

# 基于资源时变图的通遥一体化星座资源分配策略

王雪<sup>1</sup>, 刘晋炳<sup>1</sup>, 苏南池<sup>2</sup>, 孙晓颖<sup>1</sup>, 钱志鸿<sup>1</sup>

(1. 吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)信息科学与技术学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 针对通遥一体化星座数据实时回传需求与星载资源受限的矛盾, 构建了资源时变图(RTEG)模型, 实现了对动态拓扑及能量、存储、带宽等多维资源的统一结构化表征。为达成网络传输吞吐量最大化与卫星传输能耗最小化的联合优化, 将“观测-传输-存储”联合调度问题映射为图论中的最小成本最大流问题, 并提出了能效优化增量最大流算法(EIIMFA), 引入反向链路以动态调整隙内链路选择, 利用时域垂直链路实现数据的跨时隙调度, 在逼近最大吞吐量的同时, 实现能耗最小化的路径决策。仿真结果表明, 通遥一体化星座在数据传输能力上优于单功能卫星配置, 所提算法在网络能耗、链路利用率和运行时间等关键指标上领先, 在所有测试场景中的能耗均比EERA低10%~18%, 为通遥一体化星座高效、低耗提供了技术保障。

**关键词:** 通遥一体化融合卫星网络; 资源时变图; 资源分配

**中图分类号:** TN927

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2026051

## Resource allocation strategy for satellite Internet integrating communication and remote sensing based on resource-time-varying graphs

Wang Xue<sup>1</sup>, Liu Jinbing<sup>1</sup>, Su Nanchi<sup>2</sup>, Sun Xiaoying<sup>1</sup>, Qian Zhihong<sup>1</sup>

1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

2. School of Information Science and Technology, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China

**Abstract:** To address the contradiction between real-time data backhaul demands and limited onboard resources in integrated sensing and communication (ISAC) constellations, a resource time-evolving graph (RTEG) model was constructed. A unified structural representation of dynamic topology and multi-dimensional resources, including energy, storage, and bandwidth, was achieved. To realize the joint optimization of maximizing network throughput and minimizing satellite transmission energy consumption, the joint observation-transmission-storage scheduling problem was mapped to the minimum cost maximum flow problem in graph theory. Subsequently, an energy-efficient incremental maximum flow algorithm (EIIMFA) was proposed. Reverse links were introduced to dynamically adjust intra-slot link selection, and temporal vertical links were utilized to implement cross-slot data scheduling, whereby path decisions minimizing energy consumption were attained while approaching maximum throughput. Simulation results demonstrate that the data transmission capability of the ISAC constellation is superior to that of single-function satellite configurations. Additionally, the proposed algorithm shows to lead in key indicators such as network energy consumption, link utilization, and runtime, with energy consumption being 10%~18% lower than that of the EERA algorithm in all test scenarios. Consequently, this study provides technical guarantees for the efficient and low-energy operation of ISAC constellations.

**Keywords:** communication and remote sensing integrated satellite network, time-varying resource graph, resource allocation

收稿日期: 2026-01-04; 修回日期: 2026-02-10

通信作者: 王雪, txwangxue@jlu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62171198); 长春市卫星与应用产业重大科技专项资助项目(No.2024WX04); 吉林省科技厅重点研发资助项目(No.20250201082GX); 吉林大学有组织科研项目

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62171198), The Major Science and Technology Project of Changchun City for Satellite and Application Industry (No.2024WX04), The Key Research and Development Project of Jilin Province (No.20250201082GX), Jilin University Organized Research Project

## 0 引言

随着以“星链”为代表的大规模低轨星座加速部署, 卫星互联网正逐步成为覆盖全球的新型信息基础设施。然而, 当前国内卫星系统多以独立运行为主, 遥感数据严重依赖过顶直传, 导致数据积压与回传时延高, 制约了高时效性应用的需求<sup>[1-2]</sup>。在此背景下, 通遥一体化星座通过融合通信与遥感功能并依托星间链路构建高速中继网络, 成为解决即时回传问题的关键技术<sup>[3-4]</sup>。但这种深度融合也引发了资源管理的多维复杂性: 观测、传输与存储任务在有限的星上能源、缓存、带宽资源间展开激烈竞争<sup>[5]</sup>, 且呈现出显著的时空动态耦合特性。若缺乏高效的联合调度, 易导致任务冲突、资源闲置或能量枯竭。因此, 设计兼顾最大化数据吞吐量与最小化系统能耗的资源分配策略, 对保障通遥一体化星座的高效运行至关重要。

通遥一体化星座的资源分配问题涉及动态拓扑、异质业务竞争以及随机业务流, 呈现出高度的复杂性。目前, 针对此类深度融合场景下的联合调度研究尚处于起步阶段, 缺乏系统性的解决方案。相比之下, 传统单功能卫星网络的资源调度策略已取得诸多进展, 主要分为数学规划与启发式智能算法两类。第一类是追求理论最优的数学规划方法, 致力于通过精确建模寻求全局最优解。文献[6]针对地球观测场景构建广义时变图模型, 将复杂的联合调度问题映射为多项式时间可解的最大流问题, 验证了星间链路对数据回传总量的显著提升; 文献[7]利用时间拓展图刻画卫星网络的时变连接特性, 将确定性路由建模为整数线性规划, 通过低复杂度图算法有效提升了非地面网络的资源利用率与传输确定性; 文献[8]针对空天地一体化网络的数据卸载问题, 建立混合整数非线性规划模型, 利用拉格朗日松弛技术将原问题分解, 在保证时效性的同时降低了系统能耗; 文献[9]提出时空图模型与最小成本多路径路由算法 (MCMP), 有效解决了干扰容忍网络中的路径选择问题, 实现了时延最小化与传输效率的优化; 文献[10]进一步将能耗维度引入时间扩展图, 构建资源时间扩展图并设计节能资源调度算法 (EERA), 通过协同调度收发、存储及能耗资源, 缓解了高能耗与吞吐量最大化之间的矛盾。第二类是追求计算效率的启发式与智能学习方法, 旨在快速获取大规模问题的高质量可行解。文

献[11]提出两阶段迭代数传调度算法, 结合动态邻域搜索与自适应大邻域搜索, 并利用 Metropolis 准则增强全局寻优能力, 实现了数传收益与时效性的联合优化; 文献[12]设计基于存储时间聚合图的迭代启发式路由算法, 在共享网络中为多 QoS 需求任务规划传输路径, 有效解决了异构任务间的资源竞争; 文献[13]提出基于分层深度学习的资源调度框架, 通过主动学习资源变化与任务需求模式, 实现了故障或动态任务到达时的快速协同重构; 文献[14]针对 LEO 卫星物联网构建计算坐标图, 利用基于博弈论的协同卸载算法与迭代优化策略, 有效解决了大规模设备接入下的计算资源分配与能耗优化问题。

尽管现有研究在卫星网络资源调度领域进展显著, 但在面向通遥一体化星座的深度融合场景时仍显不足: 一是模型局限性, 现有图模型多侧重单一通信或遥感任务, 缺乏对“采集-存储-传输”全链路资源耦合关系的统一刻画, 难以量化星上能量与存储的动态消耗; 二是算法适应性, 传统方法难以在异质业务共存与高动态拓扑下兼顾高吞吐量与能效优化, 导致资源利用受限。针对上述挑战, 本文提出一种基于资源时变图 (RTEG) 的通遥一体化星座节能资源分配策略。该策略构建包含多维资源的统一图模型, 将复杂动态调度转化为图上的最小成本最大流问题, 实现资源协同优化与能效提升。主要贡献如下。

1) 构建了通遥一体化星座 RTEG 模型。针对能量、存储和带宽的时空动态耦合特性, 将调度周期离散化为一系列静态快照, 通过引入虚拟节点与多维边权, 将星座动态拓扑、资源约束与能量消耗统一映射为图结构, 从而将联合调度问题转化为最小成本最大流问题。

2) 提出能效优化增量最大流算法 (EEIMFA)。该算法将动态网络在不同时间段的状态解析为多层结构, 将每一时隙快照映射为图模型中的独立层级, 其中层内节点间的边反映该时段的通信能力, 层间边表征数据的存储能力。引入反向链路动态调整机制和“存储-携带-转发”策略, 为每条数据流寻找最低能耗的路径, 从而显著降低了卫星的传输能耗, 提升了整体执行效率。

3) 仿真结果表明, 通遥一体化架构在响应时效上显著优于传统单功能卫星系统。与 Ford-

Ful-kerson、MCMP 及 EERA 算法对比, EEIMFA 在传输数据量、网络总能耗、链路利用率及运行时间上均具有显著优势, 验证了其在通遥一体化场景下的有效性。

## 1 系统模型与问题表述

### 1.1 系统模型

通遥一体化星座协同传输调度模型如图1所示。通遥一体化星座网络由遥感卫星  $S^O = \{S_1^O, \dots, S_P^O\}$ 、通信卫星  $S^C = \{S_1^C, \dots, S_Q^C\}$ 、通遥一体化卫星  $S^{OC} = \{S_1^{OC}, \dots, S_L^{OC}\}$ 、地面站  $G = \{G_1, \dots, G_K\}$  和一个地面数据处理中心  $D$  组成, 其中,  $P$ 、 $Q$ 、 $L$  和  $K$  分别是  $S^O$ 、 $S^C$ 、 $S^{OC}$  和  $G$  中的元素个数。 $S^O$  作为网络的数据源节点, 主要负责对地观测数据采集; 其配备单向星间激光发射终端, 仅负责将采集的数据单向卸载至中继节点。 $S^C$  作为网络的骨干中继节点, 负责构建高速星间骨干网络; 其任务是接收来自遥感卫星/通遥一体化卫星的数据, 利用星间链路进行多跳传输, 并通过星地链路将数据回传至地面站。 $S^{OC}$  作为网络的核心协同节点, 集成遥感载荷与通信载荷; 该类卫星兼具目标观测、数据生成、星间路由转发及地面回传的多重能力, 是实现星座资源深度协同的关键载体。

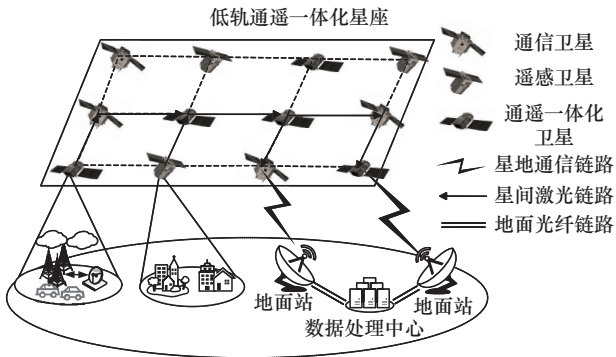


图1 通遥一体化星座协同传输调度模型

通遥一体化星座模型中星间采用激光链路以适配大容量、抗干扰传输需求 (图中背景虚线与实线箭头分别代表拓扑连接与实际激活路径); 星地采用微波链路, 利用其强穿透力克服大气衰减, 保障全天候可靠下行; 地面段则通过超大容量光纤网络互联, 消除传输瓶颈, 确保海量数据能实时汇聚至处理中心。本文使用  $M = \{M_1, \dots, M_N\}$  表示观测任务集合, 每个任务定义为  $M_i = \{v(M_i), T_s(M_i)\}$ , 其

中,  $v(M_i)$  表示任务可以生成的最大数据量,  $T_s(M_i)$  表示任务开始传输时间。在问题建模中, 将时间范围  $T$  以  $30\text{ s}$  一个时隙  $t$  划分为多个时间段, 每个时隙  $t$  中, 通信和观测机会保持不变, 调度决策由地面卫星控制中心产生, 并发送到地球同步轨道卫星, 通过地球同步轨道卫星将调度决策传输给所有低轨的相关卫星。

针对上述异质任务间的时空动态耦合特性, 传统的静态资源建模方法难以表征多维资源的动态演化过程。为此, 本文构建了 RTEG 模型, 通过节点、边及权重的时空扩展, 实现对传输带宽、存储空间、电池能量及观测机会等资源状态的量化表征。在该模型下, 本文将资源维度引入资源时变图结构, 旨在全面刻画星座资源的时空分布规律, 从而将原始的传输调度问题转化为基于 RTEG 的多资源协同优化问题。在满足卫星能量预算、存储上限、时效性要求及链路连通性等多重约束的前提下, 该模型通过协同观测时机与转发策略, 最终实现网络能耗最小化与遥感数据传输量最大化的联合优化。

本文采用激光通信链路进行星间数据传输。与传统微波链路相比, 激光链路具有高带宽、抗干扰性强等优势, 但也面临多普勒频移、捕获对准与追踪 (ATP) 误差以及背景辐射噪声的挑战<sup>[15]</sup>。假设卫星节点配备了多普勒频偏补偿器消除多普勒频移影响, 星间激光链路的信道质量主要受自由空间损耗及由 ATP 抖动和背景辐射引起的噪声影响, 因此, 在特定时段内, 卫星可实现的最大星间通信速率  $R_{ss'}^t$  为

$$R_{ss'}^t = \frac{P_s^{\text{tr}} G_s^{\text{tr}} G_s^{\text{re}} L_{ss'}^{f_s, t}}{k_c T_s \left[ \frac{E_b}{N' + N_o} \right] M_a} \quad (1)$$

其中,  $P_s^{\text{tr}}$  是低轨卫星的发射功率,  $G_s^{\text{tr}}$  和  $G_s^{\text{re}}$  分别表示卫星的发射天线增益和接收天线增益,  $L_{ss'}^{f_s, t}$  表示自由空间损耗,  $k_c$  表示玻尔兹曼常数,  $T_s$  表征整个系统噪声温度, 为了更深入地了解信号质量, 参数  $\frac{E_b}{N' + N_o}$  表示每比特接收能量与通信系统内的主要噪声功率谱密度的比率,  $N'$  为在激光链路的传输中引入的追踪噪声,  $N_o$  为背景辐射产生的噪声,  $M_a$  表示链路裕度。

对于卫星与地面站的信道模型, 星地链路容易

受到大气环境的影响, 计算数据传输速率时必须考虑大气环境导致的损耗<sup>[16]</sup>。因此, 卫星与地面站之间信道的最大可达通信速率 $R_{sg}^t$ 为

$$R_{sg}^t = B_{sg} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_s^{\text{tr}} G_s^{\text{tr}} G_g^{\text{re}} L_{sg}^{f_r^t} L_{sg}^{p_t}}{N} \right) \quad (2)$$

其中,  $B_{sg}$  表示星地链路的带宽,  $L_{sg}^{p_t}$  表示时隙  $t$  内由气象环境引起的额外损耗,  $N$  表示高斯白噪声功率。因此, 卫星与地面站之间可实现的最高数据速率将受天气和相对位置影响。假设在一定时间范围内雨衰保持不变, 并且在该时间段开始时可确定卫星到地面信号的信道状态<sup>[17]</sup>, 基于此静态信道假设, 卫星可实时调整发射功率以匹配当前信道特性。

为了对卫星能耗进行分析, 需要考虑星间链路传输数据时会受到自由空间损耗的影响。卫星的接收功率 $P_s^{\text{re}}$ 为

$$P_s^{\text{re}} = \frac{P_s^{\text{tr}} G_s^{\text{tr}} G_{s'}^{\text{re}}}{L_{ss'}^{f_r^t}} \quad (3)$$

自由空间损耗 $L_{ss'}^{f_r^t}$ 为

$$L_{ss'}^{f_r^t} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi d f}{c} \right)^2 \quad (4)$$

其中,  $d$  表示传播距离,  $\lambda$  表示工作波长,  $c$  表示光速,  $f$  表示工作频率。根据式(3)和式(4), 可以得到卫星发射功率 $P_s^{\text{tr}}$ 为

$$P_s^{\text{tr}} = \frac{16\pi^2 P_s^{\text{re}} d^2}{G_s^{\text{tr}} G_{s'}^{\text{re}} \lambda^2} \quad (5)$$

在本文中, 假设所有卫星的工作频率 $f$ 、接收增益 $G_s^{\text{re}}$ 和发射增益 $G_s^{\text{tr}}$ 相同并且随时间变化保持不变。由此可推得, 卫星节点的发射功率需要随着两颗卫星之间距离的增加而增加, 以确保接收功率一致<sup>[18]</sup>。因此, 单位时间内的传输能耗 $e$ 为

$$e = P_s^{\text{tr}} \tau = \frac{16\pi^2 P_s^{\text{re}} d^2}{G_s^{\text{tr}} G_{s'}^{\text{re}} \lambda^2} = k\tau d^2 \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 传输能耗与传输时间 $\tau$ 和卫星之间的距离 $d$ 有关,  $k$ 在本文系统中被视为一个常数。

## 1.2 问题描述

针对通遥一体化星座中异质观测与传输任务在时空动态演化过程中产生的多维资源竞争与耦合冲突问题, 本文旨在研究一种多维资源联合调度策

略。该策略通过协同分配星间/星地传输带宽、星上存储空间以及卫星电池能量, 实现网络总吞吐量最大化与系统总能耗最小化的联合优化。为此, 将该联合调度问题建模为

$$\text{P1: } E_{\text{sum}} = \min \sum_{A,B \in N} \sum_{t \subseteq T} (e_{A,B}^t \times r_{A,B}^t \times |t|) \quad (7)$$

$$\text{s.t. } F_{\text{max}} = \max \sum_{t \subseteq T} \sum_{k \in S^O \cup S^{OC}} (|t| \times r_{m,k}^t) \quad (8)$$

$$\sum_{t \subseteq T} \sum_{s_i \in S^O \cup S^{OC}} |t| \times r_m^{\text{ob}} \leq v(M_i) \quad (9)$$

$$r_m^{\text{ob}} \leq R_{\text{max}}^t \quad (10)$$

$$\sum_{M_i} r_m^{\text{ob}} \leq r \times Z \times t \quad (11)$$

$$\sum_{(A',B') \in S^O \cup S^{OC}} r_{A,B}^t \times |t| \leq X(t) \quad (12)$$

$$\sum_{(B',A') \in S^O \cup S^{OC}} r_{B,A}^t \times |t| \leq Y(t) \quad (13)$$

$$r_{ss'}^t \leq R_{ss'}^t, \forall S \in S^O \cup S^C \cup S^{OC} \quad (14)$$

$$r_{sg}^t \leq R_{sg}^t, \forall S \in S^O \cup S^C \cup S^{OC} \quad (15)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{t \subseteq T} \sum_{s \in S} (r_m^{\text{ob}} \times |t|) = \sum_{t \subseteq T} \sum_{g \in G} (r_{gd}^{m,t} \times |t|) \quad (16)$$

$$\sum_{A \in N} \sum_{t \subseteq T} (r_{A,B}^t \times |t|) = \sum_{A \in N} \sum_{\{D\} \subseteq T} (r_{B,A}^t \times |t|) \quad (17)$$

$$|t_i| \left( \sum_{B \in N} r_{B,A}^t - \sum_{B \in N \cup \{D\}} r_{A,B}^t \right) + \beta_A(t_{i-1}, t_i) = \beta_A(t_i, t_{i+1}) \quad (18)$$

$$\beta_A(t_i, t_{i+1}) \leq \beta_A \quad (19)$$

其中, 约束式(8)定义任务被成功观测和传输的数据量为 $F_{\text{max}}$ 。约束式(9)表示遥感卫星数据量约束, 遥感卫星采集到的数据量不能超过观测任务的最大数据量 $v(M_i)$ 。约束式(10)表示观测速率约束, 可用观测速率不超过最大可观测速率 $R_{\text{max}}^t$ , 则卫星与观测目标之间有观测机会; 当两者无观测机会时, 可设置最大观测速率 $R_{\text{max}}^t = 0$ 。约束式(11)为观测载荷的约束; 假设卫星配备了 $Z$ 个成像载荷, 且每个载荷具有相同的最大观测速率, 要求所有任务的观测速率总和必须小于或等于卫星所有成像载荷的最大观测速率之和。约束式(12)涉及卫星的数据发送约束, 规定卫星所发送的数据总量不得超过其最大可发送数据量 $X(t)$ 。约束式(13)则是关于卫星的数据接收约束, 要求接收到的数据量同样不能超过

其允许的最大可接收数据量  $Y(t)$ 。约束式(14)为星间传输速率约束,星间链路传输速率不能超过该星间链路支持的最大传输速率  $R'_{ss}$ 。约束式(15)为星地传输速率约束,星地链路的传输速率不能超过该星地链路支持的最大传输速率  $R'_{sg}$ 。约束式(16)为数据完整性约束,观测任务得到的数据量等于传输到数据处理中心的数据量,即被观测到的数据必须传输回地面数据处理中心。约束式(17)为节点传输一致性约束,除任务和数据处理中心节点外,任意节点在时间范围内接收到的数据总量等于发送的数据总量,该约束保障了数据调度是无损的,其中  $N = S^o \cup S^c \cup S^{oc} \cup G$ 。约束式(18)为存储与数据流动一致性约束,卫星网络中的卫星具有存储、携带和转发数据的功能。约束式(19)为存储容量约束,节点  $A$  从一个时间段到相邻时间段存储的数据量不能超过其存储大小  $\beta_A$ 。

虽然上述资源分配问题可建模为线性规划问题,但直接采用通用求解器处理大规模卫星网络与长时域调度任务时存在以下局限。首先,决策变量与约束条件的规模随卫星节点、任务数量及时间切片的增加而迅速扩张,导致计算时延无法满足星上系统的实时调度需求<sup>[7]</sup>。其次,通用线性规划方法未能利用卫星网络的拓扑结构特性,在处理拓扑高动态变化导致的增量更新时效率较低,滞后的调度决策会导致链路拥塞或任务中断<sup>[6]</sup>。为此,本文将该优化问题映射为 RTEG 模型。RTEG 模型通过结构化表征多维资源的动态演进过程,将复杂的耦合约束转化为图的连通性与容量限制。这种转化允许采用高效的图论算法替代通用求解器,在降低计算开销的同时实现了对大规模动态网络的实时响应。

## 2 通遥一体化星座资源分配问题的网络流建模

RTEG 将连续的卫星网络演进过程离散化为  $h$  个等长的时隙序列。在该模型中,每一时隙内的物理拓扑状态被映射为静态快照子图,卫星实体及其对应的虚拟节点映射为子图内的顶点。卫星间的通信链路表征为快照内部的空间传输边,卫星的星上存储与数据携带机制则表征为连接相邻时隙同名节点的时间垂直边。通过将链路带宽、存储空间以及传输能耗分别映射为边的容量与费用权重,RTEG 模型将多维资源约束下的通遥联合调度问题 P1 等

效转化为资源时变图上的最小成本最大流问题 P2。

### 2.1 关键要素的资源时变图表征

考虑到卫星网络会因卫星运动而动态变化,本文将资源调度周期划分为  $h$  个时隙,用集合  $T = \{t_1, \dots, t_h\}$  表示,每个时隙持续时间为一个常数  $\delta$ 。每个快照拓扑被视为当前时间网络的静态采样。资源时变图  $RTEG = \{(V, A, C, E, T)\}$  由节点集  $V$ 、链路集  $A$ 、容量集  $C$ 、能耗集  $E$  和时间范围  $T$  构成。

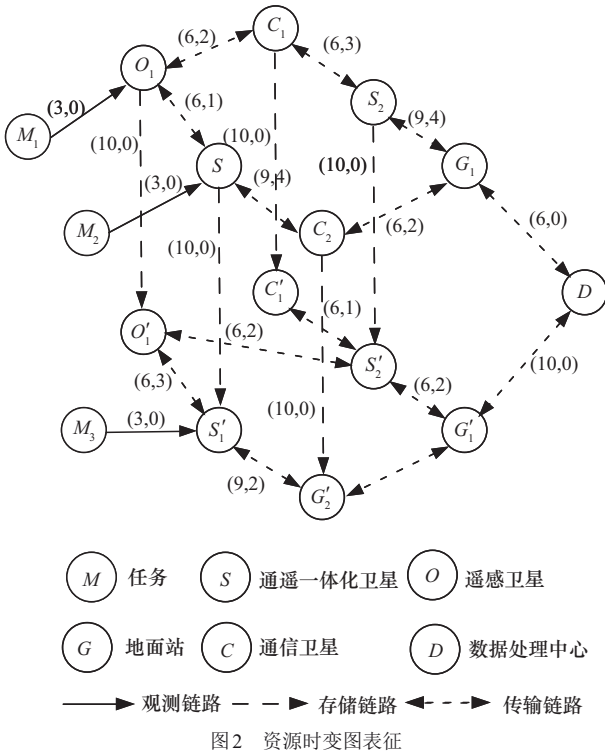
节点集包含对于卫星网络中任意实体节点创建  $n$  个节点,表示实体节点在每一个时间段的图元。源点集  $V_M = \{M^i | 1 \leq i \leq h\}$  表示观测任务;遥感卫星节点集  $V_O = \{O_z^i | 1 \leq i \leq h, 1 \leq z \leq O_{num}\}$ ;通信卫星节点集  $V_C = \{C_c^i | 1 \leq i \leq h, 1 \leq c \leq C_{num}\}$ ;通遥一体化卫星节点集  $V_S = \{S_s^i | 1 \leq i \leq h, 1 \leq s \leq S_{num}\}$ ;地面站节点集  $V_G = \{G_g^i | 1 \leq i \leq h, 1 \leq g \leq G_{num}\}$ ;终点  $D$  表示数据处理中心,在  $h$  个时间段内只为数据处理中心  $D$  创建一个节点;虚拟节点集  $V_V = \{V_v^i | 1 \leq i \leq h, 1 \leq v \leq V_{num}\}$  表示需要进行资源分配的卫星节点对应的虚拟节点。

链路集包含在任意时间段内,所有实体节点之间的传输链路表示为资源时变图中的边。传输链路集  $A_t = \{(v_p^i, v_q^i) | p \neq q, 1 \leq i \leq h, v_p^i \in V - V_D, v_q^i \in V - V_M\}$  表示星间链路或星地链路,存储链路集  $A_s = \{(v_p^i, v_p^{i+1}) | p \neq q, 1 \leq i \leq h, v_p^i \in V_O \cup V_C \cup V_S, v_p^{i+1} \in V_O \cup V_C \cup V_S\}$  表示卫星在不同时隙的存储能力,虚拟链路集  $A_v = \{(v_p^i, v_{p'}^i) | 1 \leq i \leq h, v_p^i \in V - V_G - V_D, v_{p'}^i \in V - V_M - V_D\}$  表示节点与其虚拟节点之间的连接。

在任意时间段内,将所有实体节点之间的传输速率和采集速率表示为资源时变图中的链路容量集,容量集  $C = \{c_{v_p^i, v_q^i} | i \neq j, p \neq q\}$  表示传输链路的容量。将所有实体节点传输单位时间的能量消耗表示为资源时变图中的能耗集,能耗集  $E = \{e_{v_p^i, v_q^i} | i \neq j, p \neq q\}$  表示节点之间传输能耗,其中存储链路、虚拟链路被设置为 0。

通过具体的卫星网络示例来解析本文的表征方

法。设想该卫星网络包含 3 个任务、一颗遥感卫星、两颗通遥一体化卫星、一颗通信卫星、一个地面站以及一个数据处理中心，资源时变图表征如图 2 所示。该模型中的时间范围被划分为两个时隙，顶点用于表征任务、卫星、地面站和数据处理中心。此外，实线有向边表示观测机会，虚线双向边表示通信机会，而虚线有向边则表示存储链路。借助这种资源时变图的建模能力，网络流问题的研究能够全面考虑传输资源、存储资源以及能耗因素。



### 2.2 资源时变图中的约束表征

通过资源时变图  $RTEG = \{(V, A, C, E, T)\}$ ，可以将 P1 问题中的决策变量  $r$  映射为新的决策变量  $f$ ，表示资源时变图 RTEG 中流经某条边的数据量，对于链路集  $A$  中的任何传输边需要满足  $f_{A^i, B^i} = r_{A, B}^i \times |t|$ 。因此，可以将每个任务成功观察到的数据传输模型构建为

$$F_{\max} = \sum_{V_i \in V} f_{M, V_i} = \sum_{V_j \in v} f_{V_j, D} \quad (20)$$

本文将 P1 问题的约束转化为图论中的约束。在时间变化的资源图中，必须遵守容量约束，即流经任一链路的数据量不得超过该链路的最大容量，

具体可表示为

$$0 \leq f_{A^i, B^i} \leq c_{A^i, B^i} \quad (21)$$

符合该约束的决策变量将满足问题 P1 中的约束式(10)、式(14)和式(15)。为了保证数据传输的完整性，必须遵循流量守恒约束，即进入节点的流量与离开节点的流量相等，具体表示为

$$\sum_{A^i \in V} f_{A^i, B^i} - \sum_{A^i \in V-M} f_{B^i, A^i} = \begin{cases} f_{B^i, B^{i+1}} & i=1 \\ f_{B^i, B^{i+1}} - f_{B^{i-1}, B^i} & \forall i \in [2, n-1] \\ -f_{B^{i-1}, B^i} & i=n \end{cases} \quad (22)$$

上述约束条件使卫星能够在当前时间段存储数据，并将其转发至下一时间段，从而实现卫星的“存储-携带-转发”机制。满足该条件的同时也确保了约束式(16)和式(17)的成立，这两个约束可以与式(18)和式(19)同时满足。然而，约束式(9)、约束式(11)~式(13)并未得到满足，因此需要通过图模型操作对这些约束进行映射。

### 2.3 特殊约束的图模型表征

1) 冗余观测避免。为了避免冗余观测造成资源浪费，需要让遥感卫星观测到的数据量等于遥感卫星传输的数据量  $C_{M, M_i} = v(M_i)$ ，并且不能超过该任务允许的最大数据量。根据图 3(a)中关于冗余观测避免的图表模型，可以确保满足节点的流量守恒和链路容量约束的决策变量满足约束式(9)，从而有效防止冗余观测的发生。基于此冗余观测避免的表征图，本文可以得到流量守恒约束和链路容量约束为

$$\sum_{A^i \in v} f_{M_i, A^i} = f_{M, M_i} \leq C_{M, M_i} \quad (23)$$

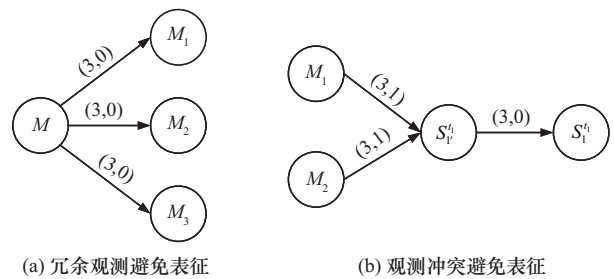


图 3 观测阶段约束表征

2) 观测冲突避免。在一个时隙内，一颗遥感卫星可能会有多个观测机会，但由于所携带的成像载荷数量有限，该卫星在同一时隙内能够获取的总

观测数据受到约束,因此需要让观测容量  $C_{S_i^q, S_i^q} = r \times N \times t$ 。基于图3(b)中关于观测冲突避免的图示模型,可以确保通过流量守恒和容量限制来满足遥感卫星的观测能力要求。基于此观测冲突避免的表征图,流量守恒约束和链路容量约束可以得出如下公式。

$$\sum_{M_i \in M} f_{M_i, S_i^q} = f_{S_i^q, S_i^q} \leq C_{S_i^q, S_i^q} \quad (24)$$

基于冗余观测模型和观测冲突避免模型,可通过满足流量守恒约束和链路容量约束(式(23)和式(24)),来确保约束式(9)和式(11)成立。

3) 通信约束表征。如图4所示,通过为通信卫星引入虚拟节点和虚拟链路,以表示通信约束。其中,约束式(25)用于描述卫星节点接收的流量守恒与链路容量约束,而约束式(26)则针对卫星节点的发送流量守恒与链路容量约束。

$$\sum_{B^q \in V} f_{B^q, A_i^q} = f_{A_i^q, A_i^q} \leq C_{A_i^q, A_i^q} \quad (25)$$

$$\sum_{B^q \in V} f_{A_i^q, B^q} = f_{A_i^q, A_i^q} \leq C_{A_i^q, A_i^q} \quad (26)$$

满足流量守恒和容量约束式(25)和式(26),以确保约束式(12)和式(13)成立。

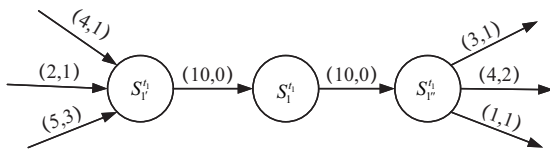


图4 通信约束表征

### 2.4 最小成本最大流问题建模

根据前文所述,引入虚拟节点与虚拟链路,将问题P1中的所有约束条件转化为常见的流量守恒

约束和链路容量约束。将原本的线性规划问题映射为资源时变图中从任务节点到数据处理中心顶点的最小成本最大流问题。由此,问题可以重新表述为

$$P2: E_{\text{sum}} = \min \sum_{A,B \in N} (e_{A,B}^t \times f_{A,B}) \quad (27)$$

s.t. 式(20)~式(26)

因此,基于资源时变图的约束表征,将P1问题从线性规划转化为最小成本的最大流问题。如果决策变量满足P2中的所有约束条件,则必然满足P1中的所有约束。求解问题流程如图5所示。

### 3 能效优化增量最大流算法(EEIMFA)

为解决通遥一体化星座中多维资源时空耦合及海量任务并发带来的能效优化问题,本文提出EE-IMFA,其核心思想是将网络流量调度问题映射为RTEG上的最小成本最大流问题。该算法利用时间扩展技术,将动态时变的卫星网络拓扑离散化为一系列静态的时隙分层子图,其中层内边表征瞬时通信能力,层间边表征数据的存储与携带能力。通过在时域维度上的逐步扩展,EEIMFA能够在全局视角下联合优化吞吐量与能耗。尤为关键的是,该算法在传统增量最大流框架的基础上,引入了反向链路机制。这一机制允许算法在后续迭代中撤销或重定向既定流量,从而赋予系统在不同时隙间动态修正路径选择的能力,确保在逼近最大网络流的同时,优先选择全局能耗最低的传输路径组合,显著降低卫星网络的传输能耗。

EEIMFA的执行流程主要包含资源时变图模型构建与能效增量寻优两个阶段,算法根据输入可见性矩阵  $W = [\omega_{ij}]$  和距离矩阵  $K = [k_{ij}]$  构建资源时变图,采用时间切片策略,遍历每一离散时隙,根据

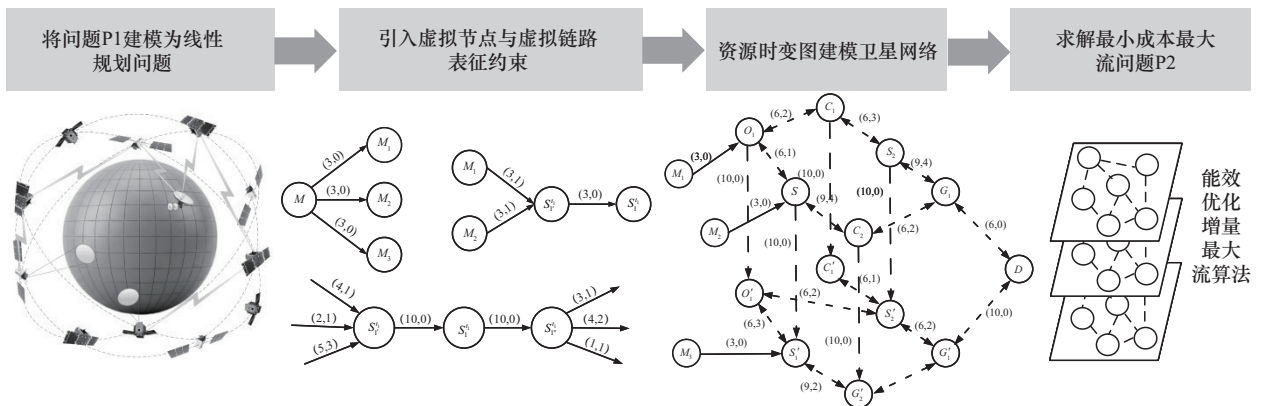


图5 求解问题流程

节点类型（任务节点、遥感/通信/一体化卫星）的特定约束构建层内拓扑；并通过插入时域虚拟边连接相邻时隙的同名节点，从而将独立的时隙子图耦合成一个包含“采集-传输-存储”全要素的资源时变图，此步骤为能效优化奠定基础。之后，基于构建的 RTEG 初始化残余网络，并设置虚拟源/汇节点。算法采用多轮迭代机制，在每一轮迭代中利用深度优先搜索（DFS）在残余图中搜寻能耗权重最小的增广路径。一旦锁定路径，即计算瓶颈容量并更新正向流量与反向残余容量，实时累积网络总能耗。若当前时隙没有增广路径，算法将激活下一时隙的存储链路，利用卫星的“存储-携带-转发”能力跨时段寻找传输机会。该过程持续遍历完所有时隙或网络达到饱和，最终输出兼顾最大吞吐量与最小能耗的调度方案。为了将多维资源约束转化为图论模型，首先应依据可见性矩阵、距离矩阵与物理拓扑构建资源时变图，具体构建流程如算法 1 所示。

#### 算法 1 构建资源时变图

**输入** 任务集  $V_M$ 、遥感卫星集  $V_O$ 、通信卫星集  $V_C$ 、通遥一体化卫星集  $V_S$ 、地面站  $V_G$ 、总时隙数  $T$ 、可见性矩阵  $W = [\omega_{ij}]$ 、距离矩阵  $K = [k_{ij}]$

**输出** 资源时变图  $RTEG = \{(V, A, C, E, T)\}$

- 1) 初始化资源时变图 RTEG，添加虚拟源节点  $S$  和汇节点  $D$
- 2) for  $i \leq T$  do
- 3)     if  $V_n^i \in V_M$  then
- 4)         依据图 3(a) 构建虚拟链路
- 5)     else if  $V_n^i \in V_O \cup V_S$  and  $\sum_{m \in V_M} \omega_{mV_n^i} > 1$
- 6)         then
- 7)             依据图 3(b) 构建卫星虚拟节点与虚拟链路
- 8)     else if  $V_n^i \in V_C \cup V_S$  then
- 9)         依据图 4 构建卫星虚拟节点与虚拟链路
- 10)     end if
- 11) for 所有传输链路 do
- 12)     依据式(1)计算星间链路容量，依据式(2)计算星地链路容量，依据距离矩阵  $K = [k_{ij}]$  及式(6)计算能耗
- 13) end for

基于算法 1 构建的 RTEG，EEIMFA 随即进入其核心的能效增量寻优阶段。该阶段通过迭代搜索并增广能耗最低的路径，在逼近网络容量极限的同时，实现吞吐量与能耗的协同优化。最终，算法将输出一个全局最优的调度方案。其详细步骤阐述如下。

**步骤 1** 调用算法 1 完成 RTEG 的构建，为后续的能效寻优提供了基础模型。随后，基于此 RTEG 进行网络初始化：将残余图  $G'$  的拓扑结构、链路容量和能耗权重设置为与 RTEG 完全一致。初始化  $F = 0$ ， $E = 0$ ，时间段  $i = 1$ 。

**步骤 2** 在当前时隙  $i$  下，在 RTEG 中基于卫星容量集  $c$  与能耗集  $e$  通过深度优先搜索算法寻找一条从虚拟源节点  $S$  到汇节点  $D$  的增广路径  $P$ ，将其作为可扩充流路径；在路径搜索过程中，计算路径的能耗，优先选择能耗最低的路径作为可扩充流路径。

**步骤 3** 计算该增广路径  $P$  的最大可扩充流量  $c(P)$ ，选择各链路可扩充流量的最小值作为路径实际扩充流量，沿路径遍历每条边并更新正向边流量与反向边流量，对于有流量流过但未达到链路最大容量的边添加反向边，已达到链路最大容量的边则仅保留反向边，同时根据边的能耗属性计算此次流量分配的能耗并累加到总能耗  $E$  中，此后更新总流量  $F$ ，完成对当前路径的流量补充。

**步骤 4** 判断当前时隙是否仍存在其他增广路径，若存在则回到第二步继续执行，直到无法在 RTEG 中找到从虚拟源节点  $S$  到汇节点  $D$  的最小能耗路径时，此时隙算法终止，激活与下一个时隙的存储链路，回到第二步重复上述流程。

**步骤 5** 直到遍历完所有时隙且无可用增广路径时，算法结束，并得到网络的最大流量  $F$  与优化后的总能耗  $E$ 。

本文 EEIMFA 能效优化增量最大流算法的伪代码如算法 2 所示。

#### 算法 2 EEIMFA：能效优化增量最大流算法

**输入** 总时隙数  $T$ ，构建资源时变图 RTEG，其中包括边容量  $c(u, v)$ ，能耗  $e(u, v)$

**输出** 最大流量  $F$ ，总能耗  $E$

- 1) 初始化残余图  $G' = RTEG$ ， $F = 0$ ， $E = 0$ ，时间段  $i = 1$
- 2) for  $i \leq T$  do

- 3) 通过深度优先搜索寻找到当前时隙从  $S$  到  $D$  的一条可行增广路径  $P_k$
- 4) while 增广路径  $P_k$  存在 do
- 5) 计算路径  $P_k$  的路径能耗  $E_{P_k} = \sum_{e(u,v) \in P_k} E_{e(u,v)}$
- 6) if  $E_{P_k} < \min\_E_{P_k}$  then
- 7)  $\min\_E_{P_k} = E_{P_k}$
- 8)  $P_{\min} = P_k$
- 9) end if
- 10) end while
- 11) for 所有链路 do
- 12) 计算路径流量  $c(P_k) = \min \{ c(u, v) - f(u, v) \mid (u, v) \in P_k \}$
- 13) for 每条边  $(u, v)$  在  $P_k$  do
- 14) 更新正向边流量:  $f(u, v) += c(P_k)$
- 15) 更新反向边流量:  $f(v, u) -= c(P_k)$
- 16) end for
- 17) 更新总流量:  $F += c(P_k)$
- 18) 更新总传输能耗:  $E += E_{P_k}$
- 19) end for
- 20) 连接下一个时隙  $i = i + 1$
- 21) end for

基于 RTEG 模型的有限性与有界性, EEIMFA 利用严格单调递增的流量增广机制, 确证了其在有限迭代内必然收敛至网络容量的理论上界。分析表明, 该算法具有多项式时间复杂度  $O(K \cdot N^2 + M \cdot K(N + L))$  和线性空间复杂度  $O(K(N + L))$  (其中  $M$ 、 $K$ 、 $N$ 、 $L$  分别为迭代次数、时隙数、节点数及链路数)。相较于呈指数级增长的传统整数规划方法, EEIMFA 的计算与存储开销能有效满足星载平台对于实时性和资源受限的严苛要求。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真环节与参数

仿真中采用的通遥一体化星座由 10 颗遥感卫星、10 颗通信卫星、10 颗通遥一体化卫星、10 个地面站和一个地面数据处理中心组成。本文仿真场景参考 SpaceX 星盾 (Starshield) 及其在美国太空

发展署 (SDA) 星座中的实际应用构型<sup>[19]</sup>。与民用 Starlink 星座不同, 通遥一体化星座通常部署于更高的轨道。SpaceX 部署的 SDA Tranche 0 系列卫星运行于约 950 km 的轨道高度与 80° 倾角的近极轨道, 以兼顾通信组网与对地观测效能<sup>[20]</sup>。基于此真实在轨参数, 在此基础上, 构建了一个包含 30 颗卫星的全球均匀稀疏骨干星座, 具体拓扑参数如下: 选取 5 个轨道面, 升交点赤经 (RAAN) 间隔设定为 72° 以实现全球经度覆盖; 每个轨道面内均匀部署 6 颗卫星, 相位间隔设定为 60°。为了体现通遥一体化星座的异构特性, 每个轨道面内的 6 颗卫星严格按照“通信卫星-通遥一体化卫星-遥感卫星”的顺序循环交替排列。仿真中采用的 10 个地面站分别位于新疆喀什、海南三亚、陕西西安、北京密云、云南昆明、山东青岛、山西太原、吉林长春、安徽合肥和福建厦门。仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	取值
仿真时间	2025-10-07 10:00:00— 2025-11-07 10:00:00
采样时隙长度/s	30
观测链路带宽/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	300
星间链路带宽/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	200~600
星地链路带宽/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	200~600
卫星缓存大小/Gbit	30~70
遥感任务数量/个	150~300
遥感卫星空间分辨率/m	{1.5, 3, 6, 9}
遥感任务的数据量/Gbit	{25, 6.21, 1.55, 0.69}

### 4.2 星座构成对传输能力的影响

为分析星座构型对传输效能的影响, 本文设定两类仿真: 第一类通过改变通遥一体化卫星占比, 分析固定资源约束下网络吞吐量的变化规律; 第二类考察不同任务负载下, 星座构型对任务总完成周期的调节作用。实验旨在从传输总量与时效性两个维度, 量化一体化设计的性能增量。不同通遥一体化星座构型下传输数据量变化情况如图 6 所示, 定量揭示了通遥一体化卫星对网络传输效能的增益机理。

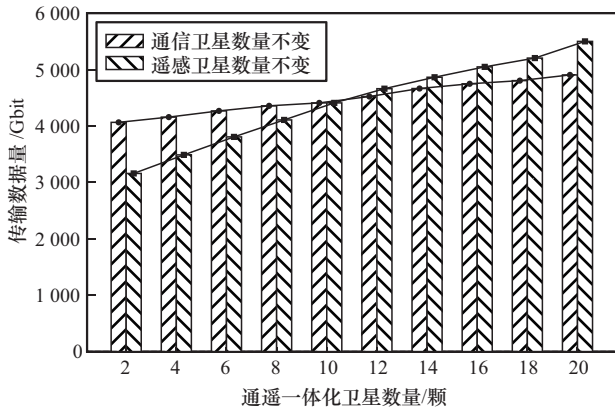


图6 不同通遥一体化星座构型下传输数据量变化情况

由图6可以看出，随着通遥一体化卫星数量的增加，网络总吞吐量在两种基准构型下均呈显著上升趋势，但增长模式差异明显。在遥感卫星数量不变场景下，初始网络处于严重的传输受限状态，大量观测数据因回传链路匮乏而滞留于星上缓存。此时，通遥一体化卫星的介入不仅扩充了观测源，更关键的是其通信载荷为积压队列提供了急需的卸载通道，有效解除了数据回传瓶颈。反观通信卫星不变场景，初始阶段网络链路资源虽相对充裕，但随着通遥一体化卫星的持续注入，网络总流量负荷急剧攀升；模型内部状态从链路冗余逐渐向链路拥塞演变，多颗卫星开始激烈竞争有限的通信卫星中继带宽与地面站接收窗口，导致数据包在路由节点的排队时延显著增加，部分低优先级任务因无法抢占到传输时隙而被迫等待。这种加剧的资源竞争效应抵消了部分新增节点带来的容量收益，导致系统吞吐量呈现出平缓增长态势。

图7和图8分别展示了在通信卫星和遥感卫星数量不变的场景下，不同星座构型中任务完成时间随任务数量变化的情况。随着任务数量的增加，所有场景中的任务完成时间均有所上升：因为任务数量增多会加剧卫星观测载荷、星间链路及存储资源的竞争，导致数据采集、转发及地面回传环节的等待与处理耗时累积，最终延长整体任务完成周期。进一步分析不同星座构型的差异可见，在任意任务数量条件下，通遥一体化卫星数量越多的场景，任务完成时间普遍更短。这印证了通遥一体化卫星在任务处理中的显著优势：其集成的遥感与通信双重载荷无须依赖单一功能卫星的协同转发，大幅减少数据在遥感卫星与通信卫星之间的中转链路与等待时间；同时，多通遥一体化卫星的配置能进一步扩

充星座的并行处理能力，通过动态分配观测与传输任务，避免单一卫星节点过载，实现了任务处理效率的提升。

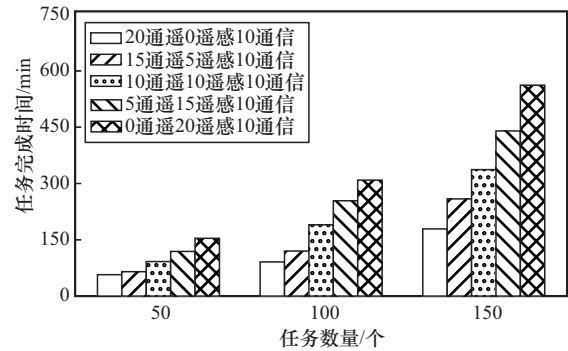


图7 通信卫星数量不变的场景下不同星座构型中任务完成时间随任务数量变化情况

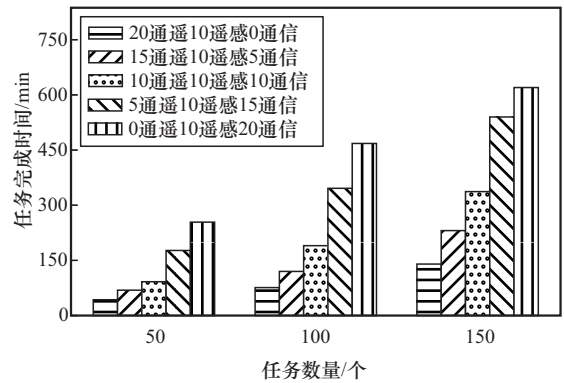


图8 遥感卫星数量不变的场景下不同星座构型中任务完成时间随任务数量变化情况

### 4.3 算法传输性能对比

本文对EEIMFA的性能进行了评估，并与Ford-Fulkerson<sup>[21]</sup>、最小能耗约束多径算法（MCMP）<sup>[9]</sup>和节能资源调度算法（EERA）<sup>[10]</sup>进行了比较。本文选取了经典的Ford-Fulkerson最大流算法作为基准对比，文献[22]验证了该算法在卫星时变图模型中求解吞吐量上界的有效性。MCMP作为贪婪的迭代流增广算法，旨在寻找能耗最优的分配方案，但由于其每次迭代后不引入反向链路，放弃了全局最优性。EERA则基于资源时变图，实现高效的资源调度，通过动态调整流量来降低能耗，同时保持网络吞吐量的稳定性。仿真实验在24 h的连续调度周期内进行，模拟了300个并发观测任务循环执行的高负载网络环境。为确保与基准对比算法EERA在同等资源边界下的公平性，本文核心资源参数严格对齐文献[10]的实验设置：将链路传输速率设定

在200~600 Mbit/s的动态范围内,并将卫星存储容量梯度设置为30 Gbit、50 Gbit和70 Gbit。基于上述统一基准的参数设置,本文重点从网络总传输数据量和总能耗两个维度对各算法的调度性能进行量化评估。

不同算法总传输量性能对比如图9所示。由图9可以看出,随着传输速率从200 Mbit/s提升至600 Mbit/s,所有算法的吞吐量均呈现显著的单调递增特性,EEIMFA展现出与理论最优解高度逼近的吞吐量性能。由图9(a)~图9(c)可以看出,EEIMFA的性能曲线始终紧密贴合追求最大流的Ford-Fulkerson算法以及EERA算法;特别是在图9(c)所示的70 Gbit资源充裕场景下,即便引入了严格的能耗约束,EEIMFA的峰值吞吐量15 569 Gbit与无能耗约束的Ford-Fulkerson算法相比,性能损耗仅

为2.2%;这表明EEIMFA能够高效地利用网络剩余容量,其多维资源联合调度策略并未对系统的整体传输能力产生实质性的抑制。反观MCMP算法受限于其局部贪婪的路径搜索策略,在高负载场景下无法充分利用多路径分流优势,导致其吞吐量显著低于其他算法,约为EEIMFA的90.7%,呈现出明显的性能瓶颈。

不同算法网络能耗对比如图10所示,充分体现了EEIMFA在保障高吞吐量前提下的节能优势,其中,能耗为图论寻路算法中的相对权重(即无量纲的代价值)。尽管所有算法的能耗均随传输速率与存储容量的增加而呈上升趋势,但EEIMFA得益于其独特的反向链路流量重定向机制,能够动态撤销高能耗路径上的流量分配并择优重组,从而有效规避了EERA与Ford-Fulkerson为追求链

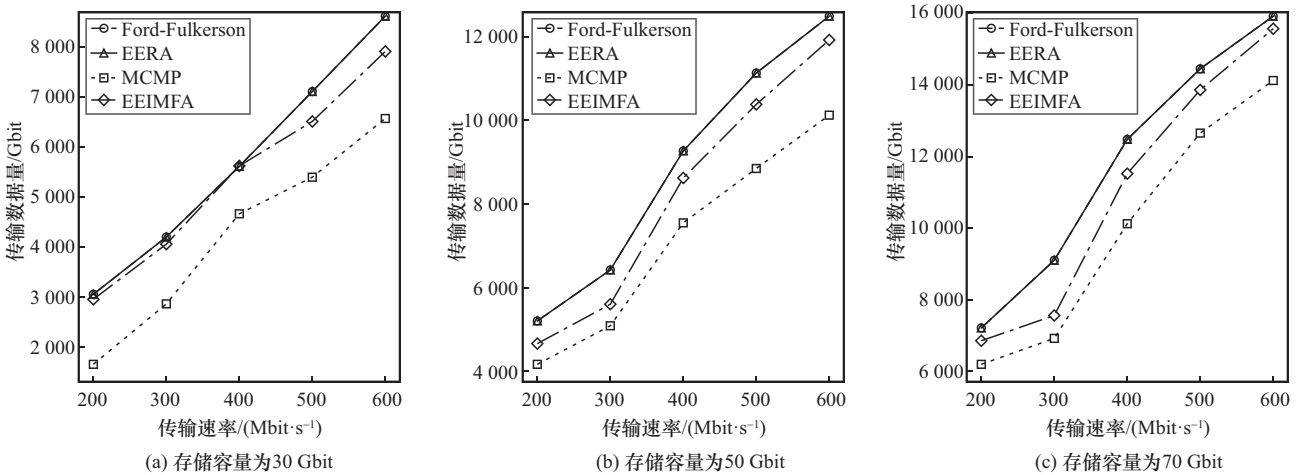


图9 不同算法总传输量性能对比

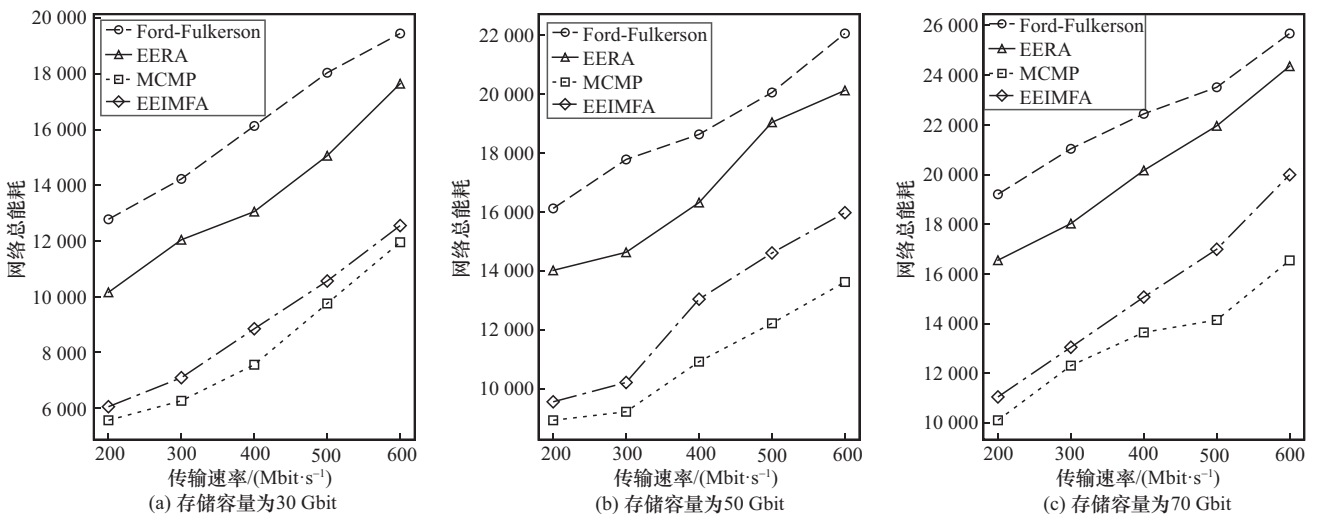


图10 不同算法网络能耗对比

路满载而盲目使用高代价路径的问题。实验数据表明，EEIMFA 在全参数空间下的能耗均大幅优于对比算法：与基准算法 Ford-Fulkerson 相比，其能耗降幅最高达 32.1%；与同类调度算法 EERA 相比，在 400 Mbit/s、50 Gbit 的典型工况下能耗减少约 20%。相比之下，MCMP 虽在低负载下能耗占优，但其以牺牲吞吐量为代价，导致能耗低于 EEIMFA。实验结果证实，EEIMFA 实现了高吞吐量与低能耗的深度协同。

卫星网络链路利用率随任务数量增加的变化情况如图 11 所示。当任务数量从 50 个增加至 300 个时，EEIMFA 的链路利用率始终高于 MCMP、EERA 与 Ford-Fulkerson 算法，且随任务量增长的适应性更优。EEIMFA 的优势在于动态负载调整能够根据实际需求灵活分配资源，避免了其他算法因聚焦单一优化目标而降低链路利用率的问题。此外，EEIMFA 通过反向链路的引入，有效提升了抗饱和能力，在任务量超过 200 个时仍能保持稳步增长，展示出优秀的适应性与稳定性。这种综合优化能力不仅提高了链路的利用效率，也降低了卫星传输中的总体能耗，验证了 EEIMFA 在高负载环境下的显著优势。

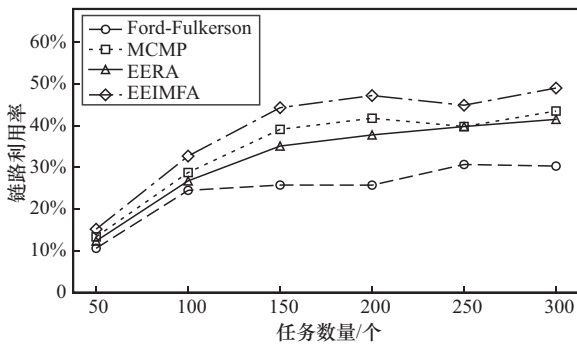


图 11 卫星网络链路利用率随任务数量增加的变化情况

卫星网络链路利用率随卫星存储容量变化情况如图 12 所示。当卫星存储容量从 10 Gbit 增加至 40 Gbit 时，EEIMFA 的链路利用率始终显著高于 Ford-Fulkerson、MCMP 与 EERA 算法，且随存储容量增长的提升幅度与稳定性更优。EEIMFA 的优势在于其融合了存储资源与链路负载的协同优化机制，能够动态调整数据缓存与链路传输的匹配关系，有效避免存储不足导致的链路空闲以及存储过剩引发的链路负载失衡。在存储容量的关键区间 25~30 Gbit，EEIMFA 的链路利用率从

36.87% 提升至 39.57%，增幅达 7.3%。相比之下，EERA 在同一区间的增幅为 6.8%，MCMP 增幅为 16.0%。虽然 MCMP 的增幅相对较高，但 EEIMFA 的利用率在该阶段显示出明显的优势，表明其能够更有效地适应存储资源的增加，实现链路利用率的提升。

算法运行时间随任务数量变化情况如图 13 所示。随着任务数从 50 个增加到 300 个，所有算法的运行时间均呈现线性增长，但 EEIMFA 始终保持最低的运行时间，显示出其在运行效率上的优越性。这一优势得益于 EEIMFA 优化的调度逻辑，通过简化冗余的迭代计算步骤，有效避免了 EERA 因复杂路径寻优导致的高耗时，且相比于 Ford-Fulkerson 的固定框架缺乏动态适配性，EEIMFA 在灵活性与计算效率之间实现了更好的平衡。此外，在任务量超过 200 个的高负载场景下，EEIMFA 的运行时间增幅仅约 12.4%，而 EERA 和 MCMP 的增幅分别超过 25% 和 30%。这些结果进一步表明，EEIMFA 能够在高任务量条件下保持高效的运行性能，适用于大规模任务处理的需求。

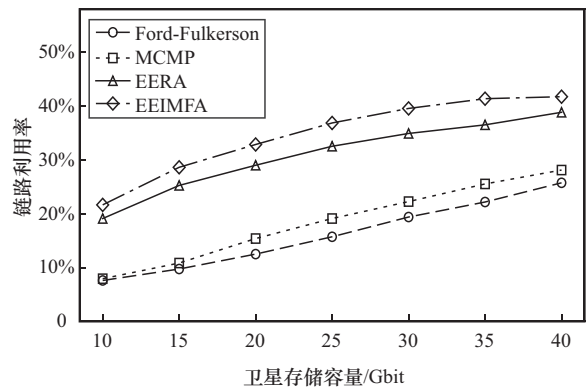


图 12 卫星网络链路利用率随卫星存储容量的变化情况

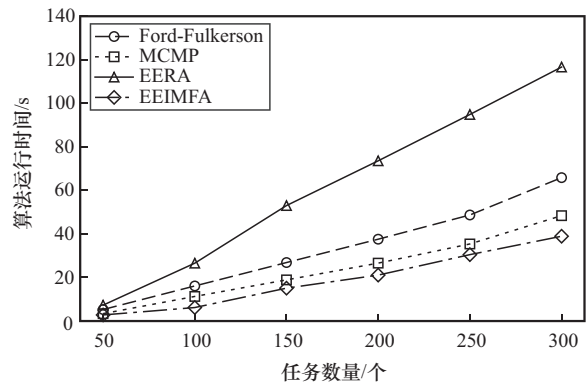


图 13 算法运行时间随任务数量变化情况

## 5 结束语

本文围绕通遥一体化星座“数据传输吞吐量最大化与传输能耗最小化”的联合优化问题,通过引入RTEG模型,精准刻画了卫星网络中传输、存储、能耗资源的时空动态耦合特性,将“观测-传输-存储”联合调度问题转化为最小成本最大流问题。本文EEIMFA通过反向链路动态调整与“存储-携带-转发”机制的融合,在保障高传输吞吐量的同时显著降低能耗。仿真结果验证了本文算法在能耗控制、链路利用率及运行效率上的优越性,也证实了通遥一体化星座相较于单功能卫星架构的显著优势。

### 参考文献:

- [1] 许文嘉,王一旭,彭木根. 卫星遥感与6G通信遥感一体化[J]. 电信科学, 2023, 39(4): 60-70.  
Xu W J, Wang Y X, Peng M G. Satellite remote sensing and the integration of 6G communication and remote sensing[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(4): 60-70.
- [2] 陈山枝,孙韶辉,康绍莉,等. 6G星地融合移动通信关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(5): 1177-1214.  
Chen S Z, Sun S H, Kang S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2024, 54(5): 1177-1214.
- [3] 蒋忠元,王森,王启舟,等. 低轨卫星多星协同及星地协同通遥算一体化技术[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(1): 60-75.  
Jiang Z Y, Wang S, Wang Q Z, et al. LEO multi-satellite coordination and satellite-ground coordination remote sensing communication and computation integration technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(1): 60-75.
- [4] 赵辰乾,闫瑞东,赵贇,等. 基于通遥融合的卫星即时遥感系统架构研究[J]. 天地一体化信息网络, 2025, 6(2): 27-37.  
Zhao C Q, Yan R D, Zhao Y, et al. Research on architecture of real-time satellite remote sensing system based on communication and remote sensing integration[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2025, 6(2): 27-37.
- [5] 王雪,孟姝宇,钱志鸿. 面向6G全域融合的智能接入关键技术综述[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1613-1631.  
Wang X, Meng S Y, Qian Z H. An overview of key technologies for intelligent access toward 6G full-domain convergence[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(5): 1613-1631.
- [6] 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.
- [7] Shi K Y, Wang J C, Li H Y, et al. Enhancing resource utilization of non-terrestrial networks using temporal graph-based deterministic routing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 9211-9216.
- [8] He L J, Li J D, Wang Y T, et al. Balancing total energy consumption and mean makespan in data offloading for space-air-ground integrated networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(1): 209-222.
- [9] Jiang F, Zhang Q Y, Yang Z H, et al. A space-time graph based multipath routing in disruption-tolerant earth-observing satellite networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(5): 2592-2603.
- [10] Shuai J C, Liu Y, Wang Y M. Energy efficient maximal throughput resource scheduling strategy in satellite networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(2): 312-316.
- [11] 李海,李勇军,张泰江,等. 面向通遥融合卫星互联网的两阶段迭代数传调度算法[J]. 通信学报, 2025, 46(6): 73-88.  
Li H, Li Y J, Zhang T J, et al. Two-stage iterative data transmission scheduling algorithm for satellite Internet integrating communication and remote sensing[J]. Journal on Communications, 2025, 46(6): 73-88.
- [12] Zhang T, Li H Y, Zhang S, et al. STAG-based QoS support routing strategy for multiple missions over the satellite networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(10): 6912-6924.
- [13] Zhou D, Sheng M, Bao C X, et al. Mission-driven resource scheduling in satellite-terrestrial networks: from perspective of collaboration and reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(8): 6705-6719.
- [14] Du X Q, Na Z Y, Zhang N T, et al. Collaborative task offloading for LEO satellite Internet of Things: a novel computing coordinate graph-based approach[J]. IEEE Systems Journal, 2025, 19(3): 848-859.
- [15] Zhang X Y, Liu J, Zhang R, et al. Energy-efficient computation peer offloading in satellite edge computing networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(4): 3077-3091.
- [16] Fan X Y, Liu D, Qiu M X, et al. Dynamic prioritized data transmission through intersatellite cooperation in LEO constellations[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(2): 1922-1932.
- [17] Bao C X, Sheng M, Zhou D, et al. Toward intelligent cross-domain resource coordinate scheduling for satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(12): 9610-9625.
- [18] Zhang N T, Na Z Y, Lin B. Time-varying graph based inter-orbit link selection energy-saving routing for LEO satellite networks[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2023: 432-436.
- [19] ERWIN S. SpaceX rolls out new business line focused on military satellite services[N]. SpaceNews, 2022-12-02.
- [20] CONGRESSIONAL BUDGET OFFICE. Large constellations of low-

altitude satellites: a primer[R]. CBO Publication, 2023.

[21] Ford L R, Fulkerson D R. Flows in Networks[M]. Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1962.

[22] Wang P, Zhang X S, Zhang S, et al. Time-expanded graph-based resource allocation over the satellite networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 360-363.

[作者简介]



王雪 (1984-), 女, 吉林白山人, 博士, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为6G空天地一体化接入与协同传输技术。



刘晋炳 (2000-), 男, 山西忻州人, 吉林大学硕士生, 主要研究方向为通遥一体化星座协同传输技术。



苏南池 (1993-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 哈尔滨工业大学 (深圳) 副研究员, 主要研究方向为通信感知一体化、空天通信、无线安全通信技术等。



孙晓颖 (1969-), 男, 吉林公主岭人, 博士, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信号参量估计理论及应用、触觉通信技术等。



钱志鸿 (1957-), 男, 吉林长春人, 博士, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为基于物联网、D2D、Wi-Fi、RFID等无线网络与通信技术。