

通遥一体卫星网络中的遥感脉冲频率与数据回传路由联合优化

原 哲, 郭重涛, 赵 博

(深圳大学电子与信息工程学院, 广东 深圳 518060)

摘 要: 传统的通信卫星与遥感卫星通常独立运行, 导致轨道、能量等资源利用率较低, 且难以满足全球范围内的实时遥感需求。为提升资源利用率与网络整体性能, 开展了通遥一体卫星网络的遥感脉冲频率与数据回传路由联合优化研究。首先, 鉴于卫星的动态特性和可预测性周期运动, 采用时间扩展图对卫星网络进行建模。其次在卫星成像和数据传输模型的基础上, 构建一个能量和传输时隙约束下最大化脉冲重复频率的混合整数线性规划问题, 同时针对该问题的高复杂度, 提出一种基于Benders分解的求解算法, 通过将原问题分解为主问题和子问题, 降低问题复杂度并提高求解效率。最后开展仿真分析, 仿真结果验证了所提算法的合理性和有效性, 为通遥一体卫星网络的研究提供了参考依据。

关键词: 通遥一体; 时间扩展图; Benders分解算法

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2026008

Joint Optimization of Remote Sensing Pulse Frequency and Data Relay Routing Toward Integrated Communication and Remote Sensing Satellite Networks

Yuan Zhe, Guo Chongtao, Zhao Bo

College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

Abstract: Traditional communication satellites and remote sensing satellites typically operate independently, not only resulting in low utilization of orbital, energy, and other resources, but also making it difficult to meet the demand for real-time global remote sensing. To enhance resource utilization and overall network performance, this study conducted research on the joint optimization of remote sensing pulse frequency and data backhaul routing for an integrated communication and remote sensing satellite network. Firstly, considering the dynamic characteristics and predictable periodic motion of satellites, the time-expanded graph was employed to model the satellite network. Secondly, based on satellite imaging and data transmission models, a mixed-integer linear programming problem was formulated to maximize the pulse repetition frequency under energy and transmission time-slot constraints. Meanwhile, to address the high computational complexity of the problem, a solution algorithm based on Benders decomposition was proposed, which decomposed the original problem into a master problem and a subproblem, thereby reducing computational complexity and improving efficiency. Finally, simulation analyses were performed, and the results verified the rationality and effectiveness of the proposed algorithm, providing a valuable reference for the study of integrated communication and remote sensing satellite networks.

Keywords: integrated communication and remote sensing, time-expanded graph, Benders decomposition algorithm

收稿日期: 2025-08-20; 修回日期: 2025-12-01

通信作者: 郭重涛, ctguo@szu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62571342, No. 62431021); 广东省基础与应用基础研究基金 (No. 2025B1515020076); 深圳市基础研究专项 (自然科学基金) (No. JCYJ20230808105359045)

Foundation Items : The National Natural Science Foundation of China (No.62571342, No.2431021), GuangDong Basic and Applied Basic Research Foundation (No.2025B1515020076), The Foundation of Shenzhen City(No. JCYJ20230808105359045)

0 引言

近年来,随着人们对通信全球覆盖、导航定位和地球观测需求的不断增长,全球人造卫星产业蓬勃发展,形成了现有的通信、导航和遥感三大独立系统^[1]。其中,遥感卫星是指搭载多光谱扫描仪、雷达成像仪等传感器的空间平台,用于从太空对地球表面进行观测,为用户提供地理摄影、导航、道路交通分析等遥感服务^[2]。遥感卫星快速发展,其分辨率和成像范围不断提高,这使观测数据量激增^[3]。然而,传统的遥感卫星系统仅能在卫星过境地面站时依赖星地链路完成数据传输,难以满足未来的遥感信息分钟级响应目标^[4]。为突破这一瓶颈,通信遥感(通遥)一体卫星网络架构近年来被多次提出,使得遥感系统能够充分利用通信卫星网络的高速星间链路传输能力,构建“多星组网、多网协同”的运行体系,从而实现高效、实时的遥感服务^[5-6]。

在通遥一体研究领域,为实现卫星网络中遥感数据的高效回传,现有研究主要集中于数据传输吞吐量优化^[7-8]、资源调度与管理^[9-11]、最小化端到端时延^[3, 12-13]3个方向。在数据传输吞吐量优化方面,文献[7]提出了一种基于星间链路的数据卸载协作方案,使卫星可以在星地链路建立之前卸载数据,从而显著提高数据传输吞吐量。进一步地,文献[8]通过对观测任务和传输任务进行协同优化调度,验证了利用中继卫星可使遥感卫星的吞吐量提升数倍。在资源调度与管理方面,文献[9]基于事件驱动的时间扩展图,联合考虑观测资源与传输资源,以最大化成功调度任务的总优先级。文献[10]在资源约束下提出了多目标优化方法,共同实现传输效益最大化、终端能量剩余最大化和传输等待时间最小化。文献[11]则将电池损耗纳入考量,实现了服务质量与卫星寿命的有效权衡。为了最小化端到端时延,文献[3]针对密集融合网络提出了优先级感知任务拆分与并行传输策略。文献[12]提出了一种基于协作热点的时延最优协作传输方案。文献[13]则进一步将传输与计算融合,提出计算感知路由方案,通过对原始数据进行在轨处理,有效减少回传数据量,大幅度降低端到端时延。

然而,上述工作主要研究遥感数据产生后的数据回传问题,尚未考虑通信资源的限制与优化对遥感成像质量的影响。为此,本文提出了通遥一体卫星网络深度融合模型,并针对资源约束条件下遥感与通信的协同优化开展研究。本文的贡献主要有以下两个方面。

(1) 提出了一个通遥一体卫星网络深度融合框架。

通过对脉冲重复频率和数据回传路由联合优化,在有限能量和传输时隙约束下获得最优的遥感图像。

(2) 采用Benders分解算法对复杂模型进行求解,并验证了本文所提出的联合优化策略相较于单一优化策略的优势。

1 系统模型

1.1 网络模型

本文考虑一个由一系列通遥一体卫星构成的Walker星座和多个地面数据接收站组成的场景,如图1所示。其中,卫星用集合 $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 表示,地面目标潜在观测卫星用集合 $\mathcal{O} = \{o_1, o_2, \dots, o_N\}$ 表示,地面数据接收站用 $\mathcal{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_M\}$ 表示。当用户产生遥感任务请求并将其上传后,卫星网络便会调度一个最优卫星对目标实施观测,在获取遥感数据后通过星间链路和星地链路传输至地面数据接收站。在整个场景中,将从任务请求指令上传到遥感数据传输完成的总时间定义为 $T_{\max}$,其中 $T_{\max} = T_1 + T_2 + T_3$ 。 T_1 表示从遥感任务请求指令上传到卫星开始执行遥感任务的时间间隔, T_2 表示卫星在对目标进行遥感观测时的合成孔径时间, T_3 表示卫星从获取遥感数据到成功回传至地面站之间的时间间隔。

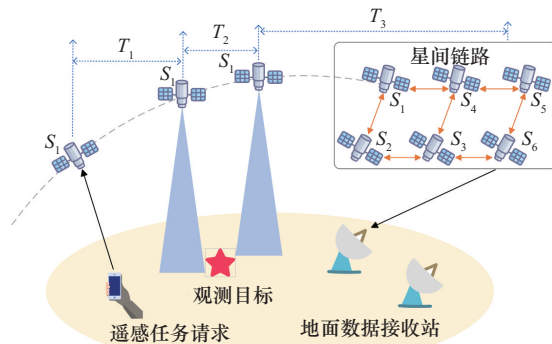


图1 网络模型

1.2 时间扩展图模型

卫星在轨高速运行导致网络拓扑结构随时间不断变化,使得稳定可靠的数据回传路由选择变得复杂。为应对这种动态性,本文首先采用快照图^[14]方法,将时间轴划分为 T 个时间长度为1 s的固定时隙。卫星网络拓扑在每个时隙开始时发生变化,而在给定的时间范围内保持静止。考虑到卫星轨道具有周期性和可预测性,本文进一步引入驻留边,用于连接相邻时隙中的同一节点,从而构建出能够刻画跨时间演化过程的时间扩展图(time-

expanded graph, TEG), 为动态路径规划与数据转发提供统一建模框架^[15-16]。

为降低模型复杂度, 本文暂未考虑链路切换开销、建立时延以及调度开销等非核心因素, 仅考虑最基本的数据传输过程。本文基于 TEG 构建的数据传输模型如图 2 所示。

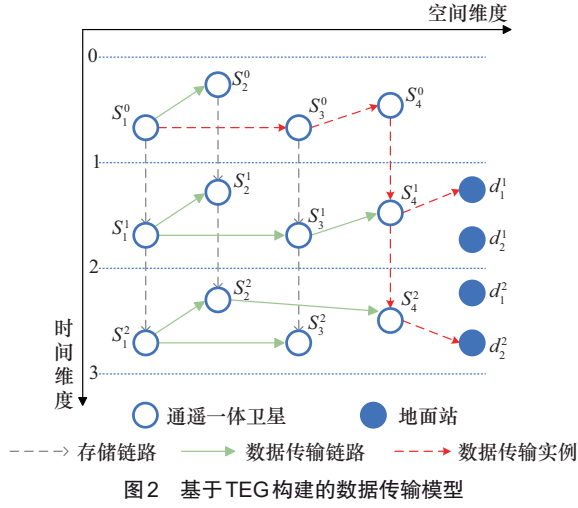


图2 基于TEG构建的数据传输模型

为了更好地描述动态路径规划与数据转发过程, 将时间扩展图记为 $\mathcal{G} = \{\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{F}\}$ 。 $\mathcal{V}$ 表示通遥一体卫星和地面数据接收站组成的节点集合, 记为 $\mathcal{V} = \{\mathcal{V}^1, \dots, \mathcal{V}^t, \dots, \mathcal{V}^T\}$, 其中 $\mathcal{V}^t$ 表示第 t 个时隙中的节点集合。 $\mathcal{E}$ 表示边集合, 记为 $\mathcal{E} = \mathcal{E}_c \cup \mathcal{E}_s$, 其中 $\mathcal{E}_c = \{\mathcal{E}_c^1, \dots, \mathcal{E}_c^t, \dots, \mathcal{E}_c^T\}$ 表示各时隙传输边集合, 第 t 个时隙传输边集合 $\mathcal{E}_c^t = \{(u^t, v^t) | u^t, v^t \in \mathcal{V}^t\}$; $\mathcal{E}_s = \{\mathcal{E}_s^1, \dots, \mathcal{E}_s^t, \dots, \mathcal{E}_s^{T-1}\}$ 表示存储边集合, 第 t 个时隙中存储边集合 $\mathcal{E}_s^t = \{(u^t, u^{t+1}) | u^t \in \mathcal{V}^t\}$ 。 $\mathcal{F}$ 表示边的数据流量集合, 记为 $\mathcal{F} = \mathcal{F}_c \cup \mathcal{F}_s$, 其中 $\mathcal{F}_c = \{\mathcal{F}_c^1, \dots, \mathcal{F}_c^t, \dots, \mathcal{F}_c^T\}$ 表示传输边流量集合, 第 t 个时隙中由所有相邻节点 u^t 和 v^t 构成的传输边流量集合为 $\mathcal{F}_c^t = \{f_c(u^t, v^t) | (u^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t\}$; $\mathcal{F}_s = \{\mathcal{F}_s^1, \dots, \mathcal{F}_s^t, \dots, \mathcal{F}_s^{T-1}\}$ 表示存储边流量集合, 由所有节点在相邻时隙构成的存储边流量集合 $\mathcal{F}_s^t = \{f_s(u^t, u^{t+1}) | (u^t, u^{t+1}) \in \mathcal{E}_s^t\}$ 。

(1) 传输边选择模型

由于通遥一体卫星网络是动态变化的, 因此卫星和卫星之间以及卫星和地面站之间的可视关系也是动态变化的。在动态路径规划中, 为了表征对传输链路的选择, 本文引入二元变量 x_{u^t, v^t} 。若在时隙 t 选择传输边 (u^t, v^t) 进

行数据传输, 则 $x_{u^t, v^t} = 1$, 反之 $x_{u^t, v^t} = 0$ 。

另外, 本文暂不考虑半双工限制, 而是假设卫星可以同时进行数据的接收与转发。模型仅约束每颗卫星在一个时隙内最多与一个节点建立通信链路, 且每个地面站在一个时隙内也只能选择一颗卫星建立连接, 则有:

$$\sum_{v^t: (u^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t} x_{u^t, v^t} \leq 1, \forall u^t \in \mathcal{S}^t, t \in T \quad (1)$$

$$\sum_{u^t: (u^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t} x_{u^t, v^t} \leq 1, \forall v^t \in \mathcal{V}^t, t \in T \quad (2)$$

(2) 数据流守恒模型

由图2可以看出, 当卫星在一个时隙中没有传输路径或无法传输完数据时, 可以将数据流进行拆分, 存储到下个时隙继续进行数据转发。为保证数据在 TEG 中的无损转发, 需要使数据流满足如下约束, 即:

$$\begin{aligned} \sum_{u^t: (u^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t} f_c(u^t, v^t) + f_s(v^{t-1}, v^t) = \\ \sum_{w^t: (v^t, w^t) \in \mathcal{E}_c^t} f_c(v^t, w^t) + f_s(v^t, v^{t+1}), \forall v^t \in \mathcal{S}^t, t \in T \end{aligned} \quad (3)$$

当 $t = 1$ 时, $f_s(v^{t-1}, v^t) = 0$, 表示卫星在初始时刻没有存储数据。由于本文的研究重点是通遥一体卫星的能量资源耦合, 因此暂不考虑星上存储容量与读写速率约束。

1.3 合成孔径雷达成像模型

在本文构建的通遥一体卫星网络中, 使用合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 作为星载成像雷达, 其通常被安装在卫星上, 通过发射高功率电磁脉冲, 并按顺序接收后向散射回波信号进行成像^[17]。SAR 成像示意如图3所示。

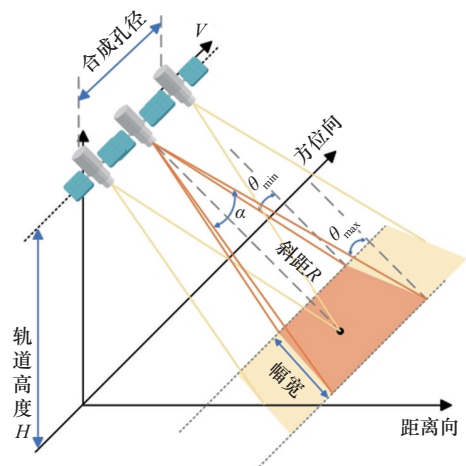


图3 SAR成像示意

由于回波信号在传输和接收的过程中会受各种噪声的干扰, 因此可以使用信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 来量化各种因素对回波信号质量的影响。由于接收机输入噪声被定义为每单位频带功率 kT , 其中 k 表示玻尔兹曼常数, T 表示等效噪声温度。因此将接收带宽 B 和谱密度相乘可以得到噪声功率 kTB , 最后引入噪声因子 F 表示接收机内部噪声将“等效输入噪声”放大的倍数, 即可以得到单脉冲雷达在照射分布式目标时回波信号的信噪比计算公式^[18]:

$$\text{SNR}^{(1)} = \frac{P_{\text{sar}} G_{\text{tr}} G_{\text{re}} \lambda^2 \sigma_0 \rho_a \rho_g}{(4\pi)^3 R^4 F k T B} \quad (4)$$

$$\rho_a = \frac{L_a}{2} \quad (5)$$

$$\rho_g = \frac{c}{2B \sin \theta} \quad (6)$$

其中, P_{sar} 表示卫星遥感成像时的瞬时功率; G_{tr} 表示卫星天线的发射增益; G_{re} 表示卫星天线的接收增益; λ 表示波长; σ_0 表示后向散射系数; ρ_a 表示方位向分辨率; ρ_g 表示距离向地距分辨率; R 表示斜距; L_a 表示天线方位向长度; c 表示光速; θ 表示入射角。

对回波信号分别进行方位向匹配滤波和距离向匹配滤波后可以获取相干积分增益 I_1 和脉压增益 I_2 。 I_1 和 I_2 的计算式表示为^[19]:

$$I_1 = t_a \cdot f_a = \frac{\lambda R}{L_a V} \cdot f_a \quad (7)$$

$$I_2 = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \tau_1 B \quad (8)$$

其中, t_a 表示雷达方位向的合成孔径时间, f_a 表示脉冲重复频率, V 表示卫星的在轨速度; τ_1 表示初始脉冲宽度, τ_2 表示压缩脉冲宽度。

因此, 联立式(4)、式(7)和式(8)可以计算出经过增益后的回波信号信噪比^[19], 即:

$$\text{SNR} = \text{SNR}^{(1)} I_1 I_2 = \frac{P_{\text{sar}} G_{\text{tr}} G_{\text{re}} \lambda^3 \sigma_0 C \tau_1 f_a}{(4\pi)^3 R^3 F k T 4 B V \sin \theta} \quad (9)$$

1.4 合成孔径雷达获取数据量模型

成像雷达需要二维分辨率, 因此要在距离向和方位向对成像区域进行采样, 形成一个二维复采样数据矩阵。在距离向, 采样率 f_r 需要大于调频信号带宽。而在方位向, 采样率等于脉冲重复频率 f_a 。根据奈奎斯特采样定理, 为避免被采样信号的方位向频谱发生严重混叠, 采样率需要大于信号多普勒宽度。同时, 为防止距离向混叠, 合成孔径雷达需要在一个脉冲重复间隔内完成对回波信号的接收, 因此脉冲重复频率也不能过大。本文参

考文献[20], 将脉冲重复频率的取值范围设定为:

$$f_a^{\min} \leq f_a \leq f_a^{\max} \quad (10)$$

其中, 当 $R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ 分别表示扫描条带的最远和最近斜距时, $f_a^{\min}$ 和 $f_a^{\max}$ 的定义为:

$$f_a^{\min} = \frac{2V}{L_a} \quad (11)$$

$$f_a^{\max} = \frac{C}{2(R_{\max} - R_{\min})} \quad (12)$$

对采样后的信号进行量化编码, 可以将模拟信号转换为数字信号存储在卫星中, 待卫星运行至地面站可视范围之内, 再通过星地链路进行数据回传^[21]。卫星在执行一次观测任务时获取的遥感数据量 D_{all} 表示为:

$$D_{\text{all}} = 2(f_a \cdot t_a)(f_r \cdot t_r) N_q N_p \quad (13)$$

$$t_r = \frac{2(R_{\max} - R_{\min})}{c} \quad (14)$$

其中, t_r 表示距离向接收回波数据窗口所持续的时间, N_q 表示量化位数, N_p 表示极化通道数。

1.5 信道模型

在本文构建的通遥一体卫星网络中, 卫星可以借助星间链路进行数据的实时转发, 因此需要考虑星间链路和星地链路两种情况下的信道模型。对于星间链路, 只需要考虑自由空间传输损耗 l_f ; 对于星地链路, 为了提高其信道容量, 需要采用高频信号获取更大的带宽。而高频电磁波在穿越大气层遇到降雨时, 会发生显著的能量衰减, 因此在考虑自由空间传输损耗 l_f 外还需要考虑雨衰 l_r ^[22]。

自由空间传输损耗 l_f 可以表示为:

$$l_f = \left(\frac{C}{4\pi d_{\text{tr}} f_{\text{tr}}} \right)^2 \quad (15)$$

其中, d_{tr} 表示星地传输距离, f_{tr} 表示星地下行链路所在频段。

在计算雨衰时, 首先按照 ITU-R P.837-7 建议书给出的全球气候数据库, 提取地面站所在位置超过年平均 0.01% 时间的降雨率 $R_{0.01}$, 然后根据 ITU-R P.838-3 和 ITU-R P.618-12 建议书计算出超过年平均 0.01% 时间的可预测雨衰 $A_{0.01}$, 基于这个数值, 可以计算出超过年平均 $p\%$ 时间的衰减 A_p 。 A_p 的计算式为^[23]:

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-\delta_p} \quad (16)$$

$$\delta_p = 0.033 \ln p - 0.045 \ln A_{0.01} - \beta(1-p) \sin \eta + 0.655 \quad (17)$$

其中, β 表示经验系数, η 表示地面站仰角。

若采用 ITU-R 统计模型, 信道将从确定性模型转变为不确定性模型, 使得变量优化问题演化为动态决策问题,

需要引入马尔可夫决策过程或强化学习等方法进行优化求解,从而显著增加问题的分析与处理复杂度。因此,本文采用固定 $p = 0.05$ 的方法来定量分析雨衰的影响。为了方便后续计算信道容量,可将 A_p 换算为衰减因子 l_r ,表示为:

$$l_r = 10^{(-0.1A_p)} \quad (18)$$

在上述参数的基础上,如果卫星和卫星、卫星和地面站在时隙中存在可视关系,则它们之间的数据传输速率 R_{ISL} 和 R_{SGL} 可通过香农公式进行计算^[24],即:

$$R_{\text{ISL}} = B_{\text{tr}} \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{com}} G_{\text{st}} G_{\text{dr}} L_{\text{f}}}{n_0 B_{\text{tr}}} \right) \quad (19)$$

$$R_{\text{SGL}} = B_{\text{tr}} \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{com}} G_{\text{st}} G_{\text{dr}} L_{\text{f}} L_{\text{r}}}{n_0 B_{\text{tr}}} \right) \quad (20)$$

$$R(u^t, v^t) = \begin{cases} R_{\text{ISL}}, & v^t \in \mathcal{S}^t \\ R_{\text{SGL}}, & v^t \in \mathcal{D}^t \end{cases} \quad (21)$$

式(19)~式(21)中, B_{tr} 表示链路传输带宽, P_{com} 表示卫星的发射功率, G_{st} 表示发射天线增益, G_{dr} 表示地面站接收天线增益, n_0 表示噪声功率谱密度。

2 问题建模

在推进通遥一体建设的过程中,本文首先考虑L1级别(功能一体)^[1]的通遥一体卫星网络,即各模块共享平台资源,因此需要在资源有限的前提下进行合理的资源分配,使系统性能达到平衡。

2.1 数据传输模型

在构建好的时间扩展图基础上,源卫星需要借助星间链路,在可允许的时间范围内将获取的遥感数据传输至地面站。因此,所有地面站接收到的数据之和应该等于源卫星 s 传输的遥感数据,即:

$$\sum_{v^t: (s^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t} f_c(s^t, v^t) + f_s(s^t, s^{t+1}) = \sum_{d \in \mathcal{D}^t} \sum_{t=t_0}^{t_{\text{end}}} \sum_{u^t: (u^t, d^t) \in \mathcal{E}_c^t} f_c(u^t, d^t) = D_{\text{all}} \quad (22)$$

另外,在传输过程中,由于链路的通信容量有限,数据流还应满足下面的约束,即:

$$f_c(u^t, v^t) \leq R(u^t, v^t) x_{u^t, v^t}, \forall (u^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t, t \in T \quad (23)$$

2.2 能量消耗模型

由于星载能量受限,因此需要在遥感成像与数据传输之间合理分配能量资源,以实现能量约束下的资源利

用率最大化。对于卫星 s 的能耗,本文考虑遥感成像发射能耗 E_1^s 和数据传输消耗能耗 E_2^s 。由于本文仅对目标点观测进行了仿真,观测持续时间较短,因此模拟结果中的感知能耗远低于遥感卫星实际运行场景中的感知能耗;同时,为突出研究的核心问题并简化模型,本文在分析过程中暂不考虑链路切换与建立等过程带来的能耗。能耗模型的计算式表示为:

$$E_1^s = \overline{P_{\text{sar}}} t_a = P_{\text{sar}} \tau_1 f_a t_a \quad (24)$$

$$E_2^s = \sum_{t=t_0}^{t_{\text{end}}} \sum_{v^t: (s^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t} \frac{P_{\text{com}} f(s^t, v^t)}{R(s^t, v^t)} \quad (25)$$

2.3 最优遥感图像质量模型

为了提高卫星对目标遥感观测的图像质量,需要提高合成孔径雷达对地回波的后向散射信噪比,而提高信噪比的重要途径之一在于提高脉冲重复频率。然而,提高脉冲重复频率不仅会导致遥感数据量增大,还会导致能耗增大,从而加大遥感数据的回传压力,使得在时延和能量约束下出现产生的数据不能及时传输至地面站。因此,本文构建了传输时延和有限能量约束下的脉冲重复频率和数据回传路由的联合优化问题:

$$\text{P0: } \max_{\mathcal{X}, \mathcal{F}, f_a} f_a \quad (26)$$

s.t. 式(1)~式(3), 式(10), 式(22), 式(23)

$$x_{u^t, v^t} \in \{0, 1\}, \forall (u^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t, t \in T \quad (27)$$

$$E_1^s + E_2^s \leq \alpha E, \forall s \in \mathcal{O} \quad (28)$$

$$E_2^s \leq \beta E, \forall s \in \mathcal{S} \setminus \mathcal{O} \quad (29)$$

其中,式(1)和式(2)是传输边选择约束,式(3)是数据流守恒约束,式(10)是脉冲重复频率取值范围约束,式(22)是数据传输量约束,式(23)是通信容量约束,式(28)是源卫星能量约束,式(29)是中继卫星能量约束, \setminus 表示集合差集符号。整数变量 $\mathcal{X}$ 和连续变量 $\mathcal{F}$ 、 f_a 的存在,导致问题P0是一个混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP),难以对其直接进行求解。

3 算法设计

当问题P0中的整数变量固定时,会使剩余的问题变为易于处理的线性规划(linear programming, LP)问题。因此本文利用文献[16]所提出的Benders分解算法,将P0分解为仅具有连续变量的子问题P1和仅具有整数变量的主问题P2。由于子问题P1是一个线性规划问题,因此可以利用成

熟的LP求解器进行快速求解。主问题P2则被转化为一个小规模的混合整数规划 (mixed-integer programming, MIP) 问题, 从而有效降低算法复杂度, 提高了计算效率。

(1) 子问题

通过将整数变量 $\mathcal{X}$ 暂时固定, 问题P0可以被转化为子问题P1。由于P1是最大化问题, 因此可以将P0中的约束(式(10))转换为约束(式(31)), 防止子问题在求解时出现不可行的情况, 待问题求解完成之后再对其进行验证:

$$\text{P1: } \max_{\mathcal{F}_a} f_a \quad (30)$$

s.t. 式(3), 式(22), 式(28), 式(29)

$$f_a \leq f_a^{\max} \quad (31)$$

$$f_c(u^t, v^t) \leq R(u^t, v^t) \bar{x}_{u^t, v^t}, \forall (u^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t, t \in T \quad (32)$$

LP问题具有强对偶理论, 因此可以通过求解其对偶问题来获取最优解, 得到每个不等式约束相对应的对偶乘子 $\lambda = \{\lambda_{u^t, v^t}^{(32)}, \lambda_s^{(28)}, \lambda_s^{(29)}, \lambda_a^{(31)}\}$, 并利用这些对偶乘子生成割返回给主问题。其中 $\lambda_{u^t, v^t}^{(32)}$ 代表约束(式(32))对应的一系列对偶乘子, $\lambda^{(28)}$ 代表约束(式(28))对应的对偶乘子, $\lambda_s^{(29)}$ 代表约束(式(29))对应的一系列对偶乘子, $\lambda^{(31)}$ 代表约束(式(31))对应的对偶乘子。

如果P1的对偶问题有界, 说明原始问题可行, 因此将最优割约束(式(34))添加到P2中; 如果对偶问题无界, 则说明对于给定的 $\mathcal{X}$, 子问题是不可行的, 此时会获取一个极射线 r_{u^t, v^t} , 将可行割约束(式(35))添加到P2中。

(2) 主问题

主问题根据子问题生成的割来构建约束, 更新整数变量 $\mathcal{X}$ 以最大化 z :

$$\text{P0: } \max_{\mathcal{X}} z \quad (33)$$

s.t. 式(1), 式(2), 式(27)

$$\lambda^{(28)} \alpha E + \sum_{s \in \{\mathcal{SO}\}} \lambda_s^{(29)} \beta E + \lambda^{(31)} f_a^{\max} + \quad (34)$$

$$\sum_{t=t_0}^{t_{\text{end}}} \sum_{(u^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t} \lambda_{u^t, v^t}^{(32)} R(u^t, v^t) x_{u^t, v^t} \geq z$$

$$\sum_{t=t_0}^{t_{\text{end}}} \sum_{(u^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t} r_{u^t, v^t} R(u^t, v^t) x_{u^t, v^t} \geq 0 \quad (35)$$

具体的算法流程见算法1。首先利用Dijkstra算法获取每个时隙的最优路径来初始化传输边集合 $\mathcal{X}$, 并设 $\text{UB} \rightarrow \infty$, $\text{LB}=0$; 然后利用Gurobi求解子问题P1和主问题P2。若子问题存在最优解则将最优割约束(式(34))添加到主问题, 并按式(36)更新下界LB; 反之将可行割约束

(式(35))添加到主问题。主问题P2在获取子问题的割约束后进行求解, 得到新的传输边集合 $\mathcal{X}$ 和最优值 z , 将 $\mathcal{X}$ 传给子问题并更新 $\text{UB} = z$ 。在迭代求解P1和P2的过程中, 为了提高求解效率, 规定当上下界之间的差距小于预设阈值 σ 时, 算法终止迭代, 输出 $\mathcal{X}^*$ 、 $\mathcal{F}^*$ 和 f_a^* 。

$$\text{LB} = \max \{ \text{LB}, \lambda^{(28)} \alpha E + \sum_{s \in \{\mathcal{SO}\}} \lambda_s^{(29)} \beta E + \lambda^{(31)} f_a^{\max} + \sum_{t=t_0}^{t_{\text{end}}} \sum_{(u^t, v^t) \in \mathcal{E}_c^t} \lambda_{u^t, v^t}^{(32)} R(u^t, v^t) \bar{x}_{u^t, v^t} \} \quad (36)$$

算法1:

输入: TEG网络结构、预定义参数、数学模型

输出: $\mathcal{X}^*, \mathcal{F}^*, f_a^*$

1: 初始化: 传输边集合 $\mathcal{X}$, $\text{UB} \rightarrow \infty$, $\text{LB} = 0$ 。

2: repeat

3: 输入 $\mathcal{X}$, 求解子问题P1, 获取对偶乘子 λ 。

4: if 子问题P1有最优解

5: 最优割(式(34))添加到主问题P2。

6: 更新下界LB。

7: else

8: 将可行割(式(35))添加到主问题P2。

9: 求解主问题P2, 得到最优解 $\mathcal{X}$ 和 z 。

10: 更新上界 $\text{UB} = z$ 。

11: until $\frac{\text{UB} - \text{LB}}{\text{UB}} \leq \sigma$ 。

4 仿真与数据分析

4.1 参数设置

本文利用卫星工程设计和分析软件卫星工具包 (satellite tool kit, STK) 进行仿真研究。模拟场景的时间范围设置为28 Sep 2025 00:00:00~28 Sep 2025 4:00:00, 并将48颗卫星均匀分布在轨道面上, 构成Walker星座。同时设置3个地面数据接收站, 分别位于密云 (40.38°N, 116.78°E)、三亚 (18.31°N, 109.65°E)、喀什 (39.49°N, 75.99°E) 以及一个观测目标 (34.063°N, 166.328°E)。具体的STK仿真参数和模型参数^[3, 21-22]分别见表1和表2。

表1 STK仿真参数设置

参数	值
轨道高度	1 250 km
轨道倾角	97.41°
星座类型	Walker-Delta
相位因子	1
轨道面数	8个
各轨道面卫星数	6颗

表2 模型参数设置

参数	值
P_{com}	80 W
$G_{\text{st}} = G_{\text{dr}}$	46 dB
$G_{\text{tr}} = G_{\text{re}}$	49.78 dB
B_{tr}	10 MHz
f_{tr}	20 GHz
n_0	-174 dBm/Hz
τ_1	20 μs
P_{sar}	1 500 W
V	7 232.07 m/s
L_a	15 m
B	240 MHz
σ_0	0.009 34 m^2
N_q	8
N_p	1
F	1
K	1.38 ⁻²³ J/K
T	412.020 5 K
σ	0.02
α	0.5
β	0.4
$t_{\text{end}} - t_0$	10
θ_{min}	30°
θ_{max}	32.08°
密云 $R_{0.01}$	43.183 mm/h
三亚 $R_{0.01}$	82.634 mm/h
喀什 $R_{0.01}$	9.384 mm/h

4.2 仿真结果分析

为验证所提算法的有效性与可行性，本文将所提Benders分解算法与直接调用求解器、遗传算法两种求解方式在执行耗时和优化结果（脉冲重复频率）两方面分别进行了对比，结果如图4所示。由图4可知，在优化结果（脉冲重复频率）相差不大的情况下，遗传算法的执行耗时明显高于其他两个求解方式，这是因为遗传算法是基于启发式的全局搜索算法，需要在种群初始化、选择、交叉和变异等操作中进行大量迭代计算，收敛速度较慢。相比之下，使用CVXPY求解器直接求解MILP模型，可以获得3种求解方法中的最佳优化结果。但由于MILP本质上属于NP-hard问题，直接使用分支定界会导致执行耗时显著增加，效率较低。而本文提出的Benders分解算法在保证解的可行性的同时，通过引入收敛阈值放宽最优性条件，将原问题分解为主问题与子问题交替迭代求解，从而有效缩小搜索空间并加速收敛。在保证与直接使用求解器获得的优化结果（脉冲重复频率）接近的前提下，显著降低了执行耗时。

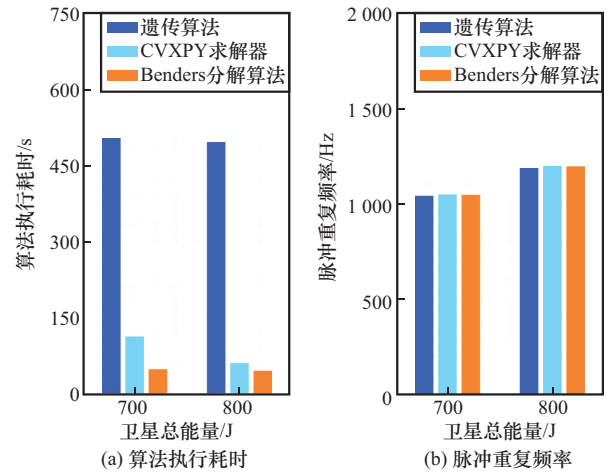


图4 多求解方法性能对比

（注：本文仅考虑目标点观测任务，实验数据量相对较小，导致总体能耗水平较低。为验证算法的有效性，卫星总能量参数的设置远低于实际任务水平。）

本文所设计算法的收敛性可由图5中脉冲重复频率的上下界变化趋势来证明。由图5可以看出，随着迭代次数的增加，UB和LB会逐渐趋近于收敛。需要指出的是，图5中上下界的差距不是单调减小的原因在于UB和LB并非每次的迭代值，而是从初始迭代至当前迭代过程中已获得的最优值。随着最优割的不断累积，当算法在某次迭代中找到较以往任何一次迭代都更优的解时，收敛曲线便会明显的拐点。此外，从图5中还可以看到，当卫星可用能量 E 增加时，模型的收敛位置也会随之提高，这表明在卫星网络结构和传输时隙保持不变的情况下，增加卫星可用能量将有效提升其脉冲重复频率。

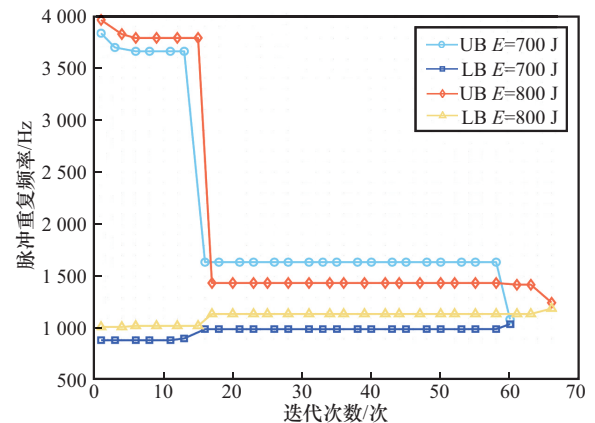


图5 算法收敛性

如前所述，脉冲重复频率随卫星可用能量的增加而增加。然而，卫星在数据传输过程中的具体能量消耗情况难以直接观察，因此可通过瓶颈链路利用率热力图直

观展示网络负载分布（如图6所示）。热力图中每个单元格表示相应卫星在数据传输过程中的能量消耗率，数值范围为0至1，其中0表示未消耗能量，1表示能量消耗达到上限。以源卫星与LeoSat53及LeoSat84为例，其单元格值分别为0.87和0.13，这表明在数据传输过程中源卫星的可用能量几乎耗尽。而在数据下载的过程中，通过星间链路可以将数据下载至不同的地面数据接收站，从而分散能耗，提高整体可传输数据量。因此，可判定此类瓶颈主要产生于源卫星而非链路本身。为进一步提升脉冲重复频率，可通过增加源卫星能量或优化能量分配策略来缓解其能量瓶颈，同时结合星间链路负载均衡，提高数据传输效率和网络稳定性。

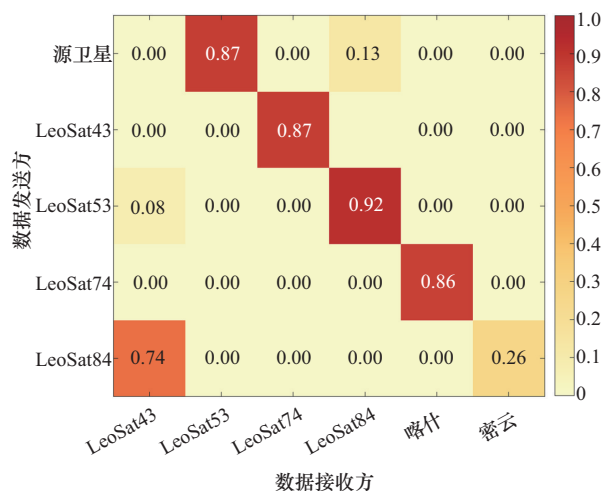


图6 链路能量利用率热力图

通过对比本文提出的通遥联合优化策略与传统优化策略可以发现，在采用通遥联合优化策略时，源卫星获取的遥感图像信噪比高于在给定的传输路径下仅优化脉冲重复频率的传统策略（如图7所示）。这是因为在采用寻路算法选择信道容量最大的单一路径作为确定性传输路径时，由于中继卫星的能量有限，该路径无法支撑源卫星传输更多的遥感数据，从而限制了脉冲重复频率的提升。而在通遥联合优化策略中，系统通过综合考虑源卫星和中继卫星的能量消耗状况来动态选择最优传输路径，从而在满足能量约束的前提下最大化脉冲重复频率，最终获得更高的SNR。同时，信道条件的不同也会对SNR产生影响。在传统优化策略中，当信道质量较好（未考虑雨衰影响）时，中继卫星可以在有限的能量资源约束下传输更多的数据，因此会提高SNR。而在通遥联合优化策略下，由于系统已实现对整体能量消耗与链路分配

的协调优化，雨衰对结果的影响显著减弱，此时系统性能主要受限于源卫星的能量供给，只有增加源卫星的能量输入，才能进一步提升SNR。

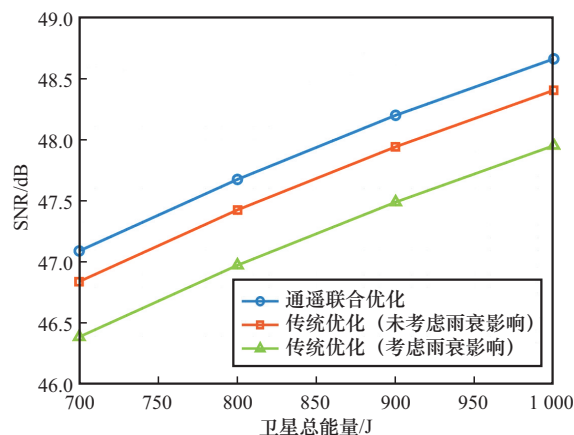


图7 优化策略对比

5 结束语

本文研究了基于TEG的通遥一体卫星网络在有限能量和传输时隙约束下的合成孔径雷达后向散射信噪比最大化问题。由于提出的数学模型是高复杂度的MILP问题，因此本文利用Benders分解算法，将原始问题拆分为小规模主问题和子问题进行求解，从而有效降低计算复杂度。通过对多种求解算法结果进行对比，验证了所提算法的有效性，分析了在不同能量约束条件下的性能差异，展示了通遥一体卫星在能量约束下的网络负载分布，并与单一优化策略进行了对比，结果表明所提通遥联合优化策略更具优势，为通遥一体卫星网络研究提供了参考。

参考文献

- [1] Sheng M, Guo C T, Huang L. Integrated communication, navigation, and remote sensing in LEO networks with vehicular applications[J]. IEEE Wireless Communications, 2025, 32(3): 140-147.
- [2] Lu H C, Gui Y Q, Jiang X D, et al. Compressed robust transmission for remote sensing services in space information networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 46-54.
- [3] Qiu L, Chen Q, Chen S Y, et al. Priority-aware parallel transmission toward dense satellite remote sensing and communication integrated networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2025, 11(3): 1788-1802.
- [4] 李德仁, 王密, 仵倩玉. 论智能遥感卫星的“快、准、灵”应用服务[J]. 先进小卫星技术(中英文), 2024, 1(1): 1-9.

- Li D R, Wang M, Wu Q Y. On the "fast, accurate and flexible" application services of intelligent remote sensing satellites [J]. Advanced Small Satellite Technology, 2024, 1(1): 1-9.
- [5] 苏文博, 张弛, 王妮炜, 等. 天地一体通遥融合架构及其应用设想[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(2): 77-84.
- Su W B, Zhang C, Wang N W, et al. The integrated architecture of space-ground communication and remote sensing and its application concept[J]. Space Integrated Ground Information Networks, 2024, 5(2): 77-84.
- [6] 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. Integration of satellite remote sensing and 6G communication remote sensing[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(4): 60-70.
- [7] Jia X H, Lyu 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.
- [8] 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.
- [9] Wang Y, Sheng M, Zhuang W H, et al. Multi-resource coordinate scheduling for earth observation in space information networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 268-279.
- [10] Zhong X Q, Guo N X, Li A S, et al. Link topology and multi-objective mission flow optimization for remote sensing satellites with inter-layer links and satellite-ground links[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(10): 15621-15635.
- [11] Zhou D, Sheng M, Zhu Y, et al. Mission QoS and satellite service lifetime tradeoff in remote sensing satellite networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(7): 990-994.
- [12] Chen L, Tang F L, Li X, et al. Delay-optimal cooperation transmission in remote sensing satellite networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 22(9): 5109-5123.
- [13] Cao J Q, Zhang S L, Chen Q X, et al. Computing-aware routing for LEO satellite networks: a transmission and computation integration approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(12): 16607-16623.
- [14] Yang J, Sun K X, He H S, et al. Dynamic virtual topology aided networking and routing for aeronautical ad-hoc networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(7): 4702-4716.
- [15] 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.
- [16] Jia Z Y, Sheng M, Li J D, et al. Toward data collection and transmission in 6G space-air-ground integrated networks: cooperative HAP and LEO satellite schemes[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(13): 10516-10528.
- [17] Moreira A, Prats-iraola P, Younis M, et al. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6-43.
- [18] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic aperture radar: systems and signal processing[M]. New York: Wiley, 1991.
- [19] Chan Y K, Koo V C. An introduction to synthetic aperture radar (sar)[J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2008, 2: 27-60.
- [20] Song R Z, Wang W, Yu W D. The latest developments in spaceborne high-resolution wide-swath SAR systems and imaging methods[J]. Sensors, 2024, 24(18): 5978.
- [21] Xiao P, Liu M, Guo W, et al. Reconstruction of synthetic aperture radar raw data under analog-to-digital converter saturation distortion for large dynamic range scenes[J]. Remote Sensing, 2019, 11(9): 1043.
- [22] Zhou D, Sheng M, Wang Y X, et al. Machine learning-based resource allocation in satellite networks supporting internet of remote things[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(10): 6606-6621.
- [23] Dissanayake A, Allnutt J, Haidara F. A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along earth-satellite paths[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(10): 1546-1558.
- [24] Fu S, Gao J, Zhao L. Integrated resource management for terrestrial-satellite systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 3256-3266.

[作者简介]

原哲 (2001-), 男, 深圳大学硕士生, 主要研究方向为通遥一体卫星网络。



郭重涛 (1987-), 男, 深圳大学副教授, 主要研究方向为通遥一体卫星网络、车联网、机器学习等。



赵博 (1986-), 男, 深圳大学副教授, 主要研究方向为单比特雷达系统设计、单比特雷达信号处理、单比特雷达关键芯片、高分辨遥感探测、电子对抗、识别解译等。

