

基于能耗奖励策略机制的 深空网络优化算法研究

李俊[†], 李养胜

(陕西工业职业技术学院信息工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要:为解决深空通信存在的数据投递效率不高,网络转发能力不强及网络时延严重等不足,提出了一种基于能耗奖励策略机制的深空网络优化算法。首先,引入节点间能耗博弈模型,设计了一种基于泛洪路由策略的数据投递机制,待传输数据即将启动发送流程时,当前节点将依据自身能量的剩余状态来制定相应的投递操作,以降低节点能耗和减少网络数据重传输现象。随后,利用节点策略博弈模型来优化数据投递操作,通过对成功投递数据的中间节点予以一个单位的奖励,改善节点转发时的能量消耗。仿真实验表明:与深空通信常用的能量优化评估算法和时延容忍度优化算法相比,本文算法具有更高的数据投递率、更低的网络时延和更短的数据存储时间,具有很好的深空通信能力。

关键词:深空通信;能耗奖励;能耗博弈;数据重传输;策略博弈

中图分类号:TP393.04

文献标识码:A

Research on Deep Space Network Optimization Algorithm Based on Energy Consumption Reward Strategy Mechanism

LI Jun[†], LI Yangsheng

(School of Information Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: In order to solve the shortcomings of low data delivery efficiency, weak network forwarding capability, and severe network latency in deep space communication, a deep space network optimization algorithm based on energy consumption reward strategy mechanism is proposed. Firstly, an energy consumption game model between nodes is introduced, and a data delivery mechanism based on flood routing strategy is designed. When the data to be transmitted is about to start the sending process, the current node will formulate corresponding delivery operations based on its remaining energy state to save node energy consumption and reduce network data retransmission. Subsequently, a node strategy game model is used to optimize data delivery operations, by rewarding intermediate nodes that successfully deliver data with a unit to improve energy consumption during node forwarding and achieve the goal of improving data forwarding efficiency. Simulation experiments show that compared with commonly used energy optimization evaluation algorithms and delay tolerance optimization algorithms in deep space communication, the algorithm proposed in this paper has higher data delivery rate and lower network delay, as well as shorter data storage time, which has excellent deep space communication capabilities.

Key words: deep space communication; energy consumption; energy consumption game; data retransmission; strategic game theory

随着以马斯克星舰为代表的新一代太空科技竞争的不断推进,深空网络技术(Deep Space Network, DSN)也得到了长足发展进步^[1]。由于深空网络由人造卫星、短期宇航器等高价值节点构成,网络运行过程中存在能量阶段性受限现象,考虑到深空节点运行速度较高,一般为 8—12 km/s,使得节点通信距离在受限的同时,网络拓扑结构也将发生变化^[2]。此外,由于深空网络存在“遮掩”问题,即当深空节点运行至行星、恒星背面或遇到电磁射电源时,网络拓扑链路将处于中断状态^[3]。为此,研究人员提出了一种“存储—携带—转发”的路由模式,深空节点在接收到数据后,首先利用本地缓存存储数据,随后择机投递给下一跳节点缓存,从而实现数据完整转发的目的^[4]。目前,研究者基于该路由模式已取得一定的成效,在近地通信、远太阳系通信、火星通信等领域得到了一定程度的利用。

为改善深空网络运行过程中存在的节点能耗较高及数据投递问题,研究者提出了一些研究方案,在一定程度上缓解了相关问题。如 Asano 等^[5]提出了一种基于能量强度控制机制的优化算法,通过冗余深空节点设置冗余缓存,能够在数据传输带宽较高的情况下提高网络投递效率。但是,由于深空节点多为高价值卫星,使得该算法的经济效益较低,资源利用效果不佳。Ali 等^[6]提出了一种基于节点拓扑共线度优化算法,通过线性拓扑传输结构改进数据投递链路抖动性能,能够在一定程度上提高数据投递质量。不过,由于节点拓扑共线度方案对时延容忍度较低,使得深空节点处于高速移动状态时将会严重降低数据投递质量,从而导致算法失效。John^[7]等提出了一种基于超欧里几何距离控制机制的优化算法,通过预设立体通信拓扑球体,使得任意两点均能够实现数据连通。但是,由于该算法需要布设至少 4 个冗余节点,且深空通信过程中需要依靠脉冲星定位模型,使得算法存在精度较低的问题。

针对深空通信中存在的上述问题,提出了一种基于能耗奖励策略机制的深空网络优化算法。首先,引入节点间能耗博弈模型,基于能耗奖励策略并结合泛洪路由策略来设计数据投递机制。随后,采取能量剩余奖励模型来合理选取数据投递策略,从而达到改善节点传输能力目的,进而优化网络传输质量。最后,采用 MATLAB 仿真实验环境,证明了本文算法具有优越性能。

1 本文网络通信模型

首先,考虑到深空通信组网过程中存在的延迟特性^[8],本文对网络通信模型做出如下描述:

(1) DSN 网络中各节点均处于高速运动状态,但节点一般将不会通过直连模式进行数据交换,仅能透过中继节点方式交换数据。见图 1,节点 1 和节点 3 之间需要通过节点 2 进行数据交换。

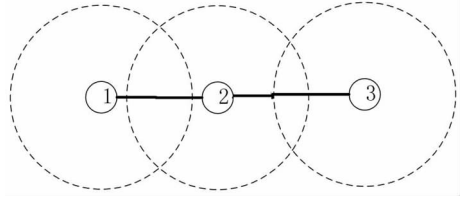


图 1 深空通信示例

(2) 节点进行数据交换过程中,需要通过演进集合选取相应的数据投递解空间,解空间 N 如下:

$$N = \{1, 2, 3, \dots, m\} \quad (1)$$

其中, m 表示解空间的第 m 个元素。

(3) 网络中处于存活状态的节点,默认各节点间均存在数据串扰因素,当数据处于串扰状态时满足分布列 Y :

$$Y = \{0, 1, 2, \dots, i\} \quad (2)$$

其中, i 表示分布列的第 i 个元素。

(4) 对数据交换策略集合 M 定义如下:

$$M = \left\{ (x_1, x_2, \dots, x_k) \mid x_j \geq 0, \sum_{j=1}^k x_j = 1 \right\} \quad (3)$$

其中, j 表示当前节点选取的数据交换策略, k 表示式(1)规定的的数据投递解空间数, x_j 表示当前节点进行数据交换时选取策略 j 的概率。

(5) 定义本文算法中当前节点采取策略 j 的经济效益函数 $U_{av}(j, x)$ 如下:

$$U_{av}(j, x) = \sum U(j, i, x) \quad (4)$$

其中, x 表示当前网络中节点个数,表示节点 j 在串扰节点总数为 i 时所获取的经济效益。由该模型可知,节点获取的经济效益与数据交换及串扰节点均存在加权关系。在获取当前节点 j 的经济效益后,可进一步得到该节点在整个收益周期内的期望收益 $F(x)$ 满足:

$$F(x) = \sum U_{av}(j, x) \quad (5)$$

式(5)中的相关参数同式(4)。

由式(5)可知期望收益为节点单次经济效益的

加权和。

(6)考虑到深空节点往往需要通过多个中继节点进行数据交换,且中继节点之间也存在数据博弈关系。本文对数据博弈关系(Data Game Relationship)予以如下描述:

由于网络初始化过程中,节点总数可按式(2)予以描述,即节点总数为各串扰节点总数的模:

$$x \in N \quad (6)$$

其中, x 表示任意串扰节点, N 表示各串扰节点组成的集合。

考虑到解空间可能会加入不同类型的串扰节点 Err,不妨做如下定义:

$$\text{Err} \in N \quad (7)$$

式(7)中参数同式(6)。

此时设置博弈参数 ϵ ,满足:

$$\epsilon \in (0,1) \quad (8)$$

因此加入串扰节点后的节点总数满足:

$$x \in \epsilon \cdot \text{Err} + x(1 - \epsilon) \quad (9)$$

式(9)中参数同式(6)及式(8)。

网络节点发生串扰后,未发生串扰的节点期望收益 $G(x)$ 可表现为如下形式:

$$G(x) = \epsilon \cdot \text{Err} \cdot \max \left(\sum x, \sum (1 - \epsilon)x \right) \quad (10)$$

其中式(10)中参数同式(6)~式(9)。

由式(10)可知,节点发生数据串扰后,期望收益函数具有二重性,可由整体节点和串扰节点共同确定。

2 算法设计

考虑到深空节点分布具有稀疏特性,因而各节点间通信交互过程均按图 1 所示的方式实现中继传输^[9]。由于深空节点一般需要围绕星球(火星、地球、太阳、月球)旋转,因而节点间数据接触周期满足参数为 $\lambda > 0$ 的指数分布^[10]。

数据报文结构如图 2 所示。节点进行数据交换过程中,首先需要通过解析数据报文以判断数据报文生成周期,若发现数据报文已过期,则将该段数据报文进行删除处理,以降低节点缓存的占用率。

下面通过能量剩余奖励模型^[11],分析节点进行数据交换时如何通过奖励机制进行数据传输。

Src	Dst	Timestamp	PreviousHop	NextHop	Data
-----	-----	-----------	-------------	---------	------

图 2 数据报文结构

本文算法在进行数据传输时,假定节点处于全动员时间 T 和部分动员时间 T' 两种状态,数据报文在全动员时间 T 内完成数据交换。对应节点能量剩余存在如下三种情况:全动员状态、部分动员状态、失效状态。当节点处于全动员状态时,该节点在传输周期内将占用数值为 T 的数据交换时间;当节点处于部分动员状态时,该节点在传输周期内将占用数值为 T' 的数据交换时间;当节点处于失效状态时将不再进行数据交换,将在经过占用数值为 T 的等待时间后,再次进行数据交换。

首先,在某个区域开始数据交换过程时,区域内存在源节点和中继节点。不妨设源节点在全动员时间 T 内进行数据交换,其中全动员时间 T 满足:

$$T = t_{i+1} - t_i \quad (11)$$

其中, i 表示数据发送序号。下面将具体描述本文设计的数据投递模型:

1)根据节点剩余能量的不同,节点启动相应的交换策略的概率为 $P_m(a)$,即当节点剩余能量处于 m 时,采取状态 a 的概率。若节点剩余能量满足全动员状态时,该交换策略的概率为 $P(T)$,其中 T 表示全动员时间。

2)节点处于全动员时间 T 和部分动员时间 T' 两种状态时,节点采用的数据交换策略集为 $H = \{dp, d(1-p), 1-d\}$, p 为节点处于全动员时间 T 采取策略的概率, p 为节点处于部分动员时间 T' 采取策略的概率, d 表示节点进入动员状态的概率。

当节点处于全动员时间 T 状态时,成功实现数据交换的概率为 $D = 1 - RT$,其中 RT 满足指数分布:

$$RT = \sum_{\lambda=1} (1 - \lambda T) e^{-\lambda T} \quad (12)$$

其中, λ 表示指数分布参数, e 表示自然底数,显然 RT 处于收敛状态。

当节点成功进行数据交换并将数据投递到目的节点时,将会得到 0.5 个单位的奖励,处于全动员时间 T 状态时获取 1 个单位收益的概率为 $P(T, N, x)$,当处于部分动员时间 T' 状态时获取 1 个单位收益的概率为 $P(T', N, x)$,则 $P(T', N, x)$ 满足:

$$P(T', N, x) =$$

$$(1-RT)\sum_{K=1}^N C_{K-1}^{N-1} \frac{[1-(1-RT)]^{N-K}}{K}$$

(13)

其中,RT 可通过式(12)获取, N 表示式(6)中解空间中节点总个数。

节点完成数据传输后,当仅当满足如下关系时,启动下一周期数据传输流程,否则将节点置为失效状态:

$$P(T',N,x) > P(T,N,x)$$

(14)

式(14)中参数同式(13)。

通过式(14)能够快速实现数据传输,因深空节点存在严重的能量受限现象,因此当处于部分动员时间状态时能够以较多的缓存实现数据报文的预存储状态,从而提升数据报文投递质量。

3 本文算法复杂度分析

由上述分析可知,本算法在运行过程中的成本主要表现在两个方面,即收益获取过程中的时间成本及启动下一数据传输流程时对中继节点搜寻的空间成本。从收益激励过程中仅在满足式(14)的情况下启动下一周期数据传输流程,时间复杂度为 $O(t)$,而本文所采取的对照组中两种算法均采用快速冒泡算法,时间复杂度为 λ ,显然要大大高于本文算法。此外,本文算法在启动下一数据传输流程时采用简单排列模型,空间复杂度为 θ ,节点数量增加时均按线性方式进行增长。因此本文算法具有时空复杂度较低的特点。

4 仿真实验与结果分析

4.1 仿真环境设置

为证明本算法的优越性能,采用 MATLAB 仿真实验环境^[12],针对本算法和当前深空网络常用的能量优化评估算法^[13](Energy Estimation Based Routing Protocol for Delay Tolerant Network,EE 算法)和时延容忍度优化算法^[14](Delay Tolerance For Stochastic Complex Networks,SC 算法)。仿真场景为近地轨道、地球一月球轨道、地一火转移轨道三种环境,卫星节点按照万有引力定律梯次分布,节点移动模型采用 Shortest Path Map Based Movement,节点数设置为 100 个。本文算法的其他参数设置见表 1。

表 1 中 λ 同式(12)中设定, θ 表示各轨道上总共可用节点集合, θ' 表示各轨道上同时可用最大节点结合, $P_{\delta}(\theta)$ 表示节点失效概率,用以模拟因太阳风等情况导致节点失联情形, $P_{\delta}(\theta')$ 表示可用节点在下一时刻失效概率,用以模拟深空通信高中断的情况。

表 1 本文算法参数

参数	λ	θ	θ'	$P_{\delta}(\theta)$	$P_{\delta}(\theta')$
参数设定值	0.01	100	40	0.3	0.8

仿真测试指标设置为数据投递率、网络时延、数据存储时间。

4.2 数据投递率

图 3 显示了本文算法与 EE 算法和 SC 算法在近地轨道、地一月轨道、地一火转移轨道三种环境下数据投递率仿真测试结果。由图可知,本文算法具有数据投递率较高的特点,这是由于本文算法基于能耗奖励策略并结合泛洪路由策略设计数据投递机制,采取能量剩余奖励模型合理选取数据投递策略,具有数据重传输现象较低的特点,因而数据投递率较高。EE 算法主要采用休眠机制节约节点能量,当仅当节点能量满足发射要求时进行数据投递,使得数据重传输发生频繁,降低了数据投递率。SC 算法为提高深空条件下数据投递效率,采用时延容忍的方式频繁投递节点数据,在深空网络带宽受限情况下极易发生网络拥塞现象,使得该算法数据投递率要低于本文算法。

4.3 网络时延

图 4 显示了本文算法与 EE 算法和 SC 算法在近地轨道、地一月轨道、地一火转移轨道三种环境下网络时延仿真测试结果。由图可知,本文算法具有网络时延较低的特点,这是由于本文算法采用泛洪路由策略设计数据投递机制,节点可通过能耗奖励机制合理选取数据投递链路和下一跳节点,具有网络传输链路运行稳定的特点,因而数据投递能力较强,使得本文算法网络时延较低。EE 算法主要采用休眠机制节约节点能量,节点无法全时段投递网络数据,使得节点将会频繁选取下一跳节点进行数据重传输流程,网络拥塞现象较为严重,降低了数据投递能力,使得该算法的网络时延高于本文算法。SC 算法为提高深空条件下数据投递效率,基于时延容忍方案部署数据重传输流程,网络传输链

路占用较为严重,数据拥塞难以得到处理,使得该算法的网络时延亦要高于本文算法。

塞发生概率较低,数据无须长时间存储于中继节点以便成功投递,使得本文算法数据存储时间较短。EE 算法主要采用休眠机制节约节点能量,需要将数据存储于节点缓存以便尽量节约传输能量,使得数据频繁投递现象较为严重,网络畅通度不高,增加了数据存储时间。SC 算法为提高深空条件下数据投递效率,基于时延容忍方案部署数据重传输流程,数据投递不成功时将自动启动重传输流程,提高了网络拥塞程度,使得该算法数据存储时间高于本文算法。

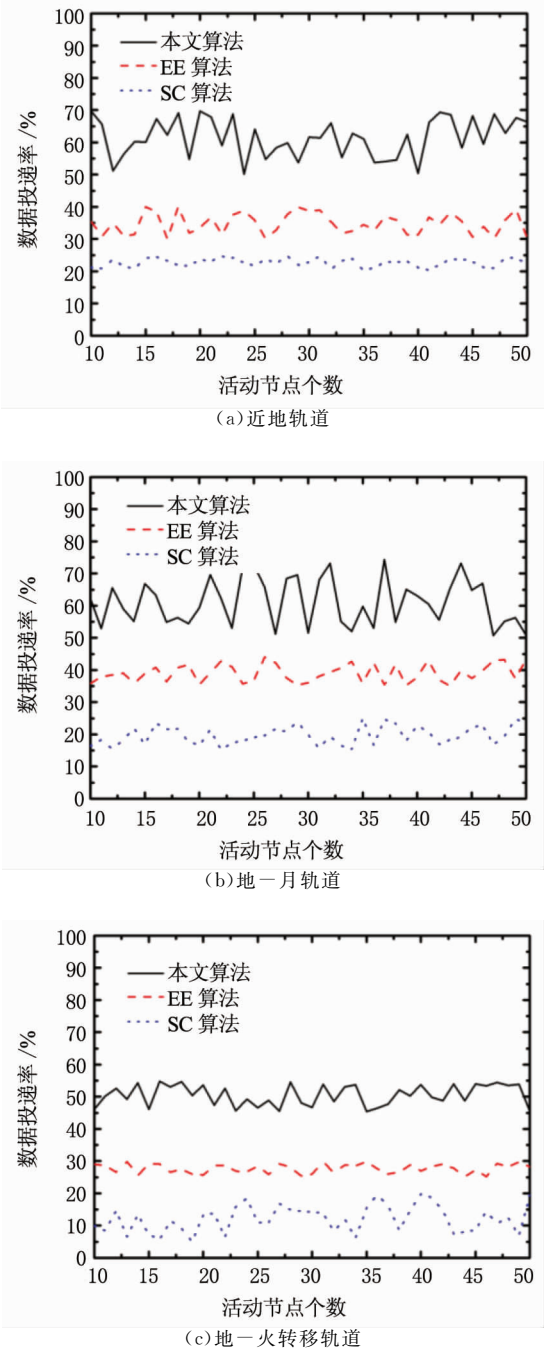


图 3 数据投递率测试结果

4.3 数据存储时间

图 5 显示了本文算法与 EE 算法和 SC 算法在近地轨道、地一月轨道、地一火转移轨道三种环境下数据存储时间仿真测试结果。由图可知,本文算法数据存储时间始终低于对照组算法,这是因为本文算法结合能量奖励机制和泛洪路由策略设计数据投递链路,具有网络畅通度较高的特点,网络拥

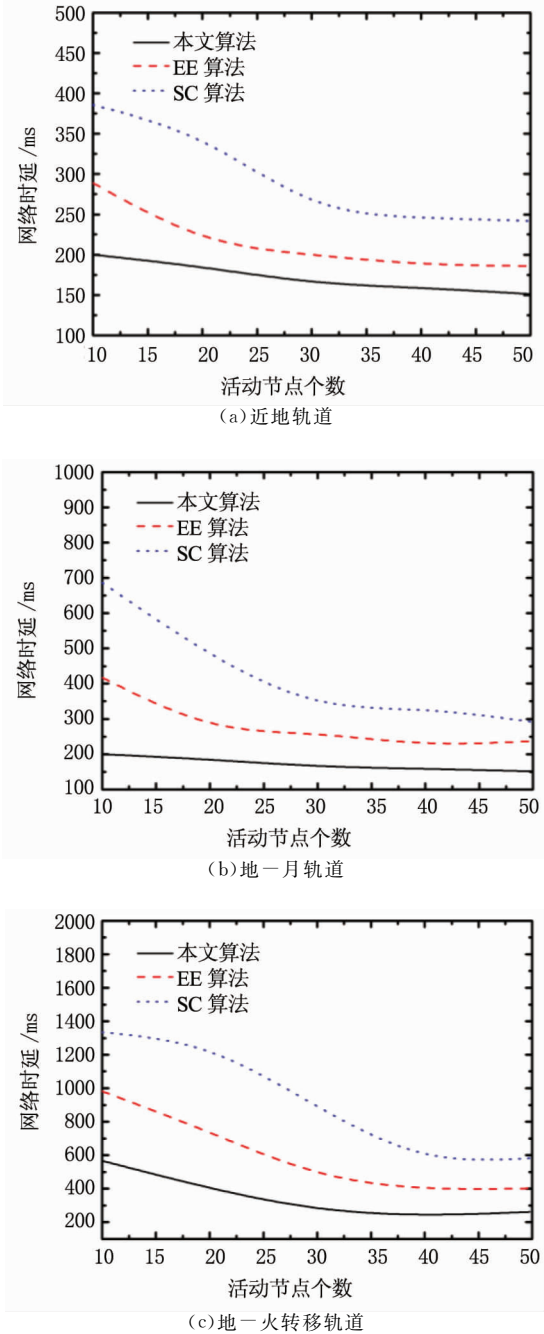
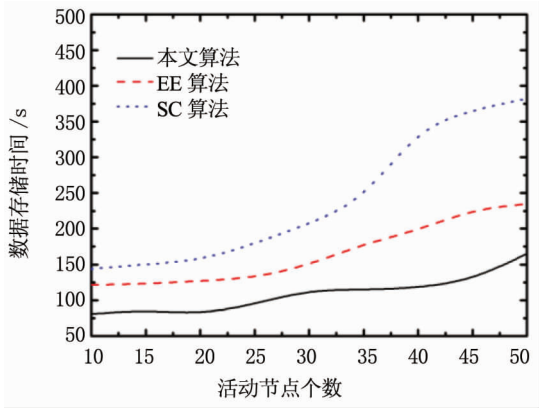
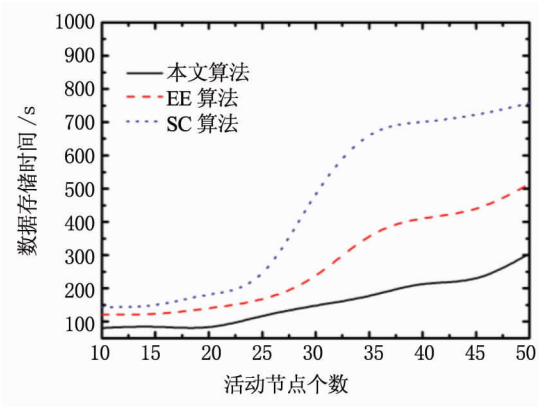


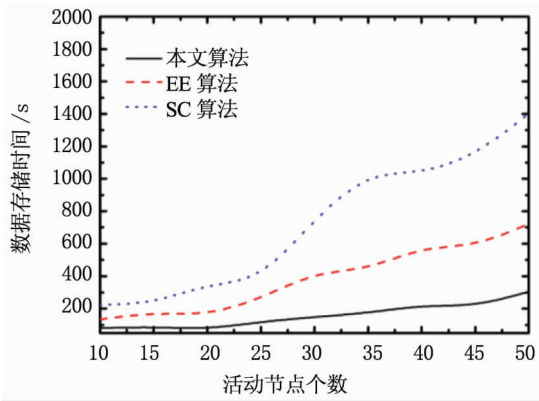
图 4 网络时延测试结果



(a) 近地轨道



(b) 地一月轨道



(c) 地一火转移轨道

图 5 数据存储时间测试结果

5 结 论

为解决深空通信存在的数据投递效率不高,网络转发能力不强及网络时延严重等不足,提出了一种基于能耗奖励策略机制的深空网络优化算法。算法主要基于能耗奖励策略并结合泛洪路由策略设计数据投递机制,采取能量剩余奖励模型合理选取数据投递策略,以达到改善节点传输能力目的。

下一步,将针对本文算法对低密度深空通信适应性不足的问题,拟引入一体化路由映射休眠机制,以提升本文算法在诸如战术卫星网、近日通信

组网等方面的适用范围,增强算法的社会效益和经济效益。

参考文献

- [1] BEBORTTA S, SINGH K S, RATH M, et al. Dynamic framework towards sustainable and energy-efficient routing in delay tolerant IoT-based WSNs [J]. International Journal of Systems, Control and Communications, 2024, 15 (1): 79–94.
- [2] KHAN S, SAEED K, MAJEED F M, et al. Range aware message drop policy for delay tolerant networks. [J]. Peer J. Computer Science, 2024, 10(P1): e2087-e2099.
- [3] SRINIVAS M, AMGOTH T. Delay-tolerant charging scheduling by multiple mobile chargers in wireless sensor network using hybrid GSFO [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2023, 14 (12): 16063–16079.
- [4] SATOSHI F. Approximating minimum k-tree cover of a connected graph inspired by the multi-ferry routing in delay tolerant networks [J]. International Journal of Foundations of Computer Science, 2023, 35 (7): 841–856.
- [5] ASANO H, OKADA H, NAILA B C, et al. Communication-aware flight algorithms for UAV-based delay-tolerant networks: regular section [J]. IEICE Transactions on Communications, 2023, 106 (11): 1122–1132.
- [6] ALI A, RAZA H. A multi-attribute-based data forwarding scheme for delay tolerant networks [J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 80 (5): 6356–6381.
- [7] JOHN C L, ALEXANDER R C, NORAH C M, et al. A delay-tolerant network approach to satellite pickup and delivery scheduling [J]. Ad Hoc Networks, 2023, 151(69): 1–13.
- [8] 杨雄飞, 刘凤, 赵鑫, 等. 结合节点剩余相遇间隔改进 Prophet 路由算法 [J]. 计算机应用与软件, 2023, 40 (11): 111–117.
- [9] 王金凤, 张芷芯, 冯立杰, 等. 基于 LDA 与共现网络动态分析的技术机会识别 [J]. 科研管理, 2024, 45 (2): 176–188.
- [10] 靳紫阳, 刘玉梅. 针对黑洞攻击的机会网络安全路由研究 [J]. 应用科技, 2023, 50 (6): 82–86.
- [11] ROMERO V M, SANTIAGO B D, NUEVO J Z. A hybrid recommendation scheme for delay-tolerant networks: the case of digital marketplaces [J]. Array, 2023, 19 (3): 100299–100321.
- [12] MEMON A, KILBY J, MUNJAL R, et al. Sustainable next-generation network design using social aware and delay tolerant approach [J]. Journal of Communications, 2023, 18 (7): 24–31.
- [13] AYUB Q, RASHID S. Energy estimation based routing protocol for delay tolerant network [J]. Wireless Personal Communications, 2024, 138(2) 1–21.
- [14] CHENG L I, REN Y. Delay tolerance for stochastic complex networks [J]. International Journal of Control, 2024, 97(6): 1191–1197.