及控制信息交互,而根据具体任务要求,只有在需要时才在链路上进行数据信息传输。其中,卫星状态及控制信息影响网络的连通度,而数据信息影响网络数据的吞吐量,因此,连接不同卫星

状态及控制信息和数据信息的同一个网络节点,对于网络的连通度和吞吐量的影响程度不一定相同,若网络信息层面的关键节点失效可能导致网络连通性受到严重破坏,甚至网络信息无法互联互通;若网络数据层面的关键节点失效可能导致网络吞吐量大幅降低,影响网络所承载的任务正常运转。

本文根据卫星异质信息网络的节点及链路特点,提出一种卫星多层异质信息关联网络模型,针对该模型特点,提出节点重要度衡量算法,综合考虑基于任务的数据信息对卫星网络的影响,可准确计算卫星异质信息网络中不同节点的重要程度。该算法可作为后续卫星网络拓扑控制算法^[21-24]及交换/路由算法^[25-26]的输入条件,更精准地规划卫星网络星间链路,提高网络性能。

1 卫星多层异质信息关联网络模型

卫星信息网络包含两类异质信息:基础信息和数据信息,这两类信息的产生、作用不同,传输路径不一定相同,既有差异又有关联^[20]。其中基础信息主要包括卫星状态信息和控制信息,通常速率较低;数据信息与具体的空间任务相关,通常速率较高。卫星网络中的信息拓扑既受到网络物理拓扑制约,又受到空间任务数据传输的约束,且信息具有异质特点,称为卫星异质信息网络。本文从图论的角度将卫星节点视为卫星网络信息拓扑图中的点,星间信息链路视为卫星网络信息拓扑图中的边,双向信息链路为无向边,其网络拓扑示意如图1所示,其中,黄色的边表示基础信息链路,蓝色的边表示基础数据链路。

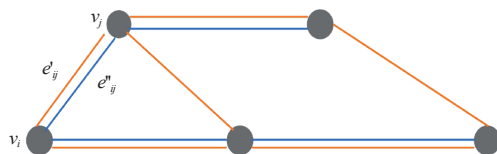


图1 卫星异质信息网络拓扑示意

如图1所示的卫星异质信息网络可表示为: $G(t)=(V(t), E(t))$, 其中 $V(t)=\{v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)\}$, 为节点集合, $E(t)=\{e_{ij}(t)\}$, $0 \leq i, j < p$, 为边集合。 n 为网络节点个数, p 为网络链路个数。假设在 t 时刻, 节点 v_i 至 v_j ($i, j \in N$)之间存在连通路径 $v_i e'_{ij} v_j$ 和 $v_i e''_{ij} v_j$, 即同一对节点之间的链路传输两类异质信息, 称网络 $G(t)$ 为一种卫星异质信息网络。

由于卫星异质信息网络中相同节点对之间可能有两类异质信息互联, 因此可将卫星实体节点抽象为两类虚拟相连的节点: 基础信息节点和数据信息节点, 由同类

节点相连分别构成基础信息网和数据信息网。

其中基础信息网由基础信息节点通过基础信息链路连接,网络模型为 $G_1(t)=(V'(t), E'(t))$, $V'(t)=\{v'_1(t), v'_2(t), \dots, v'_n(t)\}$, $E'(t)=\{e'_{ij}(t)\}$, $0 < i, j < p$, n 为基础信息网节点个数, p 为基础信息网中边的个数。

数据信息网由数据信息节点通过数据信息链路连接,网络模型为 $G_2(t)=(V''(t), E''(t))$, 其中点集合为 $V''(t)=\{v''_1(t), v''_2(t), \dots, v''_n(t)\}$, 边集合为 $E''(t)=\{e''_{ij}(t)\}$, $0 < i, j < q \leq p$, n 为数据信息网节点个数, q 为数据信息网中边的个数。

卫星多层异质信息关联网络模型示意如图2所示。

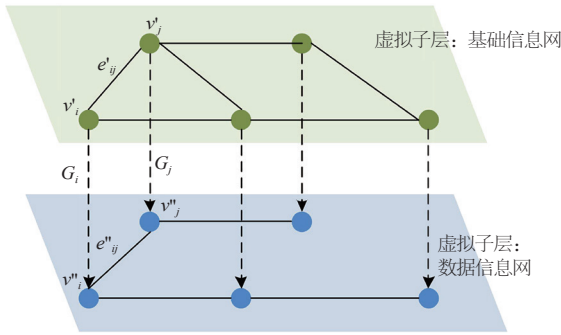


图2 卫星多层异质信息关联网络模型示意

2 卫星异质信息网络节点重要度衡量算法

卫星网络具有动态时变特性,且卫星节点计算能力与地面相比较弱,从网络的时效性来看,既需要算法能精准衡量卫星网络节点重要度,又需要算法具有简单快速的计算特点。因此,本文采用图论中最重要的节点重要度和节点介数参数,对其进行归一化处理后作为卫星单层网络中虚拟节点的重要度衡量标准,并定义子层之间的重要度传递参数,提出卫星多层异质信息网络中节点重要度的计算方法。其具体计算流程如图3所示。

卫星异质信息网络节点重要度衡量计算步骤如下。

(1) 计算基础信息网 $G_1(t)$ 中各节点(如图2所示)的归一化节点度 K_{1i} 和节点介数 D_{1i} 参数。

定义1: 节点度为节点直接相连路径个数,其定义如下

$$k_i = \sum_{j \in G} \delta_{ij} \quad (1)$$

其中 $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ 到 } j \text{ 有连接} \\ 0, & i \text{ 到 } j \text{ 没有连接} \end{cases}$ 。将其进行归一化处理,节点 i 的度标记为

$$K_i = k_i / \sum k_i \quad (2)$$

度指标体现该节点与周围节点之间建立直接联系的能力,但不能反映该节点的邻居节点的连边情况。

定义2: 节点介数 D_i 为网络中所有节点对的最短路径中经过该节点的路径数据占最短路径总数的比例。通过计算每个节点的介数值来反映其在网络中的地位,值越大,说明有更多最短路径通过该节点。节点 v_i 的介数即为 D_i

$$D_i = \sum_{i \neq j \in V} \frac{d_{ij}(i)}{d_{ij}} \quad (3)$$

其中, d_{ij} 表示节点 v_i 和节点 v_j 之间的最短路径数目,若节点 v_i 和节点 v_j 之间不存在路径,则 $d_{ij} \rightarrow \infty$ 。 $d_{ij}(i)$ 表示经过节点 v_i 的最短路径数目。节点介数在一定程度上反映了节点的信息处理能力和信息的传递效率,可以用来度量该节点对网络资源的控制能力。

(2) 计算基础信息网 $G_1(t)$ 中每个虚拟节点的重要度。

定义3: 基础信息网 $G_1(t)$ 中虚拟节点的重要度为该节点归一化节点度 K_{1i} 与节点介数 D_{1i} 之积。

$$\text{SIN}_i = K_{1i} \times D_{1i} \quad (4)$$

(3) 分别计算数据信息网中节点的归一化度 K_{2i} 和节点介数 D_{2i} 参数,计算方法见式(2)和式(3)。

(4) 计算图2中数据信息网 $G_2(t)$ 中每个虚拟节点的重要度。

采用定义3方式,可得到数据信息网 $G_2(t)$ 中虚拟节点的重要度

$$\text{DIN}_i = K_{2i} \times D_{2i} \quad (5)$$

(5) 计算虚拟节点关联因子 G_i 。

定义4: 由于基础信息网的边与网络中物理连接的边相同,因此基础信息网的信息连接是多层网络的基础,而数据信息网中的信息连接主要体现多层网络的数据吞吐量,因此,将数据信息网中虚拟节点的重要度进行归一化处理后,作为卫星异质网络节点重要度的一个衡量因子,计算公式如下

$$G_i = \frac{\text{DIN}_i}{\sum \text{DIN}_i} \quad (6)$$

(6) 通过指标 G_i 将数据信息网中虚拟节点的重要度传递给基础信息网中相应的虚拟节点,计算卫星异质网络 $G(t)$ 中节点的重要度。

定义5: 定义卫星异质网络 $G(t)$ 中节点的重要度 SHN_i 为每个卫星节点对应基础信息网虚拟节点重要度 SIN_i 与虚拟节点关联因子 G_i 相乘的积,再加上节点重要度 SIN_i 所得到的和,计算公式如下

$$\text{SHN}_i = (1 + G_i) \times \text{SIN}_i \quad (7)$$

定义5以卫星网络实际存在的物理链路为节点重要度的主要衡量标准,以当前进行数据传输的链路所涉及的节点作为节点重要度的辅助衡量标准,进行节点重要度的综合测量,可以更精确地判断网络节点的重要度。



图3 卫星多层异质信息网络节点重要度计算流程

3 实例计算及指标分析

3.1 实例计算

以某分布式遥感卫星网络为例， t 时刻该网络星间信息拓扑示意如图4所示。

首先将图4所示的卫星网络抽象为由两层相互关联的虚拟节点连接的多层信息网络，建立卫星多层异质信息网络关联模型 $G_R(t)=(G_{R1}(t), G_{R2}(t))$ ，其中虚拟子层基础信息网模型 $G_{R1}(t)=(V'_R(t), E'_R(t))$ ， $V'_R(t)=\{v'_1(t), v'_2(t), \dots, v'_n(t)\}$ ， n 为网络节点个数， $E'_R(t)=\{e'_{ij}(t)\}$ ， $0 < i, j < p$ ， p 为基础信息边个数；虚拟子层数据信息网模型 $G_{R2}(t)=(V''_R(t), E''_R(t))$ ，

$V''_R(t)=\{v''_1(t), v''_2(t), \dots, v''_n(t)\}$ ， n 为网络节点个数， $E''_R(t)=\{e''_{ij}(t)\}$ ， $0 < i, j < q$ ， q 为数据信息边个数。多层异质信息关联模型连通图如图5所示。分别计算网络节点A~H的相关参数。

(1) 根据式(1)~式(3)分别计算基础信息层中虚拟节点的归一化度 K_{1i} 和虚拟节点介数 D_{1i} ，具体见表1。

表1 基础信息层虚拟节点相关参数

参数	A	B	C	D	E	F	G	H
虚拟节点归一化度 K_{1i}	1/5	1/10	1/10	3/20	1/10	1/10	3/20	1/10
虚拟节点介数 D_{1i}	15/30	11/30	10/30	12/30	8/30	11/30	12/30	7/30

(2) 根据式(4)计算基础信息层中每个虚拟节点的重要度 SIN_i ，具体见表2。

表2 基础信息层虚拟节点重要度

参数	A	B	C	D	E	F	G	H
虚拟节点重要度 SIN_i	0.100	0.036	0.033	0.060	0.026	0.036	0.060	0.023

(3) 根据式(1)~式(3)分别计算数据信息层中虚拟节点归一化度 K_{2i} 和虚拟节点介数 D_{2i} ，具体见表3。

表3 数据信息层虚拟节点相关参数

参数	A	B	C	D	E	F	G	H
虚拟节点归一化度 K_{2i}	2/8	1/8	0	0	0	1/8	3/8	1/8
虚拟节点介数 D_{2i}	7/10	3/10	0	0	0	4/10	9/10	4/10

(4) 根据式(5)计算数据信息层中每个虚拟节点的重要度 DIN_i ，具体见表4。

(5) 根据式(6)计算不同节点虚拟节点关联因子，具

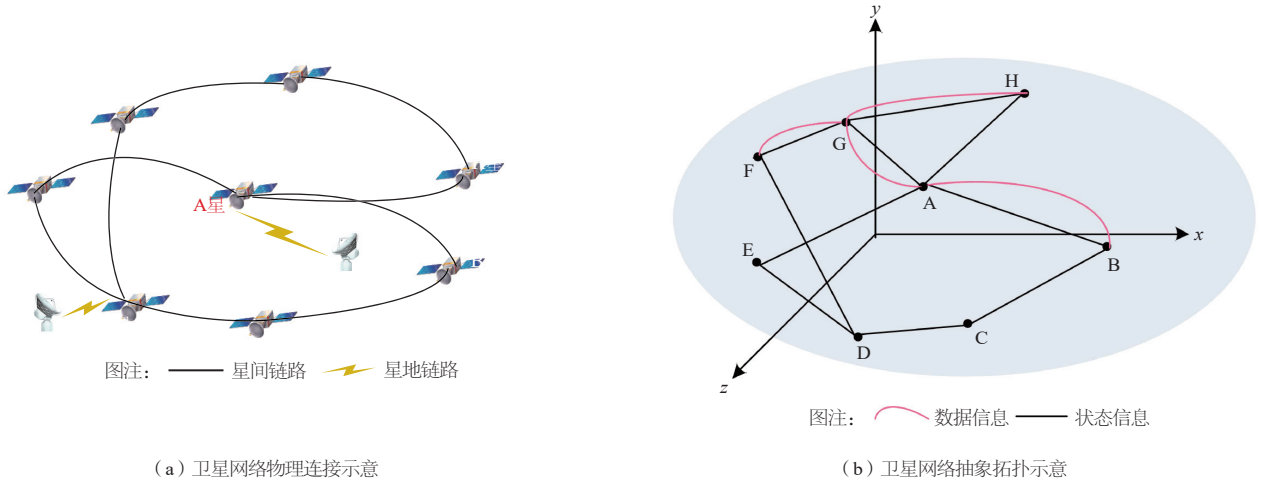


图4 某分布式遥感卫星网络在 t 时刻的星间信息拓扑示意

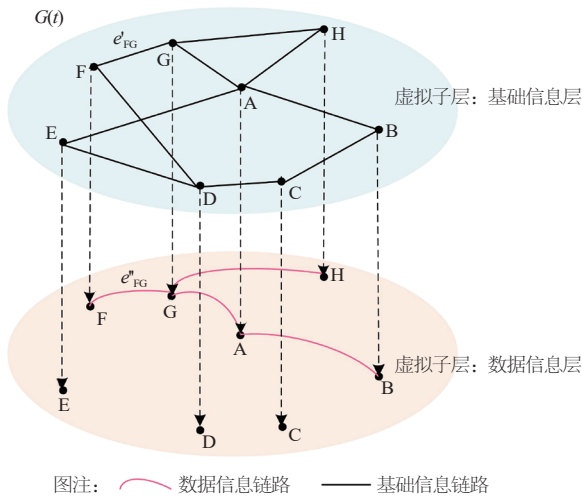


图5 多层异质信息关联模型连通图

表4 数据信息层虚拟节点重要度

参数	A	B	C	D	E	F	G	H
虚拟节点重要度 DIN_i	0.175 0	0.037 5	0	0	0	0.050 0	0.337 5	0.050 0

表5 虚拟节点关联因子

参数	A	B	C	D	E	F	G	H
虚拟节点关联因子 G_i	0.269 2	0.057 6	0	0	0	0.076 9	0.519 2	0.076 9

体见表5。

(6) 根据式(7)计算卫星异质网络 $G_R(t)$ 中节点的重要度 SHN_i ，具体见表6。

表6 卫星异质网络节点重要度

参数	A	B	C	D	E	F	G	H
节点重要度 SHN_i	0.126 9	0.038 0	0.033 0	0.060 0	0.026 0	0.038 7	0.091 1	0.024 7

3.2 指标分析

(1) 节点重要度评估

采用图论中经典的归一化度 K_i 和虚拟节点介数 D_i 算法获得网络节点重要度（即SIN），采用本文所提方法获得网络节点重要度（即SHN），将两类方法得到的节点按照其重要度由大到小排序，具体见表7。

定义6（卫星异质网络连通度）：在一个具有 N 个点的无向图 G 中，在去掉任意 $K-1$ （ $1 \leq K \leq N$ ）个顶点后，所得的子图仍然连通，去掉 K 个顶点不连通，则称 G 是 K 连通图， K 称作图 G 的连通度，标记为 $K(G)$ 。

$$K(G) = \min_{i,j} (Nc_{ij}) \tag{8}$$

表7 两类算法节点重要度评估结果

节点重要度排序	介数及度算法 (节点/重要度数值)	本文方法 (节点/重要度数值)
1	A (0.100 0)	A (0.126 9)
2	D、G (0.060 0)	G (0.091 1)
3	—	D (0.060 0)
4	B、F (0.036 0)	F (0.038 7)
5	—	B (0.038 0)
6	C (0.033 0)	C (0.033 0)
7	E (0.026 0)	E (0.026 0)
8	H (0.023 0)	H (0.024 7)

其中， Nc_{ij} 为断开一对节点 (i,j) 之间所有通路所需要去掉的最少节点数。表8为分别删去网络Top3关键节点，两种算法所对应的网络连通度。

表8 两类算法所对应的网络连通度评估结果

介数及度算法（SIN）	网络连通度	本文方法（SHN）	网络连通度
G （初始网络）	3	G （初始网络）	3
$G1$ （删去节点A）	2	$G1$ （删去节点A）	2
$G2/G3$ （删去节点D/删去节点G）	1/1	$G2$ （删去节点G）	1
		$G3$ （删去节点D）	1

(2) 网络吞吐量评估

定义7（卫星网络吞吐量）：通过计算卫星网络每两个节点之间吞吐量之和来计算卫星网络的整网吞吐量， Ntc_i 为两节点之间的有效吞吐量， I 为网络有效链路个数。

$$NTC = \sum_i^I Ntc_i \tag{9}$$

$Ntc_i = \text{传输速率} \times \text{编码方案}$ ，由于基础信息链路的数据传输速率远小于数据信息链路的数据传输速率（前者一般为kbit/s级别，后者一般为Mbit/s级别），本文主要考虑数据信息链路的数据吞吐量，不考虑不同数据信息链路吞吐量差异，将每一条数据信息链路上的数据吞吐量记为 U_{Ntc} ，得到表9所示的网络吞吐量评估结果。

表9 网络吞吐量评估结果

介数及度算法（SIN）	网络吞吐量	本文方法（SHN）	网络吞吐量
G （初始网络）	$4U_{Ntc}$	G （初始网络）	$4U_{Ntc}$
$G1$ （删去节点A）	$2U_{Ntc}$	$G1$ （删去节点A）	$2U_{Ntc}$
$G2/G3$ （删去节点D/删去节点G）	$4U_{Ntc}/1U_{Ntc}$	$G2$ （删去节点G）	$2U_{Ntc}$
		$G3$ （删去节点D）	$4U_{Ntc}$

由表7可以看到，介数及度算法与本文方法重要度等

级排序出现差异的节点为D、G、B、F，采用本文方法得到的节点重要度更精确，避免了节点重要度相同的现象。采用介数及度算法和本文方法得到的数值排前3的关键节点分别为A、G、D，由表8可以看到，在分别删去网络G、D节点后，两类算法的网络连通度相同，证明得到关键节点对于网络连通度的影响是一致的。由表9可以看到，在采用本文方法进行计算后，网络中删去G节点后的网络吞吐量小于删去D节点后的网络吞吐量，证明G节点的重要度更高一些，而原有的介数及度算法并没有精确区分（该算法中D、G节点重要度相同）。

4 结束语

本文在衡量节点重要度时侧重于卫星异质节点之间的数据传输影响，下一步可考虑进一步扩展异质节点内涵，将本方法应用于异质节点之间的分布式计算以及能量传输^[27]等领域。

参考文献：

- [1] 王敬超, 于全. 基于分布式星群的空间信息网络体系架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4): 9-13, 18.
WANG J C, YU Q. System architecture and key technology of space information network based on distributed satellite clusters[J]. ZTE Technology Journal, 2016, 22(4): 9-13, 18.
- [2] 张明智, 罗凯, 吴曦. 空间信息网络关键节点分析方法研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(6): 1235-1239.
ZHANG M Z, LUO K, WU X. Study on key nodes analysis method of space information network[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1235-1239.
- [3] 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.
- [4] 肖恩利, 束金龙, 闻人凯. 图的代数连通度及其点连通度[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2003(4): 1-4.
XIAO E L, SHU J L, WEN R K. The algebraic and vertex connectivity of graphs[J]. Journal of Eastchina Normal University (Natural Science), 2003(4): 1-4.
- [5] 任卓明, 邵凤, 刘建国, 等. 基于度与集聚系数的网络节点重要性度量方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 522-526.
REN Z M, SHAO F, LIU J G, et al. Node importance measurement based on the degree and clustering coefficient information[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(12): 522-526.
- [6] 沙毅, 李娜, 吴斌. 基于节点稳定度预测机制的Ad hoc网络中关键节点探测算法研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(7): 87-91.
SHA Y, LI N, WU B. Research on critical nodes detection algorithm based on node stability prediction in ad hoc network[J]. Computer Science, 2012, 39(7): 87-91.
- [7] 陈李慧. 有向加权复杂网络关键节点识别及稳定性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
CHEN L H. Research on key nodes identification and stability of directed weighted complex networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [8] 邢焕革, 邱原. 基于复杂网络理论的军事力量部署研究[J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(2): 5-7.
XING H G, QIU Y. Study on the military power position based on complex networks theory[J]. Command Control & Simulation, 2011, 33(2): 5-7.
- [9] 姜志鹏, 张多林, 马婧, 等. 权重演化的加权网络节点重要性评估方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015, 16(2): 19-23.
JIANG Z P, ZHANG D L, MA J, et al. Research on evaluation method for node importance based on weight-evolving network model[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2015, 16(2): 19-23.
- [10] 胡满玉. 基于链接关系的有向加权复杂网络关键节点识别技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
HU M Y. Research on key nodes identification technology of directed weighted complex network based on link relationship[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [11] 谢丰, 程苏琦, 陈冬青, 等. 基于级联失效的复杂网络抗毁性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(10): 1252-1257.
XIE F, CHENG S Q, CHEN D Q, et al. Cascade-based attack vulnerability in complex networks[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011, 51(10): 1252-1257.
- [12] 莫振淳, 傅丽华, 彭耀辉, 等. 基于综合重要度评价的生态空间网络关键节点识别[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(2): 64-69.
MO Z C, FU L H, PENG Y H, et al. Identification of ecological space network key nodes based on a comprehensive importance evaluation[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(2): 64-69.
- [13] 王松华. 基于异质网络的关键节点识别研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
WANG S H. Research on identifying key nodes based on heterogeneous networks[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.
- [14] 吴舜裕, 许刚. 异质依存网络衰退特征与关键节点辨识[J]. 自动化学报, 2018, 44(5): 953-960.
WU S Y, XU G. Degeneration characters of heterogeneous-

- interdependent network and key node identification[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(5): 953-960.
- [15] 胡华全, 吴玲达, 杨超, 等. 基于图序列的卫星网络时变拓扑可视分析[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(10): 2065-2070.
HU H Q, WU L D, YANG C, et al. Visual analysis for time-varying topologies of satellite networks based on graph sequence[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(10): 2065-2070.
- [16] 秦玉帆. 卫星网络拓扑评估与节点重要性的研究[D]. 大连: 大连大学, 2016.
QIN Y F. Study on evaluation of satellite network topology survivability and node importance[D]. Dalian: Dalian University, 2016.
- [17] 王彦鹏. 卫星网络拓扑的抗毁性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
WANG Y P. Research on survivability of satellite network topologies[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [18] 张明智, 罗凯, 吴曦. 空间信息网络关键节点分析方法研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(6): 1235-1239.
ZHANG M Z, LUO K, WU X. Study on key nodes analysis method of space information network[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1235-1239.
- [19] 任勇, 张泽琦, 姜春晓, 等. 空间信息网络中关键节点的确定方法和装置: CN201710006644.5[P]. 2017.
REN Y, ZHANG Z Q, JIANG C X, et al. Method and I device for determining key nodes in spatial information network: CN201710006644.5[P]. 2017.
- [20] 史凤振. 小卫星编队组网机制研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
SHI F Z. The research of networking mechanisms for micro-satellites formation[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [21] HU Y Y, LI Z, LI J L, et al. Incremental-compensation based robust topology control for micro/nano satellite network[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA). Piscataway: IEEE Press, 2020: 22-28.
- [22] 李钊, 胡玉雨, 李静玲, 等. 溯源补偿健壮拓扑控制方法、系统、介质、设备及终端: CN112532294B[P]. 2021-10-29.
LI Z, HU Y Y, LI J L, et al. Tracing compensation robust topology control method and system, medium, equipment and terminal: CN112532294B[P]. 2021-10-29.
- [23] 李钊, 胡玉雨, 李静玲, 等. 增量补偿健壮拓扑控制方法、系统、介质、设备、终端: CN112543048B[P]. 2021-10-29.
LI Z, HU Y Y, LI J L, et al. Incremental compensation robust topology control method and system, medium, equipment and terminal: CN112543048B[P]. 2021-10-29.
- [24] 李钊, 胡玉雨, 李静玲, 等. 一种卫星网络的拓扑控制方法及其系统: CN202011572897.7[P]. 2020-12-28
LI Z, HU Y Y, LI J L, et al. A kind of topology control method and system of satellite network: CN 202011572897.7[P]. 2020-12-28
- [25] 曹素芝, 孙雪, 王厚鹏, 等. 星地融合网络智能路由技术综述[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(2): 11-19.
CAO S Z, SUN X, WANG H P, et al. Review of intelligent routing technology in integrated satellite-ground network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(2): 11-19.
- [26] 李静玲, 黎军, 张怡, 等. 卫星融合交换系统负载均衡异构路由算法[J]. 中国空间科学技术, 2021, 41(3): 105-113.
LI J L, LI J, ZHANG Y, et al. Load balancing heterogeneous path algorithm for satellite hybrid switching system[J]. Chinese Space Science and Technology, 2021, 41(3): 105-113.
- [27] 国晓博, 任智源, 程文驰, 等. 低轨卫星网络中业务图驱动的星间协作计算方案[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(2): 35-44.
GUO X B, REN Z Y, CHENG W C, et al. Inter-satellite cooperative computing scheme driven by business graph in LEO satellite network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(2): 35-44.

[作者简介]



李静玲 (1984-), 女, 硕士, 中国空间技术研究院西安分院高级工程师, 主要研究方向为卫星网络交换、星上数据处理。



黎军 (1975-), 男, 硕士, 中国空间技术研究院西安分院研究员, 主要研究方向为卫星网络与交换技术。



梁薇 (1986-), 女, 硕士, 中国空间技术研究院西安分院高级工程师, 主要研究方向为卫星网络交换。



崔涛 (1984-), 男, 硕士, 中国空间技术研究院西安分院高级工程师, 主要研究方向为卫星网络交换。



张怡 (1981-), 女, 硕士, 中国空间技术研究院西安分院高级工程师, 主要研究方向为卫星数据传输与处理。