

低轨遥感卫星星地多站接力数据传输时间优化策略*

陆召严 范森权 付碧红 包丽平 汪 灏

(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201304)

摘要 针对低轨遥感卫星多站数传接力问题中链路切换时刻选择及接力场景复杂的问题,提出了一种基于链路切换时间优化的多站数传接力方法,简化多站接力场景并选择最优接力时刻,提升数传接力传输时长。基于该方法建立多站接力的数学描述,并构建卫星与地面站链路切换时间的表达方法。基于主流的低轨遥感卫星和地面站特征,建立星地数传接力场景,归纳可见时间弧段特征,构建多站接力复杂场景的两站化优化策略,同时对链路切换时间进行数值求解,寻求接力时间最短的接力时刻。使用典型的星地数传模型仿真计算验证本文构建的带有优化策略的数传接力方法。仿真结果表明:在中国三个典型地面站场景下,卫星与地面站的数传链路存在 32.0% 可接力数传弧段,其中三站接力场景占比 17.9%,三站接力场景可以通过优化策略简化成两站接力场景并存在最优接力时刻,使用接力时间优化策略后,最短链路切换时间相比最长接力时间可缩短最高达 25%;使用优化后的数传接力方法进行接力数传,每次可用时间的平均值由单站的 7.61 min 提升为 11.12 min。

关键词 数传多站接力, 数传时间优化, 单星多站数传链路, 机械天线导引

中图分类号 V474.2

Optimization Strategy for Single-satellite to Multi-station Data Transmission

LU Zhaoyan FAN Senquan FU Bihong

BAO Liping WANG Hao

(Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201304)

Abstract In order to solve the problems of link handover time selection and complex relay scenarios in the multi-station data relay problem, a multi-station data relay method based on link handover time optimization was proposed, which simplified the multi-station relay scene and selected the optimal relay time, so as to improve the transmission time of data relay transmission. In this method, the mathematical description of multi-station relay is established based on the satellite-ground model and the motion constraints of the mechanical antenna, and the expression method of the link switching time between the satellite and the ground station is constructed. Based on the characteristics of mainstream low-orbit re-

* 中国科学院战略性先导科技专项 A 类项目资助 (XDA19010000)

2024-06-28 收到原稿, 2024-12-13 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

remote sensing satellites and ground stations, the relay scenarios of satellite-to-ground data transmission are established, the characteristics of their visible time arcs are summarized, and a two-station optimization strategy for complex multi-station relay scenarios is constructed. Finally, the typical satellite-to-ground data transmission model simulation is used to verify the data transmission relay method with optimization strategy constructed in this paper. The simulation results show that there are 32.0% relayable data transmission arcs in the data transmission links between satellite and the three typical ground station located in China, of which the three-station relay scenario accounts for 17.9%, and the three-station relay scenario can be simplified into a two-station relay scenario through the optimization strategy. In the link handover interval of multiple stations with visible arcs, there is a relay time with the shortest relay time, and the shortest link switching time can be shortened by up to 25% compared with the worst relay time after using the relay time optimization strategy. Using the optimized data relay method for relay data transmission, the average time available for each time was increased from 7.61 minutes to 11.12 minutes.

Key words Multi-station relay of data transmission, Data transmission time optimization, Single-satellite multi-station data transmission link, Mechanical antenna guidance

0 引言

近年来,随着遥感卫星技术的快速发展,用户对高分辨率、宽幅成像及多载荷协同观测的需求显著提升^[1].同时,卫星每日在轨工作时长与成像频次的大幅增加,导致有效载荷数据量呈指数级增长.为确保数据下传的时效性,需将星上数据每日及时回传至地面,这对星地数据传输系统提出了严峻挑战^[2].

为了解决该突出矛盾,星上除了采取对载荷数据进行 JPEG2000 和 JPEG-LS 等压缩算法进行数据压缩、通过高阶调制提高数传下传速率、通过左右旋双极化方式增加下传通道数、通过可变编码调制 (VCM) 方式充分利用链路余量在链路余量高时提高下传速率等方法外^[3],还可以在有限的数传地面站资源的情况下,通过星地配合、多站接力数传的方式,提高数传地面站的接收效率^[4].多站接力数传是指在单个数传前序地面站传输结束时使用导引律把数传天线的波束指向后序在可见窗口弧段中的地面站,和后序地面站建立数传链路继续进行数据传输,直到卫星出境.在这种方法中,链路切换的时间点将影响最终的数传时间^[5].为了实现数据传输量的最大化,如何选择两站之间的切换时间点就形成了单星多站的数据传输链路时序优化问题^[6-8].

针对多站数传接力问题中链路切换时间选择及接力场景复杂的问题,本文提出了一种基于链路切换时间优化的多站接力数传方法,简化了多站接力场景

并选择最优接力时刻,提升了数传接力传输的时长稳定性和效率.在该方法中,首先基于星地模型和机械天线的运动约束建立多站接力的数学模型,并构建卫星与地面站链路切换的时间表达方法.基于主流的低轨遥感卫星和地面站特征,建立星地数传接力场景,并归纳总结其可见时间弧段的特征,构建多站接力复杂场景的两站化优化策略,同时对链路切换时间进行数值求解,寻求接力时间最短的接力时刻.最后,使用典型的低轨遥感卫星星地数传模型仿真计算验证本文构建的带有优化策略的数传接力方法.

1 问题描述

低轨遥感卫星在轨运行工作大致可以分为三个阶段:数据获取阶段、数据处理阶段和数据传递阶段.其中,数据传递阶段指卫星将处理后的信息数据传递至使用终端的阶段,为了实现这个功能需要卫星配置的数传系统与地面站网络系统匹配.一般来说,地面站网络由多个地面数传站和控制中心组成,卫星可以通过多个数传站连接到地面网络中,把获取的数据传递下来并进行分发.对于单颗卫星,由于地面站主要部署在国内,地理位置上分布相对集中,使得卫星过境时往往能够同时与多个地面站之间存在可见弧段,但同一时刻卫星只能与一个地面站进行建链,导致地面资源使用效率不高^[8].

如图 1 所示.对于单个地面站,设定开始时刻为 t_1 ,此时星地链路建立,数传链路持续时间为 t ,在

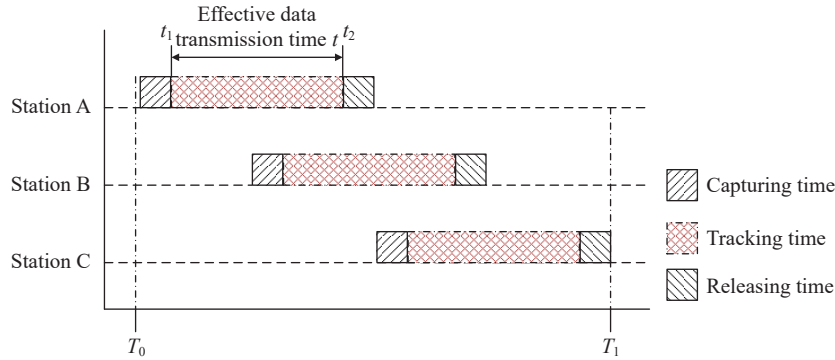


图 1 多站数传可见时间示意

Fig. 1 Schematic diagram of the time of multi-station data transmission

t_2 时刻结束链路 (时间 t 表示有效传输时间), 星地链路可见时长随卫星运行可变. 卫星在时间区段 $[T_0, T_1]$ 内过境时, 地面站 A, B 和 C 均存在时间窗口为其提供数传服务. 但是, 这些时间窗之间存在较大程度的重叠, 因此仅能选择其中的一个执行数据回传, 其他的可视时间窗则被放弃.

目前, 为了解决地面站资源使用效率的问题, 往往使用多站接力数传的方式延长卫星过境时的数传时间, 即在前序数传站传输结束时使用导引律把数传天线的波束指向后序在可见弧段中的地面站, 与后序地面站建立数传链路继续进行数据传输, 直到卫星出境. 在这种方法中, 链路切换的时间点将影响最终的数传时间. 为了实现数据传输量的最大化, 如何选择两站之间的切换时间点就形成了单星多站的数据传输链路时序优化问题^[8].

多站数传接力时序优化问题可以描述为根据各类资源, 在满足约束条件下, 星地联合构建数传规划方案, 使其数传总时间达到最大值, 可以表示为

$$E = \langle T, A, C, O, \bar{T} \rangle. \quad (1)$$

式中, T 表示地面站数传可见弧段, A 表示数传天线运动导引, C 表示接力地面站的数目, O 为卫星资源约束, $\bar{T}$ 表示接力切换时间点, E 表示目标优化函数.

2 单星多站数传模型

2.1 卫星姿态及指向

低轨遥感卫星运行时其位置采用轨道坐标系表示, Z 轴为卫星到地球质心连线, 指向地球质心; Y 轴与轨道平面负法线方向一致, X 轴与 Y, Z 轴成右手

正交系, 在轨道平面指向前进方向 (若为圆轨道则与速度方向一致).

卫星本体坐标系也称卫星质心坐标系, 以卫星质心为原点, 如图 2 所示, X_b 轴对应在轨时的飞行方向; Z_b 轴指向有效载荷的视场方向, 对应在轨时的对地方向; Y_b 轴按右手坐标系法则与 X_b 轴和 Z_b 轴正交, 对应在轨时轨道面法向.

数传天线位于卫星 $+Z$ 面, 波束发射在轨运行时指向地面, 设定有 L, B 和 H 轴.

2.2 星载数传天线指向

数传天线采用 $X-Y$ 布局形式, X 轴为主动轴 (即 A 轴), Y 轴为从动轴 (即 B 轴), X/Y 轴正交安装, X 轴带动 Y 轴运动, 如图 3 所示. 以基准点为坐标原点 R , L 轴与主动轴 X 轴平行, 天线处于零位状态时, 从动轴 Y 轴与 B 轴平行, H 轴与 L, B 轴构成右手直角坐标 $RLBH$. H 轴平行于卫星本体坐标系 Z 轴, L 轴平行于本体坐标系 Y 轴, B 轴平行于本体坐标系 X 轴^[7].

对于数传天线, 以天线坐标系的 H 轴方向为天线零位, 天线 $RBLH$ 坐标系下 φ 和 θ 角度定义如下.

天线俯仰角为主动 X 轴 (A 轴) 转动角, 记为 φ , 绕 L 轴按照右手定则逆时针为正, 顺时针为负.

天线滚动角为从动 Y 轴 (B 轴) 转动角, 记为 θ , 绕 B 轴按照右手定则逆时针为正, 顺时针为负. 坐标系 B 轴方向为正.

2.3 单星多站接力数学描述

当低轨遥感卫星存在两站接力时, 设前序站的入境时刻为 T_0 , 出境时刻为 T_1 , 后序站入境时刻为 T_2 , 出境时刻为 T_3 , 在卫星天线坐标系下天线主动轴 (俯仰) 转动角变化曲线为 $\varphi_\alpha(t)$, 从动轴 (滚动) 转动角

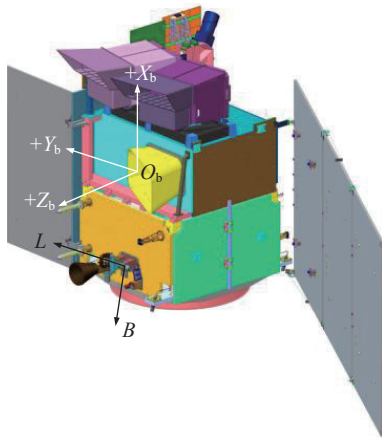


图2 卫星坐标

Fig. 2 Satellite coordinates

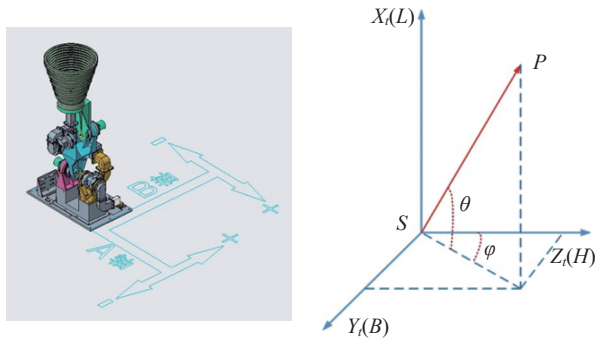


图3 数传天线指向角度定义

Fig. 3 Definition of the pointing angle of the data transmission antenna

变化曲线为 $\theta_\beta(t)$. 天线运动曲线为跟踪地面站形成了离散数值点, 每一个时刻形成主动轴和从动轴的角度对 $(\varphi_{\alpha,i}, \theta_{\beta,i})$, 保证数传天线指向可见的地面站点. 图4给出了仿真环境下典型的卫星数传天线在可见弧段中保证指向喀什数传站的俯仰、滚动转动角曲线^[9,10].

星上数传天线采用双轴驱动点波束天线, 当两站接力时, 数传天线在导引律的导引下, 由前序站(T_1)导引至后序站(T_2), 在下传时为了不丢失有效数据, 在 $T_1 \sim T_2 + 20$ (单位 s) 期间停止发送有效数据, 只发送填充帧, $T_1 + 20$ (单位 s) 后在后序站已经锁定卫星数传信号后再开始发送有效数据.

$\varphi_{1,\alpha}(t), \theta_{1,\beta}(t)$ 表示前序站的天线运动曲线, $\varphi_{2,\alpha}(t), \theta_{2,\beta}(t)$ 表示后序站的天线运动曲线. 接力时间 Δt 主要取决于天线主动轴转动的角度 $\Delta\varphi$ 及天线从动轴转动的大小 $\Delta\theta$, 有

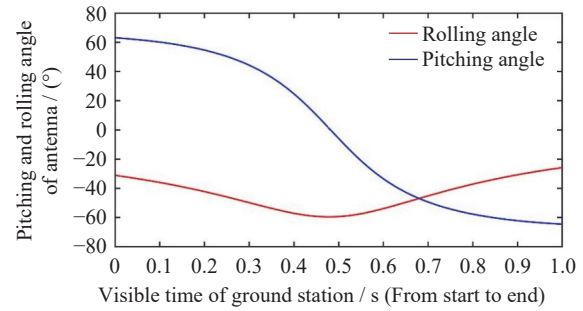


图4 数传天线运动曲线

Fig. 4 Data transmission antenna motion curve

$$\Delta\varphi = |\varphi_{2,\alpha}(t_{\alpha 2}) - \varphi_{1,\alpha}(t_{\alpha 1})|, t_{\alpha 1} \in [t_0, t_1], t_{\alpha 2} \in [t_2, t_3]; \quad (2)$$

$$\Delta\theta = |\theta_{2,\beta}(t_{\beta 2}) - \theta_{1,\beta}(t_{\beta 1})|, t_{\beta 1} \in [t_0, t_1], t_{\beta 2} \in [t_2, t_3]. \quad (3)$$

为保证遥感卫星载荷成像质量, 在载荷工作期间, 机械天线的运动需要尽可能平稳顺滑, 以减少抖动对成像的影响, 因此设定天线从 T_1 导引到 T_2 的运动为梯形导引, 如图5所示.

在上述数传接力的数学模型中, 对于 $t_{\alpha 1} \in [t_0, t_1], t_{\alpha 2} \in [t_2, t_3], t_{\beta 1} \in [t_0, t_1], t_{\beta 2} \in [t_2, t_3]$, 存在 $t_{\alpha 1}, t_{\alpha 2}, t_{\beta 1}, t_{\beta 2}$, 使得

$$\Delta\gamma_{\min} = \min \{ \max(\Delta\varphi, \Delta\theta) \}, \Delta t_{\min} = \Delta\gamma_{\min} - 10 + 20, \quad (4)$$

即存在着最优接力时间, 既保证天线运动的平稳又有着最短的链路切换时间.

3 接力场景分析

依据单星多站数传模型, 建立低轨遥感卫星和地面站的仿真环境, 卫星轨道采用近极地轨道, 选择回归周期 11 天的 505 km 太阳同步轨道, 降交点选取为 09:30 LT. 根据国内数传地面站的部署地点, 选择密云、喀什、三亚三个典型站作为仿真输入, 地面站的参数如表1所示. 仿真了一个月时间 (2021-03-03 09:30:00 UTC 至 2021-04-04 09:30:00 UTC) 的星地链路数据.

仿真结果显示一个月星地数传可见弧段 (3 min 以上的弧段时间) 总数为 350 段, 单站的可见时间最小为 3 min, 最大可见时间不超过 9.5 min. 在这 350 个可见弧段中, 后序站和前序站之间的间隔长度: 有 112 个弧段在 $-4 \sim 2$ min 之间, 其中有 10 组弧

段序号连续 (可进行三站接力); 有 63 个弧段在 300 min 以上; 有 175 个弧段在 100 min 左右. 其中可接力的弧段为时间间隔在 $-4 \sim 2$ min 之间的 112 个弧段, 另外 238 个弧段由于间隔时间过长不适合接力, 因此可以接力的弧段占比为 $112/350=32\%$.

把时间缩减到一个回归周期, 在一个 11 天的回归周期中, 三个地面站和卫星的连接共有 84 个弧段, 如图 6 所示. 可以看到, 在 84 个可见弧段中, 喀什站有 30 个, 三亚站有 23 个, 密云站有 31 个. 喀什站的最长可见时间为 9.25 min, 三亚站的最长可见时间

为 8.40 min, 密云站的最长可见时间为 9.29 min.

图 7 给出了一个回归周期内, 当前站和前序站时间间隔在 $-4 \sim 2$ min 之前的所有可见弧段, 弧段数为 26 段, 表明在一个回归周期内的 84 个数传可见弧段中有 26 个弧段可以用作数传接力. 可以看到在序号为 26 和 27 两个弧段的时间间隔都在比较小的范围内, 表明 26 段时间内地面站可以和前序站进行数传接力, 同时 27 段也可以和前序站进行接力数传, 即可以三站接力.

4 优化策略

4.1 多站接力场景优化

在接力场景分析中可以看到, 占比 32% 的可接力弧段中, 存在着两站接力和三站接力两种场景.

对于简单的两站接力情况, 主要分为三种情况: 前序弧段部分覆盖后序弧段、前序后序弧段不重叠、前序弧段覆盖全部后序弧段三种 (见图 8). 针对此类场景, 定义 Δt 为前序站可见弧段结束时刻和后序弧段开始时刻的时间间隔, 由后序站开始时刻减去前序站结束时刻得到. 因此, 当 $\Delta t > 0$ 时, 表示两站弧段不重叠, 此时接力后数传时间可表示为两段数传弧段相加减去 Δt ; 当 $\Delta t_1 < 0$ 时, 表示两个接力弧段存在

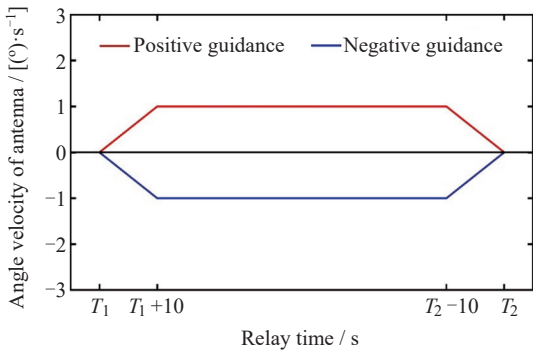


图 5 数传天线接力导引律

Fig. 5 Relay guidance law of data transmission antenna

表 1 地面站参数

Table 1 Parameter of ground station

序号	站名称	经度/(°)E	纬度/(°)N	高程/m	最低接收仰角/(°)
1	密云站	116.8	40.4	109	5
2	喀什站	75.9	39.51	1307	5
3	三亚站	109.3	18.31	22	7

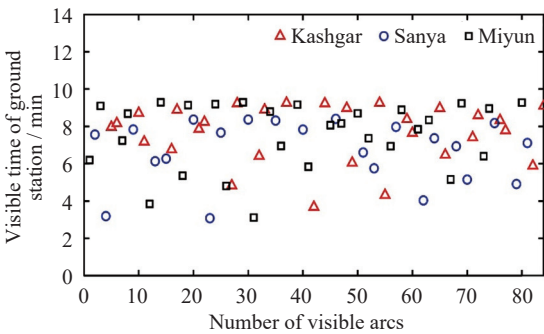


图 6 一个回归周期 (11 天) 内星地数传可见弧段

Fig. 6 Visible arcs from the satellite to the ground within 11 days

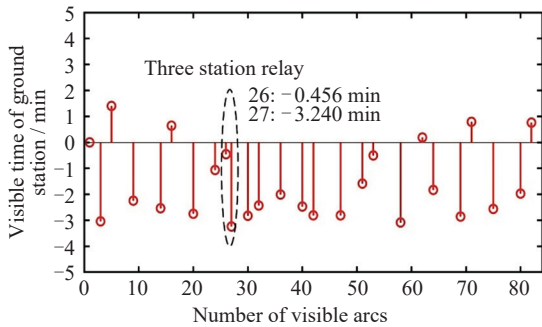


图 7 一个回归周期 (11 天) 内当前站与前序站时间间隔

Fig. 7 Time interval between the current station and the previous station within 11 days

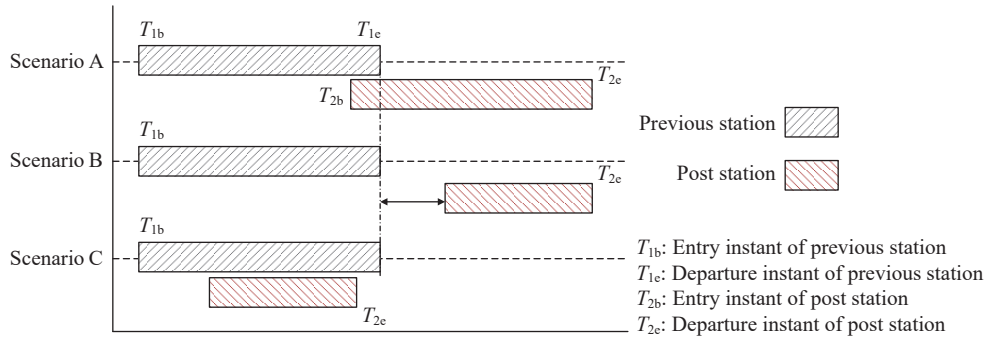


图 8 两站接力的情形

Fig. 8 Situation of the two-station relay

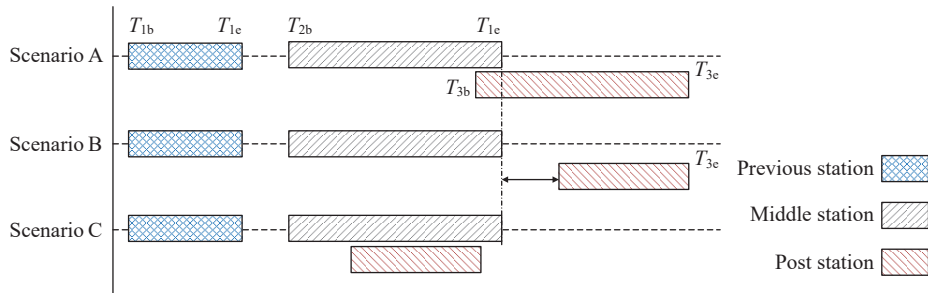


图 9 三站接力场景 (前序站与中间站不重叠)

Fig. 9 Three-station relay scenario (The previous station does not overlap with the middle station)

重叠区域. 在存在重叠区域时, 同样也有两种情况, 即部分重叠和后序站全部包含在前序站中. 当两段部分重叠时, 接力时间可由两段时间相加减去重叠部分, 当两段具有包含关系时, 采用删除后序站的方法进行计算.

在三站可见的情况下, 主要存在前序站与中间站不重叠、前序站与中间站重叠且与后序站不重叠、前序站与中间站和后序站都重叠以及前序站与中间站重叠且包含 4 种典型场景. 在这些场景中, 第一种场景中前序站独立, 中间站和后序站构成两站接力情形, 可删除前序站, 处理为两站接力 (见图 9); 第四种场景中, 前序站完全包含中间站, 只保留前序站和后序站, 形成两站接力场景.

针对复杂的第二和第三种场景, 存在前序站和中间站、后序站存在单独重合或者全都重合几种情况, 假设前序站和中间站之间的重叠时间表示为 Δt_{12} , 前序站和后序站之间的重叠时间表示为 Δt_{13} , 使用这两个时间对所有的三站接力场景进行分析讨论. 首先, 当 $\Delta t_{12} = 0$ 时表示前序站和中间站没有重叠部分, 即三站接力中的第一种场景 (见图 10). 当 $\Delta t_{12} > 0$ 且 $\Delta t_{13} = 0$ 时, 即表示图 10 中所示场景 A, B, C 以及

F 状态, 此时前序站只与中间站有重叠部分, 与后序站之间没有重叠; 当 $\Delta t_{12} > 0$ 且 $\Delta t_{13} > 0$ 时, 即表示图中 E, G, H 状态, 此时前序站与中间、后序站都存在重叠部分. 在场景 E, F, G 状态中, 由于前序站的可见时间弧段完全包含中间站, 因此可以删除中间站, 简化为前序站和后序站的两站接力场景, 而 H 状态中, 由于中间站完全包含后序站, 因此可以删除后序站简化为前序和中间站的两站接力场景. 在场景 A, B, C 状态中, 前序站与中间站可以独立完成两站接力, 中间站与后序站也可以独立完成中间接力, 不涉及三站耦合, 因此也可以处理成两站接力模式.

通过以上分析可以看到, 在三站可见的情况下, 如其中有一站的弧段与其余两站重合严重, 可以删除一站, 简化为两站可见. 因此实际在轨使用时, 单星多站数传接力优化可简化为独立站 (不接力) 及两站接力两种情形, 两站接力又存在如下两种情形, 因此后续优化方法针对两站接力, 寻找最优数传切换时间.

三站优化为两站的具体依据为三站之间的时间间隔以及时间弧段的重叠度的大小关系, 具体流程如下.

(1) 计算 Δt_{12} 和 Δt_{13} 的大小.

(2) 计算前序站和中间站的时间间隔 $T_{2b}-T_{1e}$ 以及前序站和后序站的时间间隔 $T_{3b}-T_{1e}$.

(3) 当 $T_{2b}-T_{1e} < \Delta t_{12}$, $T_{3b}-T_{1e} < \Delta t_{13}$ 时, 如果 $T_{2e}-T_{1e}-\Delta t_{12} \geq T_{3e}-T_{1e}-\Delta t_{13}$, 则删除后序站, 如果 $T_{2e}-T_{1e}-\Delta t_{12} < T_{3e}-T_{1e}-\Delta t_{13}$ 则删除中间站; 当 $T_{2b}-T_{1e} < \Delta t_{12}$, $T_{3b}-T_{1e} \geq \Delta t_{13}$ 时, 如果 $T_{2e}-T_{1e}-\Delta t_{12} \geq T_{3e}-T_{1e}-(T_{3b}-T_{1e})$, 则删除后序站, 如果 $T_{2e}-T_{1e}-\Delta t_{12} \geq T_{3e}-T_{1e}-(T_{3b}-T_{1e})$ 则删除中间站.

(4) 当 $T_{2b}-T_{1e} \geq \Delta t_{12}$, $T_{3b}-T_{1e} < \Delta t_{13}$ 时, 则

删除后序站, 三站接力场景优化后的两站接力为两种情形, 如图 11 所示.

4.2 最优接力时刻选择

在式 (3) 中, 使用简化方式, 把 $\Delta t_{\min}$ 用可以通过数值解的方法近似求出. 首先将式 (3) 变化为左项与右项的差值表达, 有

$$\begin{aligned} & [\varphi_{2,\alpha}(t_{\alpha 2}) + t_{\alpha 2}] - [\varphi_{1,\alpha}(t_{\alpha 1}) + t_{\alpha 1} + 10] \leq \varepsilon, \\ & t_{\alpha 1} \in [t_0, t_1], t_{\alpha 2} \in [t_2, t_3]; \\ & |[\theta_{2,\beta}(t_{\beta 2}) - \theta_{1,\beta}(t_{\beta 1})] - (t_{\beta 2} - t_{\beta 1} - 10)| \leq \varepsilon, \\ & t_{\beta 1} \in [t_0, t_1], t_{\beta 2} \in [t_2, t_3]. \end{aligned} \quad (5)$$

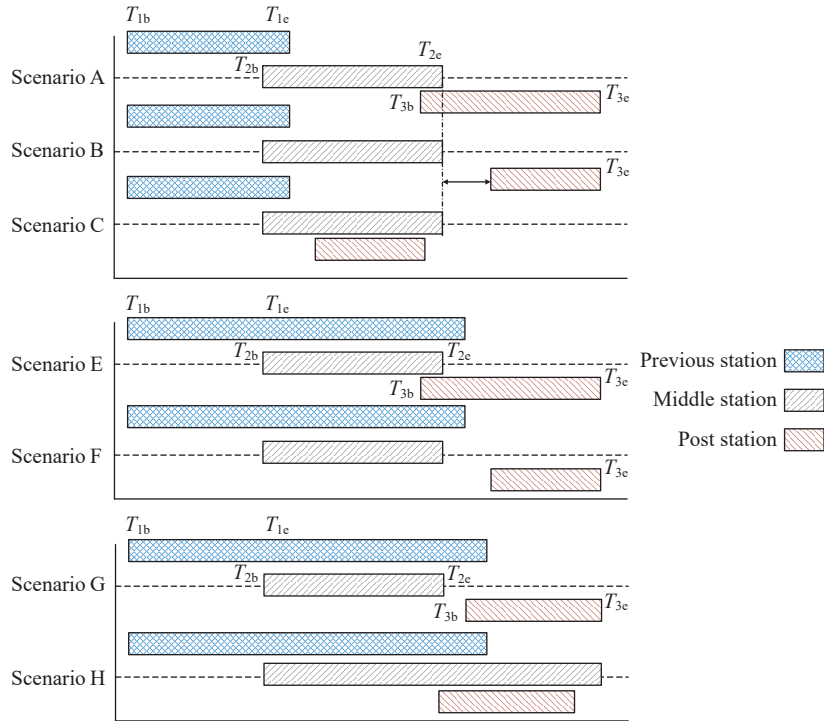


图 10 三站接力场景 (前序站与中间站、后序站重叠)

Fig. 10 Three-station relay scenario (The previous station overlap with the middle station and behind station)

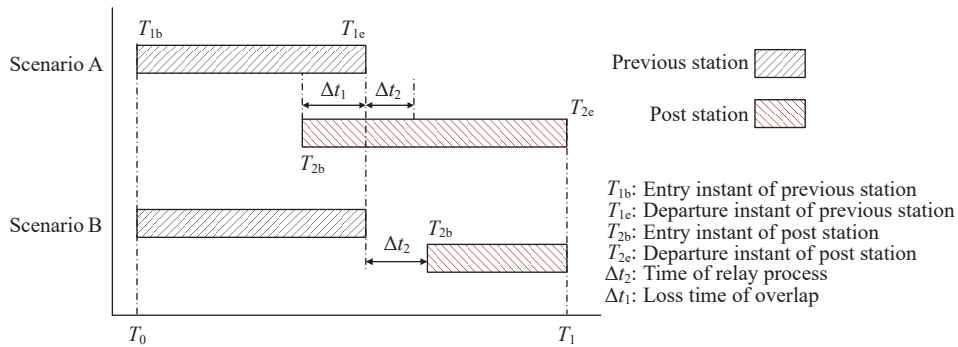


图 11 优化后数传接力场景描述

Fig. 11 Situation of the two-station relay

数值求解的过程就是找到时间量, 使得两项差值 ε 在误差允许范围内, 为了兼顾求解准确性和计算效率, 此处取 $\varepsilon = 0.8$.

对式 (5) 进行离散化处理, T 为采样周期, 可得

$$\begin{aligned} & [\varphi_{2,\alpha}(n_{\alpha 2}T) + n_{\alpha 2}T] - [\varphi_{1,\alpha}(n_{\alpha 1}T) + \\ & n_{\alpha 1}T + 10] \leq \varepsilon, \\ & |[\theta_{2,\beta}(n_{\beta 2}T) - \theta_{1,\beta}(n_{\beta 1}T)] - [n_{\beta 2}T - \\ & n_{\beta 1}T - 10]| \leq \varepsilon. \end{aligned} \quad (6)$$

通过 Matlab 搜索求解, 可以求出 $\{n_{\alpha 1}T\}$, $\{n_{\beta 1}T\}$ 以及对应的 $\{n_{\alpha 2}T\}$, $\{n_{\beta 2}T\}$, $\{\Delta t_a\}$, $\{\Delta t_b\}$, 进而判断其属于上述 a, b, c 三种情形中的哪一种, 从而找出

$\Delta t_{\min}$ 以及对应的接力开始时刻 t_{start} 和接力结束时刻 t_{stop} .

对上述方程进行数值仿真, 图 12 和图 13 给出了几种典型的两站接力场景数值仿真结果, 左列图给出了数传天线在两站重叠弧段内的运动曲线, 并标记出了最优接力时刻点; 右列图给出了不同接力时刻点数传天线从前序站到后序站的总接力时间 (接力时间由数传天线两个角度共同决定, 总是以两轴转动所需时间最长的时间点为准, 即右列图中最上方最大值为最大接力时间). 从上述仿真结果可以看到, 三亚-密云和三亚-喀什的数传接力传输的最优时刻都是在三亚

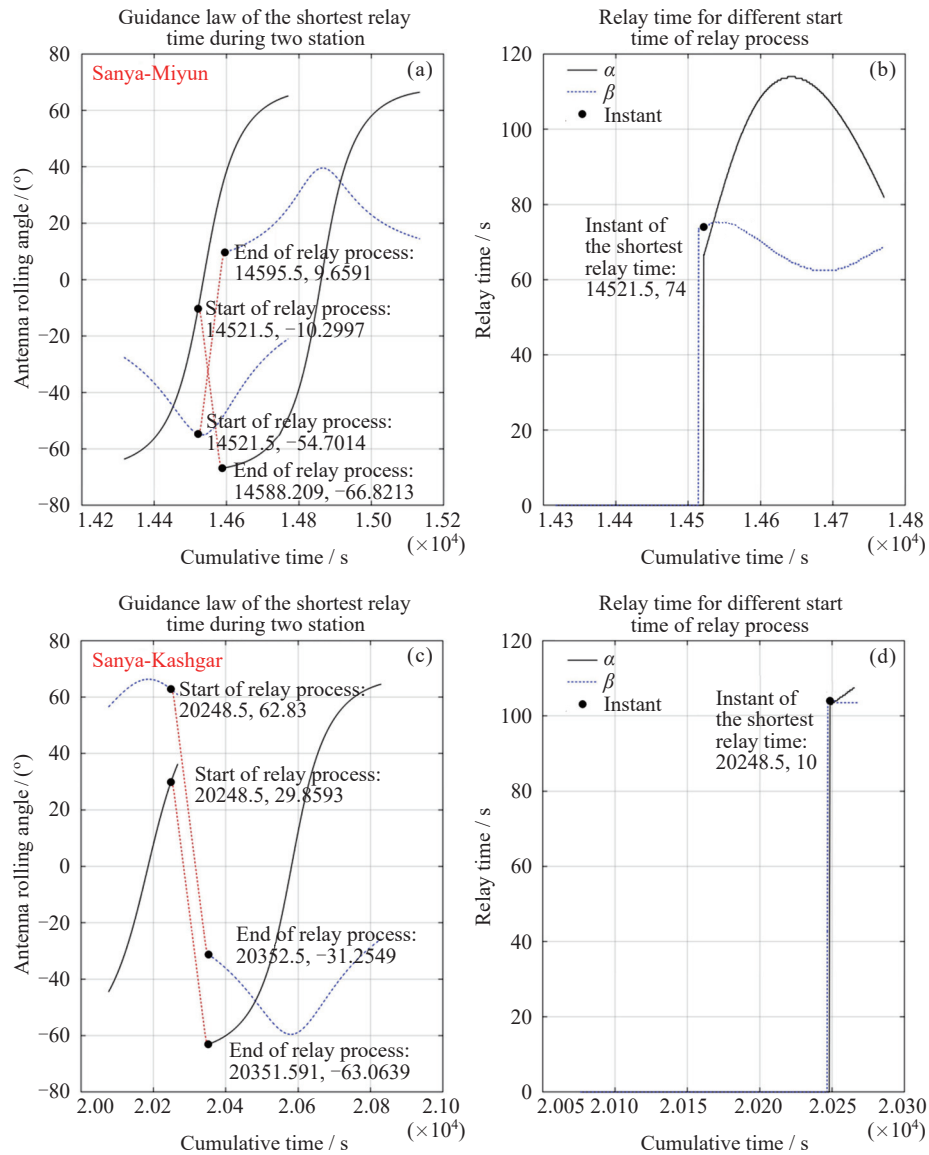


图 12 三亚与密云和喀什接力时间及数传天线导引

Fig. 12 Relay time and data antenna guidance between Sanya and Miyun, Kashgar

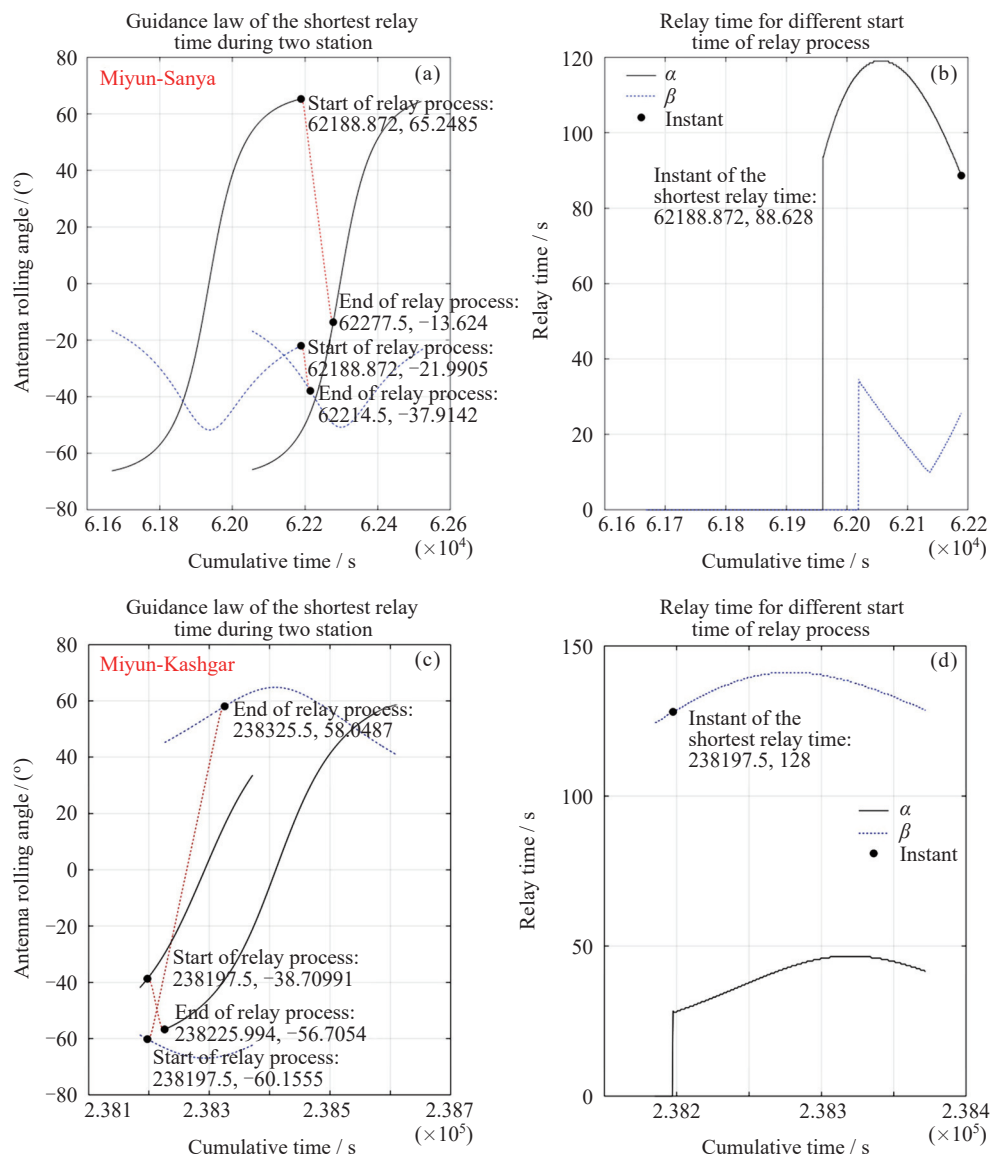


图 13 密云与三亚和喀什的接力时间和数传天线导引

Fig. 13 Relay time and data antenna guidance between Miyun and Sanya, Kashgar

站可见弧段的中部, 密云-三亚的数传接力最优时刻在密云站的结束时刻, 密云-喀什数传接力最优时刻在喀什站的开始时刻。

三亚-密云接力传输时, 其两站的可见弧段时间基本差不多, 且重叠区域占据有一半的时间, 因此在前序站时间推进到中间部分就可以和后序站进行建链, 接力最优时间也确定在这个时间, 同时可以看到, 最优接力时间为 74 s, 最大的接力时间为 114 s, 选择最优的时刻进行接力的话时间可以缩短 35%; 同样的在三亚-喀什的接力中, 卫星和地面站的可见时间规律基本和三亚-密云的接力场景相同, 只是三亚站的

可见时间变短, 两站的重叠弧度变少, 使用最优接力时刻相较于最大的时间缩短了 5% (从 108 s 降低到 102.5 s)。对于在末端进行链路切换的密云-三亚接力场景, 虽然卫星和地面站的可见弧段规律与三亚-密云的场景一样, 但是由于数传天线运动和地面站仰角变化的限制, 只有在密云站可见弧段的后半部分才有可能进行接力数传, 并计算确定其最短接力时刻在弧段结束时, 接力时间为 89 s, 相较于最大接力时间 119 s 缩短了 25%。密云-喀什数传接力场景由于后序站的可见弧段基本包含了前序弧段, 因此其在前序站进入可见时刻即可发生接力, 其最优接力时间在后序

站入境时刻, 接力时间为 128 s, 比最长接力时间 (141 s) 缩短了 9%.

5 结果与讨论

经过上述分析, 同样以一个月的卫星和三个地面站的数传可见弧段结果进行分析讨论, 使用三站合并优化、接力时刻选择的优化策略对数传接力方法进行优化比较数传接力前后数传总时间变化情况.

一个月星地数传可见弧段 (3 min 以上的弧段时间) 总数为 350 段, 后序站与前序站之间的间隔长度有 112 个弧段在 $-4\sim 2$ min 内, 其中有 10 组弧段序号连续, 即表示在一个月为数传时间中有 112 个弧段可以和前序站进行两站数传接力, 其中存在着 20 个弧段 10 组可以实现三站接力. 采用多站接力场景优化策略, 把三站接力处理为两站接力, 以一个回归周期中三亚-密云-喀什的三站接力场景为例, 其具体数据列于表 2.

可以看到密云站的可见弧段和喀什站的可见弧段重合非常严重, 因此采用接力场景优化策略后的结果为: 删除密云站可见弧段, 三亚-喀什组成两站接力场景.

表 2 三站接力信息

Table 2 Simulation result of three station relay

入站时刻 (积秒)	出站时刻 (积秒)	可见时长/ min	地面站	前序站出站与后序 站入站间隔时间/min
190690.5	191150.5	7.666	三亚	80.034
191123.1	191411.8	4.811	密云	-0.45597
191217.4	191506.9	4.824	喀什	-3.23952

对星地链路的一个月所有数值仿真结果进行分析, 对三站接力场景进行两站化优化删除合并, 得到优化后两站接力数据传输时间. 图 14 给出了一个月中优化处理合并后的 100 个接力数传时间. 可以看到, 在选择两站接力方法后, 单次数传时间最高可达到 13 min.

对于两站接力数传场景, 星上数传天线需要相应的导引转动两轴的角度, 进行数传波束和地面站的建链. 图 15 给出了 100 个接力数传弧段对应的数传天线转动角度, 横坐标表示从动轴转动角度, 纵坐标表示主动轴转动角度. 可以看到, 数传天线转动的角度变化范围较大, 并分为两个区域位于函数 $y = x$ 曲线的上下两部分. 根据公式可知, 位于上半部分的接力数传弧段, 其最短接力时间由主动轴转动角度决定, 下半部分的可优化数传弧段的最短接力时间由从动轴转动角度决定. 因此, 根据最短接力时间计算公式, 可以计算得到数传接力两站接力时间的最大值 125.35 s, 最小值为 101.57 s, 平均值为 114.52 s.

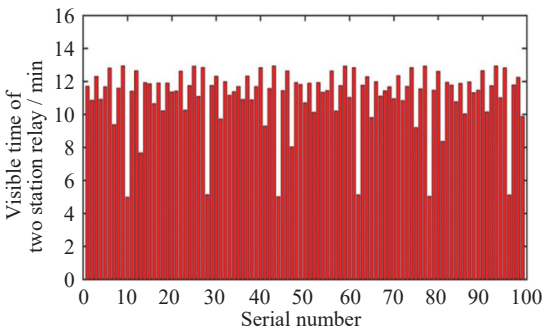


图 14 数传弧段合并后的可见时间
Fig. 14 Visible time after the data transmission arcs merged

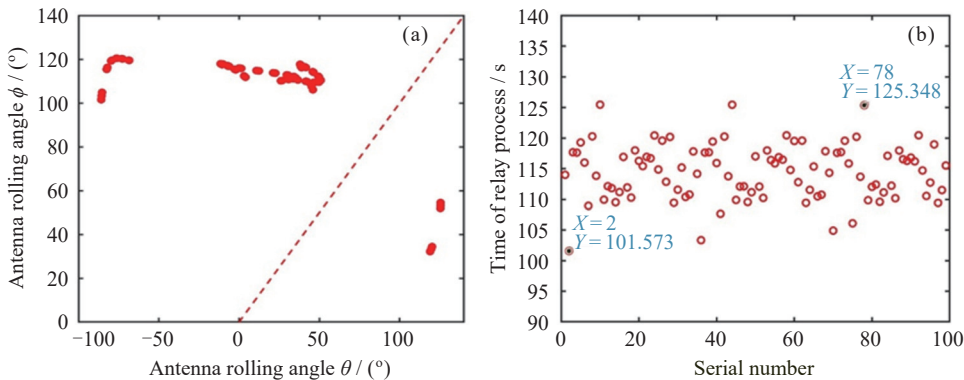


图 15 数传天线接力需要转动的角度和时间
Fig. 15 Angle and time of rotation required for the relay of the data transmission antenna

表 3 多站接力策略下的数传时间对比

Table 3 Comparison of data transmission time of the multi-station relay strategy

名称	平均值	最大值	最小值
接力后每天通信时间/min	66.78	72.56	56.37
独立站每次可通信时间/min	7.61	9.13	5.92
接力站每次可通信时间/min	11.12	11.81	9.61
独立站每天可见次数	4.375	5	2
接力站每天可见次数	6.19	8	6

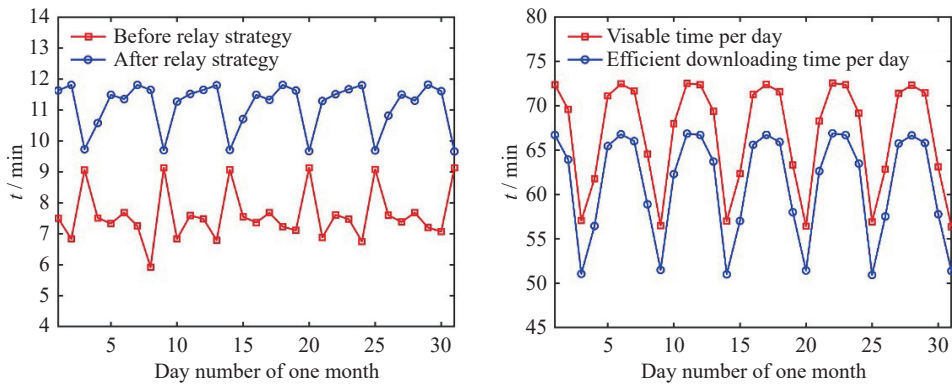


图 16 多站接力前后数传时间对比

Fig. 16 Comparison of the number transmission time before and after the multi-station relay

在使用多站接力场景优化以及最优接力时间选择后,一个月进行的两站数传接力传输信息如表3所示. 可以看到,使用本文构建的优化策略的数传接力传输方法相较于单站传输,传输时间和通信次数都有了显著增加.

表3和图16给出了一个月时间内使用数传接力方法的统计信息. 可以看到在使用两站接力策略和数传接力时间优化方法后,每天数传可见时间最高为72.5 min. 对于每一次数传可用弧段,未采用数传接力方法时,其每次可用时间的平均值为7.61 min. 当采用数传接力方法后,每次可数传时间提升为11.12 min,提高幅度达46.1%.

6 结论

针对低轨遥感卫星在地面数传站固定传输且调度资源有限的问题,在卫星数传系统中设计了一种单星双站接力的数据传输时间方法,创新地提出了多站接力场景优化方法和接力时刻最优选择方法,采用数传两站接力模式,根据每天实际的星地可见弧段,安

排两站进行配对接力,提升平均每天通信时间. 根据设定的典型场景进行仿真,计算结果表明,数传可见弧段中可接力优化的弧段占比为32%,接力站的平均可通信时间相对独立站可通信时间提升了46.1%,实现了机械天线双站快速最优接力,充分利用有限的数传站资源,有效保障了每天大数据量载荷图像数据的快速及时下传.

参考文献

- [1] HARRIS A, VALADE T, TEIL T, *et al.* Generation of spacecraft operations procedures using deep reinforcement learning[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2022, **59**(2): 611-626
- [2] HE Qi'en, LI Feng, ZHONG Xing. A review of the application of multi-objective algorithms in satellite regional coverage scheduling and data transmission planning[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023, **38**(4): 783-793 (何奇恩, 李峰, 钟兴. 多目标算法在卫星区域覆盖调度及数传规划上的应用综述 [J]. *遥感技术与应用*, 2023, **38**(4): 783-793)
- [3] LIU Zhenxing. Research on Integrated Avionics for Remote Sensing Satellite[D]. Hefei: University of Science and

- Technology of China, 2021 (刘振星. 面向遥感卫星的综合电子系统研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021)
- [4] ZHANG J R, ZHU S B, BAI H F, *et al.* Optimization strategy to solve transmission interruption caused by satellite-ground link switching[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 32975-32988
- [5] CHEN Yu, ZHANG Yong, CHEN Shi. Adaptive weighted clustering algorithm for large-scale satellite cluster network[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2021, **41**(11): 1188-1192 (陈宇, 张勇, 陈实. 大规模卫星集群网络自适应加权分簇算法 [J]. 北京理工大学学报, 2021, **41**(11): 1188-1192)
- [6] SPANGELO S, CUTLER J, GILSON K, *et al.* Optimization-based scheduling for the single-satellite, multi-ground station communication problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, **57**: 1-16
- [7] ZENG Qilin, YU Xizheng, XIONG Weiming. Design of data transmission antenna beam angles and directions for solar observatory satellite[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2019, **41**(6): 135-142 (曾麒麟, 于锡峥, 熊蔚明. 太阳观测卫星的数传天线波束及其指向设计 [J]. 国防科技大学学报, 2019, **41**(6): 135-142)
- [8] CHANG Fei. Research on Optimization Model and Algorithm for Ground Station Data Transmission Resources Allocation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010 (常飞. 卫星地面站数传资源配置优化模型与算法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2010)
- [9] WANG Changhong, GAO Fei, DU Wei. Study on predistortion algorithm of spaceborne high rate modulator[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2020, **40**(9): 988-993 (王长红, 高飞, 杜伟. 基于星载高速调制器的预失真算法研究 [J]. 北京理工大学学报, 2020, **40**(9): 988-993)
- [10] ZHANG Xinyu, YANG Jiasen, XU Cong, *et al.* High-performance pre-processing method for transmission data based on CPU-GPU collaboration[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2023, **40**(4): 38-45 (张鑫宇, 杨甲森, 徐聪, 等. CPU-GPU 协同高性能卫星数传预处理方法 [J]. 上海航天 (中英文), 2023, **40**(4): 38-45)

作者简介



陆召严 男, 1989 年 12 月出生于江苏省, 现为中国科学院微小卫星创新研究院助理研究员, 卫星总体主任设计师, 主要研究方向为超低轨飞行关键技术、飞行器总体设计、空间操控关键技术。

E-mail: luzy@microsat.ac.cn



付碧红 (通信作者) 女, 1975 年 8 月出生于陕西省, 现为中国科学院微小卫星创新研究院正高级工程师, 硕士生导师, 卫星总师, 主要研究方向为航天器结构设计和卫星总体设计。

E-mail: fubh@microsat.com