

高动态空地一体化网络资源表征与分配建模 ——双尺度时变图建模与应用

何立军¹, 李雨彤², 贾子晔³, 汪彦婷², 王洪梅¹, 李世银¹

(1. 中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 西北工业大学软件学院, 陕西 西安 710072);

3. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 210024

摘要: 空地一体化网络因具有高速运动低轨卫星、高机动空基平台以及快速移动的地面节点而呈现“时变拓扑、异构链路、跨域耦合”的显著特征, 导致网络资源状态在分钟级拓扑重构与秒级/毫秒级业务涌浪之间剧烈振荡。传统单尺度时变图模型以固定时隙方式离散化该过程, 出现“粒度失配、复杂度爆炸、表征失真”三重瓶颈问题。为此, 提出双尺度时变图模型, 在拓扑-业务双驱动框架下实现高动态网络资源演化精准刻画。同时, 基于双尺度时变图模型进一步构建高动态网络资源分配模型, 实现空间业务与空间资源的高效精准匹配。仿真结果表明, 所提双尺度时变图模型在表征精度与计算效率上具有双重优势, 为空地一体化网络高动态资源管控提供理论工具。

关键词: 空地一体化网络; 双尺度时变图; 高动态网络资源管理; 时间窗

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2026007

Modeling for Resource Representation and Allocation in Highly-Dynamic Space-Air-Ground Integrated Network ——Dual-Scale Time-Varying Graph Modeling and Applications

He Lijun¹, Li Yutong², Jia Ziyue³, Wang Yanting², Wang Hongmei¹, Li Shiyin¹

1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2. School of Software, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

3. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210024, China

Abstract: The space-air-ground integrated network (SAGIN) exhibits pronounced characteristics of time-varying topology, heterogeneous links, and cross-domain coupling, all driven by high-velocity LEO satellites, highly maneuverable aerial platforms, and rapidly moving terrestrial nodes, which together cause network resource states to oscillate violently between minute-level topology reconfigurations and second or millisecond-level traffic surges. Conventional single-scale time-varying graph models discretize this process with fixed time slots, incurring a triple bottleneck of granularity mismatch, complexity explosion, and representation distortion. To address these issues, this paper proposes the dual-scale time-varying graph (DSTVG), which, under a topology-traffic co-driven framework, enables accurate characterization of high-dynamic network resource evolution. Additionally, a high-dynamic network resource allocation model is built upon DSTVG to achieve efficient and precise matching between spatial traffic demands and spatial resources. Simulation results demonstrate that the dual advantages of the proposed DSTVG in representation accuracy and computational efficiency, offering a scalable theoretical tool for high-dynamic resource management in SAGIN.

Keywords: space-air-ground integrated network, dual-scale time-varying graph, high-dynamic network resource management, contact windows

收稿日期: 2025-07-21; 修回日期: 2025-10-19

基金项目: 国家自然科学基金 (No.62201463, No.62301251)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62201463, No.62301251)

0 引言

天空地一体化网络 (space-air-ground integrated network, SAGIN) 以地面蜂窝网与互联网为底座, 向上无缝融合高中低轨多层卫星、平流层气球/高空长航时无人机集群以及海面机动节点等, 形成“天-空-陆-海全域立体网络架构”^[1]。SAGIN 在体系架构上遵循“天网空地网”理念: 天基网提供全球泛在接入, 空基网扩展机动热点增强, 地基网承载核心回传与算力锚点, 三者通过星间、星-空、空-地 (海)、地-海等多体制链路耦合, 实现“全球覆盖、随遇接入、按需服务、安全可靠”的一体化信息供给。因此, SAGIN 已跃升为掌控网络新边疆、太空高边疆、海洋远边疆的战略性公共信息基础设施之一。

然而, SAGIN 因含有高速运动低轨卫星平台、高机动空基平台以及快速移动地面节点等而呈现“时变拓扑、异构链路、跨域耦合”的显著特征: 低轨卫星以 km/s 级轨道速度引发分钟级星地链路 (satellite-ground-link, SGL) 和星间链路 (inter-satellite-link, ISL) 重构; 高空无人机群通过秒级姿态调整造成空-空、空-地 (海) 链路通断突变; 地面车辆与舰船则以 m/s 级位移触发接入链路毫秒级切换。三者共同导致网络拓扑在宏观 (分钟级) 与微观 (秒级/毫秒级) 双重时间尺度上演化, 并伴随激光、毫米波、Ku/Ka 频段等多体制通信链路的异构性。网络资源状态因此呈现“慢漂移-快抖振”耦合振荡, 链路可用带宽、缓存与计算能力在秒级内可发生数量级跃迁。然而, 现有表征框架因粒度单一, 无法同时解析拓扑慢变量与业务快变量, 使得资源利用率提升遭遇理论瓶颈。因此, 构建跨尺度、低复杂度、高保真的资源表征模型已成为释放 SAGIN 空间潜能的关键挑战。

面向 SAGIN 的资源表征模型一直是学术界的研究热点^[2]。早期研究采用时间窗口模型将空间数据传输问题转化为带时间窗的任务调度, 虽贴合链路可见性, 但时间窗约束的嵌套导致问题求解具有 NP-hard 复杂度, 启发式^[3]、元启发式^[4-5]或博弈论^[6-7]算法难以在多项式时间内获得可证最优解。随后, 兴起的快照图模型^[8]将动态拓扑离散为系列静态图, 虽简化了单一时段的资源计算, 却带来指数级增长的快照数量及跨快照资源割裂, 无法实现全局最优。

为弥补快照间网络资源难以全局优化的不足, 时变图模型逐渐被提出并应用到 SAGIN 中。时变图模型的主

要思想是通过在静态图间添加边, 实现不同静态图间网络资源共享, 进而将一个动态网络拓扑统一表征为一个静态图。具体地说, 一组存储边被添加到任意两个相邻的静态图中的相同节点, 形成一个巨大的静态图, 从而借助经典图算法进行求解。现有工作可归纳为如下两大类。

(1) 借助时变图进行问题建模。Liu 等^[9]使用时变图模型将小卫星网络吞吐量最大化问题建模为混合整数线性规划问题。Zhou 等^[10]基于时变图模型给出了数据中继卫星网络的数据传输问题的混合整数线性规划形式。Liu 等^[11]通过时变图模型将空间信息的数据量最大化网络受益问题建模为一个混合整数二次规划问题。He 等^[12]用时变图模型描述低轨卫星间连接关系并将低轨道卫星网络负载均衡协同卸载问题建模为混合整数非线性规划问题。

(2) 使用时变图进行问题转化。Jia 等^[13]首次使用时变图模型对低轨道卫星间数据传输协同问题进行建模, 并从构建的时变图模型中分离出二部图。基于此, 可直接利用最大匹配算法 Ford-Fulkerson 对所研究问题求最优解。Wang 等^[14]通过研究时变图模型表征方法, 将对地观测系统中网络吞吐量最大化问题转化为图论中经典最大流问题。鉴于此, 可直接使用图论中经典算法 Push-Relabel 对其求最优解。

近年来, 一些基于时变图模型的新型图模型被提出, 旨在扩大其表征能力范围, 例如能量时变图模型^[15]和多功能时变图模型^[16]。能量时变图模型是在时变图模型基础上增加虚拟节点和虚拟边, 并将能量消耗刻画为虚拟边上权重, 从而具备对能耗资源的表征能力。多功能时变图模型是针对软件定义 SAGIN 场景, 将时变图模型中具备多个计算功能的节点虚拟为一个虚拟子节点、多个虚拟功能节点和虚拟传输链路。其中, 虚拟子节点只提供数据中继服务, 每个虚拟功能节点对应一种计算功能。此外, 虚拟传输链路将虚拟子节点与虚拟功能节点相连接形成路径。因此, 多功能时变图模型具备刻画多功能计算资源的表征能力, 同时大幅增加了图模型构建复杂度。

上述图模型本质上是单尺度时变图, 但上述工作采用单一固定粒度离散化多尺度过程, 必然导致如下问题: 首先是粒度失配, 即分钟级拓扑漂移与毫秒级业务涌浪无法在同一时隙内被兼顾; 其次是复杂度爆炸, 即指数级增长的链路数和节点数会带来存储与计算灾难; 最后是表征失真, 即固定粒度抹平了微观资源抖动, 造成容

量估计偏差。造成上述问题的根本原因在于，这些图模型忽略了网络拓扑变化与资源/业务更新的时间尺度差异。因此，亟须一种多尺度、低复杂度、高保真的资源表征框架，精准刻画“宏观拓扑慢变-微观资源快变”的耦合演进，为高效的数据传输方法设计提供理论支撑。本文主要贡献概括如下：第一，利用低轨卫星与地面节点可见时间窗的轨道周期特征，构造分钟级大尺度时隙，将SAGIN全局拓扑漂移锁定为慢变量；第二，在每个大尺度时隙内，依据业务到达强度自适应划分为秒级/毫秒级小尺度时隙，精确实时捕获业务突发与网络资源更新；第三，构建双尺度时变图（dual-scale time-varying graph, DSTVG），通过“宏观拓扑-微观资源”双层状态空间，将分钟-毫秒耦合的高维动态资源管理问题一次性降维到等价的静态图资源分配形式；第四，建立DSTVG-驱动的资源分配模型，实现业务需求与链路/缓存/能耗资源的跨域精准匹配。仿真结果表明，所提DSTVG模型在表征精度与计算效率上具有双重优势，为SAGIN的高动态资源管理提供了兼具精度与可扩展性的理论工具。

1 高动态SAGIN双尺度资源表征模型

首先，给出当前高动态SAGIN系统描述；然后，提出一种DSTVG模型，以表征高动态SAGIN资源表征模型，具体包括时隙划分方法与DSTVG模型的构建方法；最后，对DSTVG模型构建复杂度进行分析。

1.1 高动态SAGIN系统构成

如图1所示，SAGIN由天基网、空基网和地基网构成。其中，天基网由分布在不同轨道高度的众多卫星网络节点组成；空基网由各类空中飞行器和用户终端等网络节点构成；地基网则涵盖地面通信设施以及海上用户设备等网络节点。通过SGL、ISL以及地面通信链路，SAGIN实现了多层异构网络的无缝连接。用 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示网络节点集合，其中， N 为网络节点总数。用 $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ 表示任务集合，其中， M 表示任务总数。每个任务 $m \in \mathcal{M}$ 被建模为一个六元组 $(u_m, D_m, t_m, \zeta_m, g_m, \varpi_m)$ ，其中， u_m 表示任务 m 的源网络节点， D_m 表示任务 m 的数据量， t_m 表示任务 m 的到达时刻， ζ_m 表示任务 m 的截止时间， g_m 表示任务 m 的目的网络节点， ϖ_m 表示任务 m 的优先级。一个任务 m 被成功完成是指任务 m 在到达时刻 t_m 从源网络节点 u_m 出发并在截止时间 ζ_m 之前到达目的网络节点 g_m 。

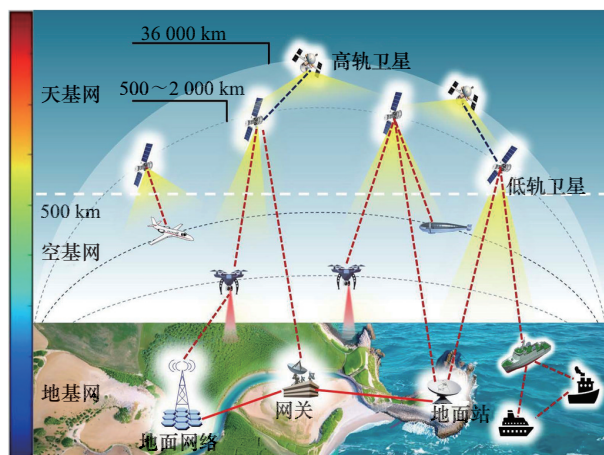


图1 SAGIN场景

1.2 双尺度模型构建

在SAGIN中存在快速运动的网络节点（如低轨卫星），使得网络节点只有移动到彼此可覆盖的范围时才能传输任务数据。快速运动的网络节点一方面带来了较大网络覆盖范围和传输容量，另一方面也带来了高动态网络拓扑。为此，传统单尺度时变图采用固定时隙方法将高动态网络拓扑转化为每个时隙内静态图。然而，这种固定时隙方式会生成巨大的图模型，导致空间复杂度较高，根本原因在于传统单尺度图模型忽视了高动态网络拓扑变化与网络资源动态变化之间的时间尺度差异性。本文所提的DSTVG模型在大时间尺度上刻画SAGIN拓扑结构高动态变化，从小时间尺度上表征时变网络资源，准确表征网络资源在双时间尺度上的演进承接关系，以较低复杂度将高动态网络资源分配问题转变为静态图中的资源分配问题，简化网络资源管理复杂度，提升求解效率与质量。首先，基于网络拓扑变化信息构建大尺度时隙，准确表征SAGIN的网络拓扑结构随时间演进的变化关系；然后，在每个大尺度时隙内构建小尺度时隙，实时捕捉网络资源状态和空间任务信息；最后，在双尺度时隙上构建DSTVG模型，准确表征SAGIN中多维网络资源在不同时间尺度之间的承接关系，为高动态网络资源的高效管理提供保障。

1.2.1 双尺度时隙构建策略

SAGIN由中继卫星、低轨卫星、飞机与地面站等不同空间的多个网络节点组成，网络节点之间的通信具有视距特性，即任意节点对之间在可视范围内才能进行通信。因此，SAGIN的网络拓扑会随时间快速变化。高动态的网络拓扑主要体现在低轨卫星的高速运动导致的SGL和ISL的间歇性特征上。为此，使用通信时间窗口表征网

络节点间的间歇性链路。每个通信时间窗口表示一个具有开始时刻和结束时刻的间隔,用二维数组 (st_p, et_p) 表示,其中, p 表示时间窗口编号, st_p 表示开始时刻, et_p 表示结束时刻。用 $Q^{TW} = \{(st_1, et_1), (st_2, et_2), \dots, (st_Q, et_Q)\}$ 表示时间窗口集合,其中 Q 为时间窗口总数。显然,这些通信时间窗口在时间轴上形成了一组时刻点集合,其中,两个相邻的时刻点形成一个时间间隔。将每个时间间隔称为大尺度时隙,并用二元组 $[T_{k-1}, T_k]$ 表示,其中, k 表示大尺度时隙索引号, T_{k-1} 表示大尺度时隙的开始时刻, T_k 表示大尺度时隙的结束时刻。用 $\mathcal{K} = \{[T_0, T_1], [T_1, T_2], \dots, [T_{K-1}, T_K]\}$ 表示大尺度时隙集合,其中, K 表示大尺度时隙总数。将每个大尺度时隙均匀划分为一组等长的小时间尺度时隙,完成小尺度时隙集合构建。具体而言,将任意大尺度时隙 $[T_{k-1}, T_k]$ 均匀划分为 $\left\lfloor \frac{T_k - T_{k-1}}{\tau} \right\rfloor$ 个长度为 g_m 的小尺度时隙,进而构建对应第 k 个大尺度时隙的小尺度时隙集合: $\mathcal{T}_k = \{(T_{k-1} + (\sigma_k - 1)\tau, T_{k-1} + \sigma_k\tau), \sigma_k = 1, \dots, \left\lfloor \frac{T_k - T_{k-1}}{\tau} \right\rfloor\}$ 。用 $\mathcal{T} = \{\mathcal{T}_k\}$ 表示小尺度时隙集合。双尺度时隙构建流程如下。

1. 构建 SAGIN 节点集合 $N = \{1, 2, \dots, N\}$, 包括卫星节点集合和地面站节点集合。

2. 将卫星节点集中所有卫星的星历表与地面站集中所有地面站节点的经纬度导入卫星工具箱 (STK), 计算出所有网络节点间的通信时间窗口, 构建时间窗口集合 Q^{TW} 。

3. 根据时间窗口集合 Q^{TW} 构建时刻集合 $\pi^{TW} = \{st_1, st_2, \dots, st_Q\} \cup \{et_1, et_2, \dots, et_Q\}$ 。

4. 将时刻集合 π^{TW} 中元素去重后按升序排列获得集合 $\mathcal{T}^{TW} = \{T_0, T_1, \dots, T_K\}$ 。

5. 根据集合 \mathcal{T}^{TW} 构建大尺度时隙集合 \mathcal{K} 。

6. 遍历大尺度时隙集合 \mathcal{K} , 将每个大尺度时隙均匀划分为一组长度为 g_m 的小尺度时隙, 构建小尺度时隙集合 \mathcal{T} 。

7. 输出: 大尺度时隙集合 \mathcal{K} 和小尺度时隙集合 \mathcal{T} 。

与传统的固定时隙策略相比, 上述双尺度时隙构建策略具有如下优势: 大尺度时隙可以准确表征 SAGIN 的网络拓扑结构随时间的演进变化关系; 在划分大尺度时隙的基础上, 进行小尺度时隙的划分, 可以进一步表征网络资源实时性与任务突发性, 进而可以高效地将高动

态网络中的资源管理问题转化为图论中的经典问题, 减少问题求解复杂度, 提高问题的求解质量。

1.2.2 DSTVG 构建策略

基于所提的双尺度时隙构建策略生成大尺度时隙集合与小尺度时隙集合, 建立 DSTVG 表征模型 $G_T = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{W})$, 其中, \mathcal{V} 为图 G_T 中的顶点集合, \mathcal{E} 为图 G_T 中的边集合, \mathcal{W} 为图 G_T 中的边权值集合。其中, 边集合 \mathcal{E} 包括传输边集合 \mathcal{E}_{Com} 和存储边集合 \mathcal{E}_{Stor} 。依次构建图 G_T 的顶点集合 \mathcal{V} 、边集合 \mathcal{E} 和边权值集合 \mathcal{W} , 构造方法如下。

1. 时变图层次划分: 根据大尺度时隙集合 \mathcal{K} 内大尺度时隙的数量 K , 初始化一个 K 层的有向图 G_T , 用 $G_{T_k} = (\mathcal{V}_k, \mathcal{E}_k, \mathcal{W}_k)$ 表示第 k 个大尺度时隙内的子时变图, 其中, \mathcal{V}_k 为图 G_{T_k} 中的顶点集合, \mathcal{E}_k 为图 G_{T_k} 中的边集合, \mathcal{W}_k 为图 G_{T_k} 中的边权值集合。

2. 顶点集合构造: 在每个大尺度时隙 $[T_{k-1}, T_k]$ 内对所有网络节点构建顶点, 获得集合 $\mathcal{V}_k = \{v_i^k\}$, 其中 v_i^k 表示第 i 个网络节点在第 k 个大尺度时隙内对应的顶点, 进而构建 DSTVG 中 G_T 的顶点集合 $\mathcal{V} = \{\mathcal{V}_k, k = 1, \dots, K\}$ 。

3. 传输边集合 \mathcal{E}_{Com} 构建: 对于每个大尺度时隙 $[T_{k-1}, T_k]$, 判断顶点集合 \mathcal{V}_k 中顶点 v_i^k 和 v_j^k 间是否存在通信链路, 如存在从第 i 个网络节点到第 j 个网络节点的通信链路, 则更新对应于大尺度时隙 $[T_{k-1}, T_k]$ 的传输边集合 $\mathcal{E}_k^{Com} = \mathcal{E}_k^{Com} \cup (v_i^k, v_j^k)$, 如存在从第 j 个网络节点到第 i 个网络节点的通信链路, 则更新集合 $\mathcal{E}_k^{Com} = \mathcal{E}_k^{Com} \cup (v_j^k, v_i^k)$, 进而构建传输边集合 $\mathcal{E}_{Com} = \{\mathcal{E}_k^{Com}\}$ 。

4. 存储边集合 \mathcal{E}_{Stor} 构建: 依次对顶点集合 \mathcal{V}_k 和 \mathcal{V}_{k+1} 中相同网络节点对应的顶点 v_i^k 和 v_i^{k+1} 构建有向边 (v_i^k, v_i^{k+1}) , 更新存储边集合 $\mathcal{E}_{Stor} = \mathcal{E}_{Stor} \cup (v_i^k, v_i^{k+1})$ 。

5. 边集合 \mathcal{E} 构建: 更新边集合 $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{Com} \cup \mathcal{E}_{Stor}$ 。

6. 边权值集合 \mathcal{W} 构建: 遍历边集合 \mathcal{E} 中任意边 e , 如果 $e = (v_i^k, v_j^k)$ 为传输边, 则有 $w_e = C_{v_i^k, v_j^k}(t)$, 如果 $e = (v_i^k, v_i^{k+1})$ 为存储边, 则有 $w_e = B_{v_i^k}^{max}$, 进而更新 $\mathcal{W} = \mathcal{W} \cup w_e$, 其中, w_e 为边 e 的权重值, $C_{v_i^k, v_j^k}(t)$ 表示在小时间尺度时隙 t 中通信边 (v_i^k, v_j^k) 的信道容量, $B_{v_i^k}^{max}$ 表示边 (v_i^k, v_i^{k+1}) 的最大存储空间。

7. 输出: 双尺度资源时变图表征模型 $G_T = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{W})$ 。

通过 DSTVG 模型构建策略可构建出 DSTVG 模型如图 2 所示, 将整个时间轴划分为 3 个大尺度时隙 $[T_0, T_1]$ 、 $[T_1, T_2]$ 和 $[T_2, T_3]$, 获得 19 个长度相等的小尺度时隙, 构

建 18 个顶点以及 21 条边，其中，边分为存储边和通信边两种。容易观察到在两两相邻的大尺度时隙中网络拓扑是不一样的。此外，当空间任务到达时，可为其选择合适的路径以优化网络资源。

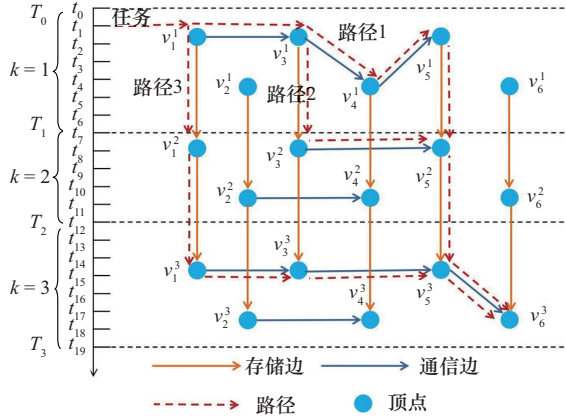


图 2 DSTVG 模型

1.2.3 复杂度分析

与现有表征方式相比，基于 DSTVG 的网络资源表征模型具有准确度高、复杂度低的优势。具体来说，根据大尺度时隙划分产生的时变图比现有的表征方式所产生的图规模更小，求解复杂度更低，而小尺度时隙的划分可以用于表示能够对资源进行调配的最小时间单位，与现有的表征方式相比，更能体现出网络资源与空间任务的突发性和实时性，使求解更精确。基于该模型，可以将现实场景中的任务转化为图论中的经典问题。

在一个节点数量为 n 的 SAGIN 中，假设节点之间存在 m 种通信的可能。已知调度周期为 $[T_0, T_K]$ ，每个小尺度时隙长度为 g_m ，则传统单尺度时变图的时隙数为 $\frac{T_K - T_0}{\tau}$ 。因此，可获得传统单尺度时变图的顶点数为 $\left(\frac{T_K - T_0}{\tau}\right)n$ ，存储边总数为 $\left(\frac{T_K - T_0}{\tau} - 1\right)n$ ，通信边总数为 $\left(\frac{T_K - T_0}{\tau}\right)m$ 。进而，可计算出传统单尺度时变图构建复杂度为 $O\left(\frac{T_K - T_0}{\tau}(2n + m) - n\right)$ 。构建 DSTVG 的顶点数 Kn ，存储边总数为 $(K - 1)n$ ，通信边总数为 Km ，可得 DSTVG 构建复杂度为 $O(K(2n + m) - n)$ 。显然有 $\frac{T_K - T_0}{\tau} \gg K$ ，由此可知，DSTVG 构建复杂度远小于传统单尺度时变图构建复杂度。

2 高动态 SAGIN 资源分配优化模型

2.1 基于 DSTVG 的系统模型表示

为方便建模，将 DSTVG 中传输边集合 \mathcal{E}_{Com} 按照通信链路种类进一步划分为星间链路边集合 $\mathcal{E}_{\text{Com}}^{\text{ISL}}$ 和星地链路边集合 $\mathcal{E}_{\text{Com}}^{\text{SGL}}$ 。如果边 $(v_i^k, v_j^k) \in \mathcal{E}_{\text{Com}}^{\text{ISL}}$ ，网络节点 v_i^k 和 v_j^k 之间 ISL 在小尺度时隙 t 内的信道容量 $C_{v_i^k, v_j^k}^{\text{ISL}}(t)$ 可计算为：

$$C_{v_i^k, v_j^k}^{\text{ISL}}(t) = g_{v_i^k, v_j^k}^{\text{ISL}}(t) P_{v_i^k, v_j^k}(t), \forall t \in \mathcal{T}_k, k \quad (1)$$

其中， $P_{v_i^k, v_j^k}(t)$ 是小尺度时隙 t 内顶点 v_i^k 的发射功率， $g_{v_i^k, v_j^k}^{\text{ISL}}(t)$ 是小尺度时隙 t 内边 (v_i^k, v_j^k) 的信道增益，计算为：

$$g_{v_i^k, v_j^k}^{\text{ISL}}(t) = \frac{G_{v_i^k}^{\text{tran}}(t) G_{v_j^k}^{\text{rec}}(t) L_f(t) L_l(t)}{\kappa T_s (E_b/N_0)_{\text{req}} M_0}, \forall t \in \mathcal{T}_k, k \quad (2)$$

在式(2)中， $G_{v_i^k}^{\text{tran}}(t)$ 表示小尺度时隙 t 中顶点 v_i^k 的发射天线增益， $G_{v_j^k}^{\text{rec}}(t)$ 表示小尺度时隙 t 中顶点 v_j^k 的数据接收天线增益， $L_f(t)$ 是小尺度时隙 t 中的自由空间损耗， $L_l(t)$ 是小尺度时隙 t 中的总线损耗， κ 是玻尔兹曼常数， T_s 是系统总噪声温度， $(E_b/N_0)_{\text{req}}$ 是接收的每位能量与噪声密度的要求之比， M_0 是链路裕量。

如果边 $(v_i^k, v_j^k) \in \mathcal{E}_{\text{Com}}^{\text{SGL}}$ ，网络节点 v_i^k 和 v_j^k 之间 SGL 在小尺度时隙 t 内的信道容量 $C_{v_i^k, v_j^k}^{\text{SGL}}(t)$ 可以通过香农公式计算得到，即：

$$C_{v_i^k, v_j^k}^{\text{SGL}}(t) = B_c \log_2 \left(1 + \gamma_{v_i^k, v_j^k}(t) \right), \forall t \in \mathcal{T}_k, k \quad (3)$$

其中， B_c 为链路带宽， $\gamma_{v_i^k, v_j^k}(t)$ 为小尺度时隙 t 内的边 (v_i^k, v_j^k) 的信噪比，计算为：

$$\gamma_{v_i^k, v_j^k}(t) = g_{v_i^k, v_j^k}^{\text{SGL}}(t) P_{v_i^k, v_j^k}(t), \forall t \in \mathcal{T}_k, k \quad (4)$$

在式(4)中， $g_{v_i^k, v_j^k}^{\text{SGL}}(t)$ 表示小尺度时隙 t 内边 (v_i^k, v_j^k) 的信道增益，具体定义为：

$$g_{v_i^k, v_j^k}^{\text{SGL}}(t) = \frac{G_{v_i^k}^{\text{tran}}(t) G_{v_j^k}^{\text{rec}}(t) L_f(t) L_l(t)}{N_0}, \forall t \in \mathcal{T}_k, k \quad (5)$$

其中， N_0 是噪声功率。

假设 SAGIN 的总能耗仅包括任务传输的动态能耗，不考虑静态能耗。任务在小尺度时隙 t 内在边 (v_i^k, v_j^k) 上传输的动态能耗 $E_{v_i^k, v_j^k}^{\text{dyn}}(t)$ 表示为：

$$E_{v_i^k, v_j^k}^{\text{dyn}}(t) = P_{v_i^k, v_j^k}(t) \tau, \forall v_i^k \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_k, k \quad (6)$$

由此, 可获得SAGIN的总能耗 $E_{\text{total}}^{\text{dyn}}$ 为:

$$E_{\text{total}}^{\text{dyn}} = \sum_{(v_i^k, v_j^k) \in \mathcal{E}_{\text{Com}}} s_{v_i^k, v_j^k}(t) E_{v_i^k, v_j^k}^{\text{dyn}}(t) \quad (7)$$

其中, $s_{v_i^k, v_j^k}(t)$ 为二进制变量, 即 $s_{v_i^k, v_j^k}(t) = 1$ 表示链路 (v_i^k, v_j^k) 在小尺度时隙 t 内被选择用于数据传输; 否则, $s_{v_i^k, v_j^k}(t) = 0$ 。

2.2 多路路由问题建模

引入二进制变量 $\beta_{v_i^k}(t)$ 表示在小尺度时隙 t 内节点 v_i^k 是否被用来接收任务数据。具体而言, $\beta_{v_i^k}(t) = 1$ 表示节点 v_i^k 被选择用来接收任务数据; 否则, $\beta_{v_i^k}(t) = 0$ 。进一步定义函数 $\varphi(y)$, 其中 y 表示自变量, 满足: 当 $y = 1$ 时, $\varphi(y)$ 的值为一个很大的正数; 否则, $\varphi(y)$ 的值为 0。基于上述定义, 可获得网络节点接收数据与链路选择的约束关系为:

$$\varphi(\beta_{v_i^k}(t)) \geq \sum_{v_j^k: (v_i^k, v_j^k) \in \mathcal{E}_{\text{Com}}} s_{v_i^k, v_j^k}(t), \forall t, v_i^k, k \quad (8)$$

引入二进制变量 $\alpha_{v_i^k}(t)$ 表示网络节点是否被激活, 具体而言, 如果 $\alpha_{v_i^k}(t) = 1$ 表示节点 v_i^k 被激活且被用来发送任务数据。因此, 可获得网络节点发出数据与链路选择的关系为:

$$\varphi(\alpha_{v_i^k}(t)) \geq \sum_{v_j^k: (v_i^k, v_j^k) \in \mathcal{E}_{\text{Com}}} s_{v_i^k, v_j^k}(t), \forall t, v_i^k, k \quad (9)$$

进一步引入如下约束表示对于任一个网络节点 v_i^k 在小尺度时隙 t 内不能同时接收和发出数据, 即:

$$\alpha_{v_i^k}(t) + \beta_{v_i^k}(t) \leq 1, \forall t, v_i^k, k \quad (10)$$

引入路由变量 $\omega_{v_i^k, v_j^k}^f(t) \geq 0$ 表示在小尺度时隙 t 内被分配在链路 (v_i^k, v_j^k) 上进行传输的流量 f_m 占总数据量 D_m 的比例。引入如下约束确保在任何小尺度时隙 t 内分配给任意链路 (v_i^k, v_j^k) 上的流量遵循通信容量限制, 即:

$$\sum_{f_m \in \mathcal{F}} \omega_{v_i^k, v_j^k}^f(t) D_m \leq s_{v_i^k, v_j^k}(t) C_{v_i^k, v_j^k}(t) \tau, \forall t \in \mathcal{T}_k, k, (v_i^k, v_j^k) \in \mathcal{E}_{\text{Com}} \quad (11)$$

其中, \mathcal{F} 表示所有流的集合, 即 $\mathcal{F} = \{f_m\}$ 。此外, 引入存储策略变量 $o_{v_i^k}^f(f_m) \geq 0$ 来表示在小尺度时隙 t 内顶点 v_i^k 存储的数据量占 f_m 总数据量的比例。进一步构建如下约束保证任何流量 f_m 的所有数据量应由源网络节点 u_m 在任务的开始时刻 t_m 产生, 即:

$$o_{v_i^k}^f(f_m) = 1, \forall f_m, v_i^k = u_m, t = t_m \quad (12)$$

定义二进制变量 $x(f_m)$ 表示每个任务是否被成功传输, 具体而言, $x(f_m) = 1$ 表示任务流 f_m 被成功传输, $x(f_m) = 0$ 则表示任务流 f_m 传输失败。特别地, 任何流 f_m 的所有数据量都只有在截止时刻 c_m 之前被传递到目的网络节点 g_m 才算被成功传输。因此, 引入如下约束:

$$o_{v_i^k}^f(f_m) \geq x(f_m), \forall v_i^k, f_m, t = c_m \quad (13)$$

由约束(13)可知, 只有在截止时刻 c_m 前任务 f_m 的数据量全部传入目标节点, 即 $o_{v_i^k}^f(f_m)$ 的值为 1 时, $x(f_m)$ 的值才能为 1。

此外, 引入流守恒约束:

$$\sum_{v_j^k: (v_i^k, v_j^k) \in \mathcal{E}} \omega_{v_j^k, v_i^k}^f(t) - \sum_{v_j^k: (v_i^k, v_j^k) \in \mathcal{E}} \omega_{v_i^k, v_j^k}^f(t) = x(f_m)(o_{v_i^k}^f(f_m) - o_{v_i^k}^{t-1}(f_m)), \forall v_i^k, f_m, t \in [t_m + 1, \mathcal{T}_k] \quad (14)$$

存储约束表示为:

$$0 \leq \sum_{f_m \in \mathcal{F}} o_{v_i^k}^f(f_m) D_m \leq B_{v_i^k}^{\text{max}}, \forall v_i^k, t \in \mathcal{T}_k, k \quad (15)$$

即在任意小尺度时隙内, 顶点 v_i^k 的存储数据量之和不能超过其缓冲区大小 $B_{v_i^k}^{\text{max}}$ 。对于通信链路 (v_i^k, v_j^k) , 在小尺度时隙 t 内 $s_{v_i^k, v_j^k}(t)$ 和 $\omega_{v_i^k, v_j^k}^f(t)$ 之间需满足如下约束关系, 即:

$$\omega_{v_i^k, v_j^k}^f(t) \leq s_{v_i^k, v_j^k}(t), \forall t \in \mathcal{T}_k, k, (v_i^k, v_j^k) \in \mathcal{E}_{\text{Com}} \quad (16)$$

即当 $\omega_{v_i^k, v_j^k}^f(t)$ 的值不为 0 时, 对应的 $s_{v_i^k, v_j^k}(t)$ 的值一定为 1。约束 (式(17)) 表示功率范围约束, 即当选择链路 (v_i^k, v_j^k) 进行通信时, 每个顶点 v_i^k 的发射功率在小尺度时隙 t 内不能超过其最大功率 $P_{v_i^k, v_j^k}^{\text{max}}$ 且大于其最小功率 $P_{v_i^k, v_j^k}^{\text{min}}$, 即:

$$s_{v_i^k, v_j^k}(t) P_{v_i^k, v_j^k}^{\text{min}} \leq P_{v_i^k, v_j^k}(t) \leq P_{v_i^k, v_j^k}^{\text{max}}, \forall t \in \mathcal{T}_k, k, (v_i^k, v_j^k) \in \mathcal{E}_{\text{Com}} \quad (17)$$

为了使SAGIN的成功传输任务优先级的和最大并使系统总能耗最小, 利用DSTVG模型将链路分配、存储分配和网络路由的联合优化定义为以下优化问题, 即:

$$\text{PO: max} \left[\lambda \frac{\sum_{f_m \in \mathcal{F}} x(f_m) \varpi_{f_m} - X_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} - (1 - \lambda) \frac{E_{\text{total}}^{\text{dyn}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}} \right]$$

s.t. 式(8)~(17)

$$s_{v_i^k, v_j^k}(t) \in \{0, 1\}, \forall v_i^k \neq v_j^k, t \in \mathcal{T}_k, k \quad (18)$$

$$\alpha_{v_i^k}(t) \in \{0, 1\}, \forall v_i^k \neq v_j^k, t \in \mathcal{T}_k, k \quad (19)$$

$$\beta_{v_i^k}(t) \in \{0, 1\}, \forall v_i^k \neq v_j^k, t \in \mathcal{T}_k, k \quad (20)$$

$$0 \leq \omega_{v_i^k, v_j^k}^f(t) \leq 1, \forall v_i^k \neq v_j^k, f_m, t \in \mathcal{T}_k, k \quad (21)$$

$$0 \leq o_{v_i^k}^f(f_m) \leq 1, \forall v_i^k, f_m, t \in \mathcal{T}_k, k \quad (22)$$

$$x(f_m) \in \{0, 1\}, \forall f_m \quad (23)$$

其中，定义 X_{\max} 和 X_{\min} 分别为 SAGIN 能成功传输的最大任务优先级及最小任务优先级。因此， X_{\max} 的值可设置为总优先级和（即 $X_{\max} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \varpi_{f_m}$ ）， X_{\min} 的值可设置为 0。定义 E_{\max} 和 E_{\min} 分别为 SAGIN 能传输任务消耗的最大能耗和最小能耗，其中 E_{\min} 的值可为 0， E_{\max} 可设置为根据构建的场景预估的系统能耗最大值。符号 λ 是用于权衡成功传输任务优先级和系统总能耗的大于零的常量。在实际应用中， λ 的值越大，网络资源倾向于最大化成功传输任务优先级；反之，则倾向于最小化系统总能耗。

特别需要说明的是，本文的研究重点为高动态网络资源表征与建模，不再设计算法对问题 P0 进行求解，可直接用商业解法器来对大规模的问题 P0 进行高效求解。此外，本文的重点研究内容是基于 DSTVG 模型的静态网络资源调度问题建模，因此，基于 DSTVG 模型的动态环境下网络资源调度问题建模不在本文研究范围内。最后，本文尚未解决特征层面的系统性分析，包括各表征维度对资源性能的影响、表征冗余与相关性分析等。这需要对强耦合性、跨域、跨尺度的高纬度特征长时间序列联合采样，并需建立与关键网络级性能指标之间的映射关系。鉴于当前卫星实测数据不足以及实验平台能力受限等，尚无法开展深入研究。未来可依托可编程卫星试验平台与高性能算力平台开展进一步研究。

3 仿真与验证

本节首先验证所提 DSTVG 模型的优越性，因而基准方法的选择严格限定为传统单尺度时变图模型^[14]，以确保实验聚焦在“建模能力”而非“算法性能”的比较上。然后，验证基于所提 DSTVG 模型对多路径路由问题进行数学建模的正确性，并直接使用数学规划优化器 Gurobi 对问题 P0 求解获得最优值。

3.1 表征模型验证

仿真场景为两个 Walker 星座，由 STK 进行构建。第一

个 Walker 星座由 6 颗低轨卫星构成，分布于 6 个轨道平面上，轨道高度为 550 km，相位因子为 1，即 Walker1 星座的构型码为 6/1/1。第二个 Walker 星座由 5 颗低轨卫星构成，轨道高度为 1 000 km，Walker2 星座的构型码为 5/1/1。在仿真中，通过如下方式把低轨卫星数从 7 颗逐渐增加到 11 颗：以 Walker1 星座中 6 颗卫星为基础，按照卫星编号依次加入 Walker2 星座中低轨卫星。此外，对比方案是小尺度时隙长度为 30 s 和 60 s 的传统单尺度时变图模型。

图 3 和图 4 分别展示了图模型中顶点数和边数随卫星数的变化曲线。由图 3 可以看出，随着卫星数增加，对比方案和所提 DSTVG 模型的顶点数皆是递增的。这是因为在对比方案中，卫星数会直接导致图模型中顶点数的增加。在 DSTVG 模型中，卫星数增加可能会导致大尺度时隙数增加，进而增加顶点数。此外，如图 3 所示，在小尺度时隙长度为 30 s 时构建的传统单尺度时变图模型的顶点数大于在小尺度时隙长度为 60 s 时构建的模型顶点数。这是因为传统单尺度时变图模型在每个小尺度时隙内复制顶点数。因此，在整个调度周期固定的情况下，小尺度时隙长度越短会导致所构建的小尺度时隙数越多，进而复制了更多顶点数，这凸显出传统单尺度时变图模型具有较高的图模型构建复杂度。由图 3 可以进一步看出，所提 DSTVG 模型中顶点数随卫星数增加不明显且远低于传统单尺度时变图模型的顶点数，根本原因在于，所提的 DSTVG 模型只是在每个大时间尺度时隙内复制顶点数，小尺度时隙数和长度并不影响顶点数。因此，相比于传统模型，所提 DSTVG 模型具有较低复杂度优势。

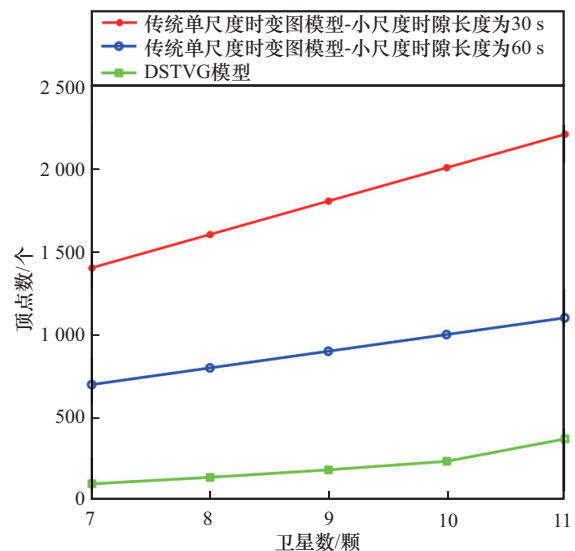


图 3 顶点数随卫星数的变化曲线

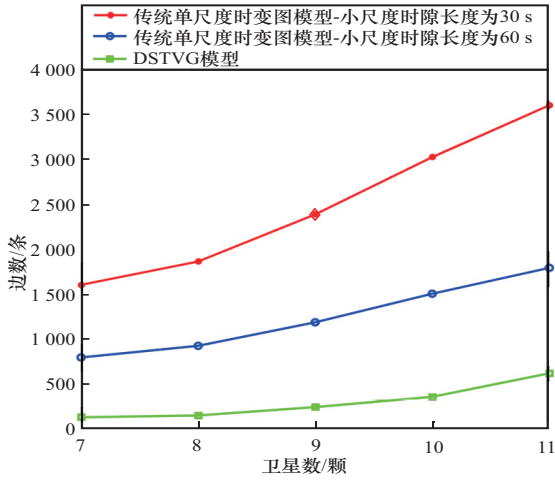


图4 边数随卫星数的变化曲线

从图4中可以看出，随着卫星数的增加，相比于顶点数的变化趋势，传统单尺度时变图模型的边数比所提DSTVG模型的边数递增更为明显。原因在于，在每个小尺度时隙内，传统单尺度时变图模型不仅会复制传输边的数量，而且在两两相邻小尺度时隙间会复制存储边。综上所述，相比于传统单尺度时变图模型，所提DSTVG模型以分钟级大尺度时隙刻画高动态网络拓扑压缩图规模、秒级/毫秒级小尺度时隙锁定资源瞬变，具有复杂度低、准确度高的双重优势。

3.2 资源分配模型验证

SAGIN 仿真场景通过软件工具 Anaconda 和 STK 进行构建，由 6 颗低轨卫星、1 颗地球同步轨道卫星和 5 个地面站构成。调度周期的时间范围为 2025 年 3 月 20 日 14:40:00 到 2025 年 3 月 20 日 16:20:00。地球同步轨道卫星位于东经 0°，北纬 0°。6 颗低轨卫星构建为构型码为 6/1/1 的 Walker1 星座。地面站的坐标分别为 (39.609°N, 115.892°E) (52.196°N, 106.398°W) (42.805°S, 147.439°E) (47.595°N, 52.678°W) 和 (49.603°N, 34.543°E)。设置小尺度时隙长度 $\tau = 60$ s，小尺度时隙总数为 100 个。在小尺度时隙中，每个任务随机产生且数据量为 10 Mbit。节点的最大存储容量 $B_{v_i^k}^{\max}$ 在区间 [500, 1 000] Mbit 中随机生成。节点 v_i^k 在任意小尺度时隙 t 发射天线增益 $G_{v_i^k}^{\text{tran}}(t) = 37$ dB。节点 v_i^k 在任意小尺度时隙 t 接收天线增益 $G_{v_i^k}^{\text{rec}}(t) = 37$ dB，在任意小尺度时隙 t 的自由空间损耗 $L_f(t) = 10^{-23}$ ，总线路损耗 $L_l(t) = 1$ ，玻尔兹曼常数 $\kappa = 1.38054 \times 10^{23}$ J/K，总系统噪声温度 $T_s = 316.2278$ ，信噪比 $(E_b/N_0)_{\text{req}} = 9.6$ dB， $B_c = 4 \times 10^{10}$ Hz，链路容限

$M_0 = 1.4125$ dB。卫星的最小发射功率 $P_{v_i^k, v_j^k}^{\min} = 200$ W，最大发射功率 $P_{v_i^k, v_j^k}^{\max} = 300$ W。设置 $\varpi_m = 1$ 。

图5显示了问题P0的优化目标值在不同任务数下随 λ 数值的变化曲线。由图5可看出，随着 λ 数值的增大，优化目标值也随之增大。表明任务数越大的方案，它获得的目标值越大。原因在于，由问题P0的优化目标函数可知， λ 数值越大越注重最大化成功任务数，反之，越注重最小化系统总能耗。此外，任务数越多，任务成功传输的概率就越大。

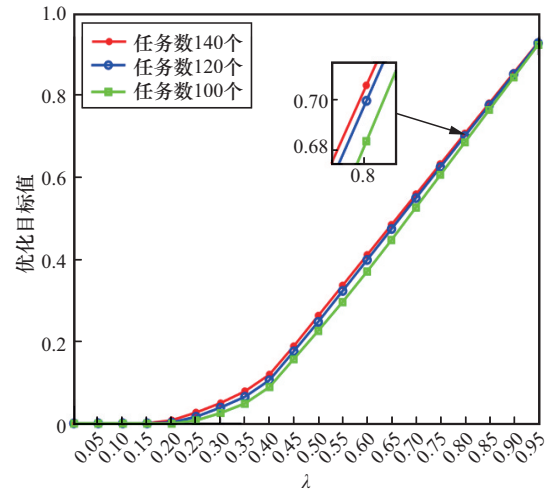


图5 问题P0的优化目标值在不同任务数下随 λ 数值的变化曲线

图6和图7分别给出了图5中目标值的两个分量（即系统总能耗和成功传输任务数）在不同任务数下随 λ 数值的变化曲线。从图6中观察到，随着 λ 数值的增大，系统总能耗先保持不变，然后逐渐增加，最后趋于最大值。具体而言，当 $\lambda \leq 0.15$ 时，系统总能耗不随 λ 数值的增大而增大，原因在于， λ 数值过小使得问题P0的优化目标更倾向于最小化系统总能耗，此时资源分配模型不允许通过增加成功传输任务数来增大系统总能耗。当 $0.2 < \lambda \leq 0.45$ 时，系统总能耗随 λ 数值的增大而增大，这是因为 λ 数值增加会促使问题P0的优化目标更倾向于最大化成功传输任务数，进而消耗更多的能耗，此时资源分配模型通过增加系统总能耗来提高问题P0的优化目标的数值。当 $\lambda \geq 0.65$ 时，系统总能耗不再随 λ 数值的增大而变化，原因在于所有的传输任务皆成功传输，不会带来更多的能量消耗。从图7中观察到，随着 λ 数值的增大，成功传输的任务数的变化趋势基本和系统总能耗的情况保持一致，根本原因在于，更大的 λ 数值倾向于最大

化成功传输的任务数，更小的 λ 数值倾向于最小化系统总能耗。综上，仿真结果表明基于 DSTVG 的资源分配模型实现了最小化系统总能耗与最大化成功传输的任务数之间的折中关系，充分验证了所提模型的高效性。

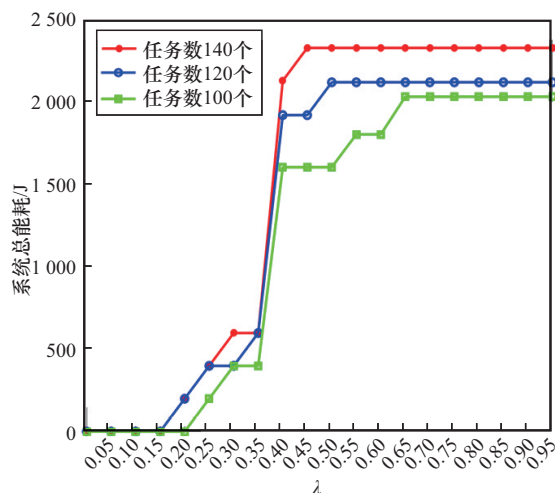


图6 系统总能耗随 λ 数值的变化曲线

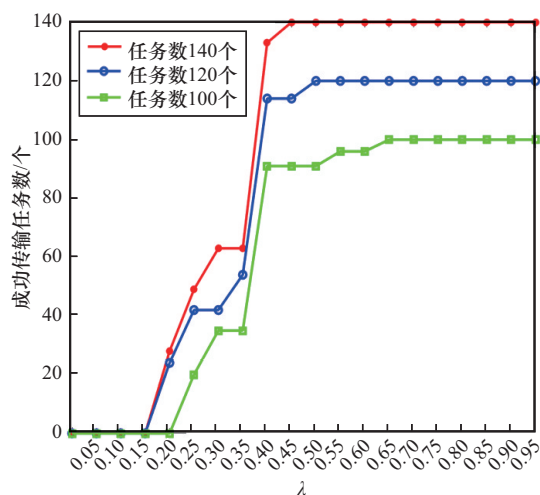


图7 成功传输任务数随 λ 数值的变化曲线

4 结束语

本文面向 SAGIN 中由“高速低轨卫星-高机动空基平台-快速地面节点”三元运动耦合所诱发的“分钟级拓扑重构和秒级/毫秒级业务涌浪”的极端时间异质特征，提出了 DSTVG 模型，该模型以拓扑-业务双驱动实现了对高动态资源演化的精准刻画：先依据卫星-地面通信时间窗，构建分钟级大尺度时隙表征拓扑慢变，再按业务到达强度划分秒级/毫秒级小尺度时隙捕获业务突发与资

源更新；并以“大尺度拓扑-小尺度资源”双层状态空间将高维动态资源管理问题降维为静态图资源分配问题；继而基于 DSTVG 建立高动态资源分配模型，实现空间业务与空间资源的高效精准匹配；最后，仿真验证了所提 DSTVG 模型的高效性，可为 SAGIN 的高动态资源管理提供兼具精度与效率的可扩展理论工具。

参考文献

- [1] 张鸿, 廖戡歆, 王汝言, 等. 面向密集场景的空天地网络资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1968-1976.
Zhang H, Liao Y X, Wang R Y, et al. Resource allocation algorithm of space-air-ground integrated network for dense scenarios[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(5): 1968-1976.
- [2] Gao R H, Zhang B, Zhang Q Y, et al. Topology-compressed data delivery in large-scale heterogeneous satellite networks: an age-driven spatial-temporal graph neural network approach[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(7): 6673-6687.
- [3] Rojanasoonthon S, Bard J. A GRASP for parallel machine scheduling with time windows[J]. INFORMS Journal on Computing, 2005, 17(1): 32-51.
- [4] Zhuang S F, Yin Z D, Wu Z L, et al. The relay satellite scheduling based on artificial bee colony algorithm[C]//Proceedings of the 2014 International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). Piscataway: IEEE Press, 2014: 635-640.
- [5] Chen X J, LI X M, Wang X W, et al. Task scheduling method for data relay satellite network considering breakpoint transmission[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(1): 844-857.
- [6] Wang L, Jiang C X, Kuang L L, et al. High-efficient resource allocation in data relay satellite systems with users behavior coordination[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 12072-12085.
- [7] Jia Z Y, Sheng M, Li J D, et al. Joint HAP access and LEO satellite backhaul in 6G: matching game-based approaches[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(4): 1147-1159.
- [8] Zhang T, Li J D, Li H Y, et al. Application of time-varying graph theory over the space information networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(2): 179-185.
- [9] Liu R Z, Sheng M, Lui K S, et al. An analytical framework for resource-limited small satellite networks[J]. IEEE Communica-

tions Letters, 2016, 20(2): 388-391.

- [10] Zhou D, Sheng M, Liu R Z, et al. Channel-aware mission scheduling in broadband data relay satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5): 1052-1064.
- [11] Liu W, Zhu L, Yang H T, et al. Maximum flow routing strategy with dynamic link allocation for space information networks under transceiver constraints[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(9): 9993-10000.
- [12] He P, Hu J J, Fan X Y, et al. Load-balanced collaborative offloading for LEO satellite networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(21): 19075-19086.
- [13] Jia X H, Lv T, He F, et al. Collaborative data downloading by using inter-satellite links in LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1523-1532.
- [14] Wang P, Li H Y, Chen B B, et al. Enhancing earth observation throughput using inter-satellite communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(10): 7990-8006.
- [15] Shi K Y, Zhang X S, Zhang S, et al. Time-expanded graph based energy-efficient delay-bounded multicast over satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9): 10380-10384.
- [16] Liu W, Yang H T, Li J D. Multi-functional time expanded graph: a unified graph model for communication, storage, and computation for dynamic networks over time[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(2): 418-431.

[作者简介]



何立军 (1989-), 男, 博士, 中国矿业大学信息与控制工程学院副教授, 主要研究方向为天空地一体化网络、无人机组网、无线通信。



李雨彤 (2001-), 女, 西北工业大学软件学院硕士生, 主要研究方向为天空地一体化网络、无线通信。



贾子晔 (1990-), 女, 博士, 南京航空航天大学电子信息工程学院副教授, 主要研究方向为低空智联网、无人机、天空地一体化网络。



汪彦婷 (1989-), 女, 博士, 西北工业大学软件学院讲师, 主要研究方向为边缘计算、群智网络、模型剪枝。



王洪梅 (1983-), 女, 博士, 中国矿业大学信息与控制工程学院副教授, 主要研究方向为无线通信、软件无线电、室内定位技术。



李世银 (1971-), 男, 博士, 中国矿业大学信息与控制工程学院教授, 主要研究方向为煤矿信息化、移动目标定位等。