

卫星网络测控资源鲁棒调度方法

纪翔, 刘润滋, 要趁红, 陈剑豪, 慕桃
(西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 卫星网络规模的持续增长为测控资源的有效调度带来了巨大挑战。受到天气等因素的影响, 星地链路性能具有较强的不确定性。为了兼顾资源利用率与任务可靠性, 提出一种鲁棒的测控资源调度方法。该方法可基于预测得到的星地链路信道状态分布与规划周期内的任务分布情况为测控任务安排传输窗口的开始时间与持续时长, 并通过反向迭代的方式对资源分配方案进行优化从而最大化任务期望收益值。实验结果表明, 与传统的非鲁棒调度方法相比, 所提调度方法在不同信道分布下都能取得良好的任务收益, 实现资源利用率与任务可靠性的有效提高。

关键词: 航天测控; 资源调度; 鲁棒调度; 卫星网络

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023003

Robust Scheduling Method of TT&C Resource in Satellite Network

Ji Xiang, Liu Runzi, Yao Chenhong, Chen Jianhao, Mu Tao

School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

Abstract: The continuous growth of satellite network scale brings great challenges to the effective scheduling of TT&C resources. Affected by weather and other factors, the performance of the satellite-ground link is of high uncertainty. In order to take into account both resource utilization and task reliability, a robust scheduling method of TT&C resources was proposed. This method could arrange the start time and duration of the transmission window for TT&C tasks by the predicted channel state distribution of satellite-ground link and the task distribution in the planning period, and optimized the resource allocation scheme by backward iteration to maximize the expected profit of the tasks. The experimental results showed that compared with the traditional non-robust scheduling method, the scheduling method proposed could obtain more task profit under different channel distributions and achieve the improvement of both resource utilization and task reliability.

Keywords: aerospace TT&C, resource scheduling, robust scheduling, satellite network

0 引言

我国在轨卫星数目不断增长, 大型低轨卫星星座的研发与部署为卫星网络的运营管理带来了极大的挑战^[1-2]。测控任务的需求迅速增加, 为有限的地面测控设备带来了巨大的压力, 如何提升测控资源利用率成为了一个亟待解决的问题。

由于受到天气等的影响, 星地链路信道状态有较强

的不确定性, 为了保障测控任务执行的可靠性, 现有测控资源调度方法大多为其分配较长的时间窗口, 例如参考文献[3-6]中将卫星与测控站之间完整的可见窗口(可见弧段)分配给测控任务。然而, 对于大多数未遭遇极端信道条件的任务, 这种任务调度方式会对地面测控资源造成极大的浪费。针对这一问题, 部分工作根据测控需求与链路速率为测控任务分配固定长度的测控窗口^[7-8]。尽管上述

收稿日期: 2022-10-14; **修回日期:** 2023-01-29

通信作者: 刘润滋, rzliu@xauat.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61701365); 陕西省重点研发计划(No.2021GY-066); 陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2023-JC-YB-566); 陕西省高校科协青年人才托举计划(No.20200112); 陕西省博士后科研资助计划(No.2018BSHEDZZ47)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61701365), Key Research and Development Program in Shaanxi Province of China(No. 2021GY-066), Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province(No. 2023-JC-YB-566), Young Talent fund of University Association for Science and Technology in Shaanxi, China(No. 20200112), Postdoctoral Foundation in Shaanxi Province of China(No. 2018BSHEDZZ47)

工作可以有效提升测控资源效率,由于其未考虑测控链路信道的不确定性,在信道条件不佳时易导致任务执行失败,大大影响了任务可靠性。

可变编码调制、自适应编码调制等技术已经在卫星通信中得到了广泛的应用^[9-10]。任务可以根据信道状态调整星地链路传输速率,进而调整传输窗口长度。因此,为了兼顾测控资源使用效率与任务可靠性,需对基于非固定窗口的鲁棒资源调度方法展开研究。同时,由于天气的可预测性,星地链路间的信道状态分布也可以预测,为资源调度方案的优化提供了基础。尽管传输资源的鲁棒调度在地面无线网络中得到了广泛的研究^[11-12],但其在卫星网络中的研究仍十分有限。参考文献[13-14]对固定窗口的鲁棒调度进行了研究,但没有考虑信道状态分布和链路速率自适应调度的作用。

1 系统模型

1.1 网络场景

考虑由多颗卫星和一个测控站组成的网络场景,如图1所示,用 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n, \dots\}$ ($1 \leq n \leq |S|$)表示卫星集合, s_n 代表第 n 颗卫星,用 g 表示测控站。卫星沿轨道运动与测控站发生相对位移会产生可见窗口,在可见窗口中卫星同测控站能够进行链路通信。用 $TW=\{tw_n^1, tw_n^2, \dots, tw_n^z, \dots\}$ ($1 \leq n \leq |S|$, $1 \leq z \leq |TW|$)表示可见时间窗口集合, tw_n^z 代表卫星 s_n 与测控站 g 的第 z 个窗口,且可见时间窗口 $tw_n^z=[tws_n^z, twe_n^z]$, tws_n^z 和 twe_n^z 分别代表时间窗口 tw_n^z 的开始时间和结束时间,且任意 $tw_n^{z_1}$ 、 $tw_n^{z_2} \in TW$ ($z_1 < z_2$)满足 $tws_n^{z_1} < tws_n^{z_2}$ 。

假定卫星和测控站均仅有一套收发设备用于完成链路通信,因此测控站同一时间仅能同一颗卫星进行链路通信。信道状态分布主要受天气影响,在调度周

期内测控站的信道状态分布在任务规划前可预测。本文根据信道衰减情况将星地链路信道状态划分为 K 类,测控站 g 在调度周期内出现第 k 种信道状态的概率表示

为 p_k ($\sum_{k=1}^K p_k = 1$)。对于不同的信道状态,自适应编码调制技术能够依照信道状态的反馈结果获取合适的传输速率,在理想的信道状态下,选取较高阶调制方式与较高的编码速率,反之在较差信道状态下,选取有良好纠错能力的编码调制方式^[19],以此提高信道的利用效率。基于上述考虑,假设场景中任意信道状态 k_1, k_2 ($1 \leq k_1 < k_2 \leq K$),其满足信道状态 k_1 优于信道状态 k_2 ,且传输同样的数据量时采用信道状态 k_1 所用的传输速率快于采用信道状态 k_2 所用的传输速率,采用信道状态 k_1 所用的传输时长短于采用信道状态 k_2 所用的传输时长。因此,对于任意信道状态 k_1, k_2 ($1 \leq k_1 < k_2 \leq K$),都满足在信道状态 k_1 情况下,以信道状态 k_2 对应的传输速率传输数据可以在信道状态 k_2 需要的传输时长内完成,反之在信道状态 k_2 情况下,以信道状态 k_1 对应的传输速率传输数据无法在信道状态 k_2 需要的传输时长内完成。

1.2 问题描述与分析

调度周期内的测控任务需求集合用 $M=\{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots\}$ ($1 \leq i \leq |M|$)表示,每个任务 m_i 有以下属性: $m_i=[s_i, \{el_i^k\}_{k=1 \leq k \leq K}, v_i]$,其中 s_i 表示任务 m_i 需要测控的卫星, el_i^k 表示任务 m_i 在信道条件 k 下执行所需的时间长度, $v_i \in (0, 1)$ 表示任务 m_i 成功执行可获得的收益。

传统测控资源调度方法中,不考虑任务执行失败的可能性,任务调度成功即认为该任务可以被成功执行。不同于传统的测控资源调度方法,本文考虑了任务实际执行过程中因信道条件恶劣而失败的可能性。因此,基于信道不确定性的测控任务调度的目标是在调度周期内为测控任务分配可行测控窗口,使得调度结果执行时的期望收益最大化。

本文提出一种鲁棒资源调度方法,其根据信道的状态分布情况、任务的需求和可见窗口约束,以最大化收益期望值为目标,使用反向迭代的方式编排任务,并根据当前的信道状态选取可执行的任务,达到收益最大化。具体而言,预测获取未来的信道状态分布,考虑任务在不同信道状态下采用合适的传输速率,并将任务执行时间窗口间的相互影响考虑在内,以最大化收益期望值为目标进行任务编排。由于信道状态有较强的不确定性,在执行任务调度列表时可根据信道状态选取合适的可行测控窗口执行。由于最大限度地考虑任务的执行时长和信道的不确定性,任务调度获得的收益较好,资源

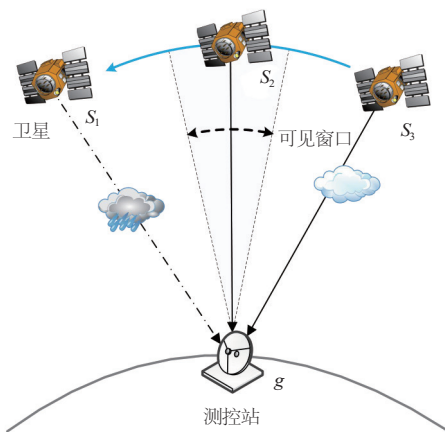


图1 网络场景

的利用率较高。

在上述调度方法中，考虑到信道状态不确定性影响导致任务执行失败的概率，不同卫星上任务的执行时间窗口可以重叠。在最后执行时为保证当前任务成功执行，需要将后面可能中断其执行的任务移除。若信道状态允许当前任务成功执行，则将后面会中断其执行的任务从调度表中移除；若信道状态无法使当前任务成功执行，则将当前任务从调度表中移除。

2 问题建模

2.1 可行测控窗口

测控资源调度的本质即为地面测控设备的时间窗口分配问题。由于信道条件的多样性和可见时间窗口的限制，每个测控任务可能有多个长度不一、开始时间不同的测控窗口可供选择。因此，为了简化调度方法的数学模型，本小节首先定义任务的可行测控窗口。

对于任务 m_i ，其所需执行时长 el_i^k 是根据信道条件 $k(1 \leq k \leq K)$ 得到的，为了将任务安排至可见时间窗口并成功执行，考虑到资源利用情况需要为其分配 $1 \sim K$ 个可见时间窗口以应对 K 种信道条件下不同的任务执行时间，而任务 m_i 的可见时间窗口集合为 $\{tw_{m_i}^k\}_{1 \leq k \leq K}$ 。由此，根据不同信道条件下任务所需执行时间将任务安排至不同的可见时间窗口，可以用可行测控窗口 ow_i 描述给任务分配的可见时间窗口，由任务 m_i 的可见时间窗口集合可知，对于任务 m_i 有 K 个可行测控窗口。

对于每个可行测控窗口 ow_i ，其具有以下属性： $ow_i = [m_{\varepsilon(i)}, s_{\varepsilon(i)}, tw_n^{\varepsilon(i)}, k_i, b_i, e_i, v_{\varepsilon(i)}, \alpha_i]$ ，分别为可行测控窗口 ow_i 对应的任务 $m_{\varepsilon(i)}$ ， $\varepsilon(i)$ 为 ow_i 对应任务 m_i 的序号 i ，执行任务的卫星 $s_{\varepsilon(i)}$ ，可行测控窗口 ow_i 的可见时间窗口 $tw_n^{\varepsilon(i)}$ ，可行测控窗口 ow_i 对应任务合适的信道序号 k_i ，可行测控窗口 ow_i 的开始时间 b_i 与结束时间 e_i （ $e_i = b_i + el_{\varepsilon(i)}^{k_i}$ ）， $[b_i, e_i]$ 代表任务 $m_{\varepsilon(i)}$ 的执行时间窗口，可行测控窗口 ow_i 对应任务的收益 $v_{\varepsilon(i)}$ ，可行测控窗口 ow_i 对应任务失败概率 $\alpha_i \in (0, 1)$ 。在此，可行测控窗口 ow_i 由于信道状态不确定性导致任务 $m_{\varepsilon(i)}$ 执行失败的概率用可行测控窗口 ow_i 内对应任务执行失败的概率 α_i 表示。

任务集合 M 中的所有任务对应的可行测控窗口可用可行测控窗口集合 $OW = \{ow_1, ow_2, \dots, ow_l, \dots\}$ （ $1 \leq l \leq |OW|$ ）表示，且满足 $|OW| = K|M|$ 。不失一般性，假定 OW 是有序集合，其中的可行测控窗口以开始时间升序的顺序排列，即 $\forall ow_{l_1}, ow_{l_2} \in OW (l_1 \neq l_2)$ ，若 $l_1 < l_2$ ，则有 $b_{l_1} < b_{l_2}$ 。

可行测控窗口最终需要在对应的可见时间窗口内使卫星与测控站完成通信链路数据传输，即在可见时间窗

口 $tw_n^{\varepsilon(i)}$ 中卫星 $s_{\varepsilon(i)}$ 同测控站 g 建立通信链路并执行可行测控窗口 ow_i 对应的任务，因此，可行测控窗口 ow_i 的执行时间 $[b_i, e_i]$ 需要在可见时间窗口 $tw_n^{\varepsilon(i)}$ 中，即 $tw_n^{\varepsilon(i)} \leq b_i < e_i \leq tw_n^{\varepsilon(i)}$ 。

根据传输速率与信道状态分布可计算可行测控窗口 ow_i 对应任务执行失败的概率 α_i ，考虑到上文中场景所提信道状态的特点，由于低传输速率可在较优的信道状态下完成传输，故可行测控窗口 ow_i 成功执行对应任务的概率可表示为测控站的 $1 \sim k$ 种信道状态出现的概率之和，则 α_i 可表示为 $\alpha_i = \left(1 - \sum_{k=1}^K p_k\right)$ 。

定义：（可行测控窗口冲突关系）在同一时间，因为测控站仅能同一颗卫星进行链路通信，当不同卫星上的可行测控窗口的执行时间窗口重叠时，任务无法全部执行，即存在冲突关系；对于同一任务而言，其相关的可行测控窗口被调度后最终只能执行一个可行测控窗口，故同一任务的不同可行测控窗口也存在冲突关系。

对于任意可行测控窗口 ow_{l_1} 和 ow_{l_2} （ $o_{l_1}, o_{l_2} \in OW$ ， $l_1 \neq l_2$ ），若具备以下条件，则其存在冲突，用 $\phi(ow_{l_1}, ow_{l_2}) = 1$ 表示， $\phi(ow_{l_1}, ow_{l_2}) = 1 \Leftrightarrow \left\{ \left\{ [b_{l_1}, e_{l_1}] \cap [b_{l_2}, e_{l_2}] \neq \emptyset \right\} \wedge \left\{ s_{\varepsilon(l_1)} \neq s_{\varepsilon(l_2)} \right\} \right\} \vee \left\{ \varepsilon(l_1) = \varepsilon(l_2) \right\} \wedge \left\{ ow_{l_1}, ow_{l_2} \in OW \right\}$ ；反之，若具备以下条件，则其不存在冲突，用 $\phi(ow_{l_1}, ow_{l_2}) = 0$ 表示， $\phi(ow_{l_1}, ow_{l_2}) = 0 \Leftrightarrow \left\{ \left\{ [b_{l_1}, e_{l_1}] \cap [b_{l_2}, e_{l_2}] = \emptyset \right\} \wedge \left\{ \varepsilon(l_1) \neq \varepsilon(l_2) \right\} \right\} \wedge \left\{ ow_{l_1}, ow_{l_2} \in OW \right\}$ 。

2.2 期望收益优化模型

基于可行测控窗口的定义，信道不确定性的测控资源鲁棒调度问题可以转化为从可行测控窗口集合 OW 中选择一个子集 OW_{selected} ，使得按照子集中的可行测控窗口分配给对应任务指定可行测控窗口后，执行结果获得的期望收益最大化的问题。

在信道状态不确定条件下测控资源调度问题的数学模型中，为了描述可行测控窗口是否被调度，定义二元决策变量 $x_m^i \in \{0, 1\}$ ， $x_m^i = 1$ 表示可行测控窗口 ow_i 对应的任务在可见时间窗口 tw_n^i 中被成功调度， $x_m^i = 0$ 则表示可行测控窗口 ow_i 对应的任务在可见时间窗口 tw_n^i 中调度失败，即

$$x_m^i = \begin{cases} 1, & ow_i \text{ 对应任务在窗口 } tw_n^i \text{ 中成功调度} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

本文使用 $\|OW\|_{\mathbb{E}}$ 来表示目标集合 OW 的期望收益值，使用 $\mathbb{P}(ow \in OW)$ 表示可行测控窗口 ow 在目标集合 OW 中的概率，则信道不确定条件下卫星测控任务鲁棒优化问题 P 可表示为

$$\max \left\| \text{OW}_{\text{selected}} \right\|_{\mathbb{B}} = \sum_{l=1}^{|\text{OW}|} \sum_{n=1}^{|\mathcal{S}|} \sum_{z=1}^{|\text{TW}|} x_{ln}^z \cdot \omega_l \cdot \mathbb{P}(\text{ow}_l \in \text{OW}_{\text{executed}}) \quad (2)$$

s. t.

$$\sum_{l=1}^{|\text{OW}|} \sum_{n=1}^{|\mathcal{S}|} \sum_{z=1}^{|\text{TW}|} x_{ln}^z \leq 1, \quad \forall \text{ow}_l \in \text{OW}, \forall s_n \in \mathcal{S} \quad (3)$$

$$\text{tw} s_n^z \leq b_l < e_l \leq \text{tw} e_n^z, \quad \forall x_{ln}^z = 1 \quad (4)$$

$$x_{ln}^z \in \{0, 1\}, \quad \forall \text{ow}_l \in \text{OW}, \forall \text{tw}_{ni}^z \in \text{TW} \quad (5)$$

目标函数(2)表示在信道状态不确定条件下, 最大化可行测控窗口调度集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 的期望收益值, 其中, $\mathbb{P}(\text{ow}_l \in \text{OW}_{\text{executed}})$ 表示可行测控窗口 ow_l 在最终执行窗口集合 $\text{OW}_{\text{executed}}$ 中的概率。约束(3)为唯一性约束, 表示每个可行测控窗口最多可以指定一个可见时间窗口, 并且其对应任务最多被执行一次; 约束(4)为时间窗口约束, 确保每个可行测控窗口对应任务都在分配的可见时间窗口内完成测控; 约束(5)为二元性约束, 表示 x_{ln}^z 的取值只能为0或1。

3 卫星测控资源鲁棒调度方法设计

由于优化问题 P 已被证明是一个NP难问题, 为了在多项式时间内求解调度集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$, 本文采用后向迭代方式设计了一种可行测控窗口选择策略。其基本思路为在每一轮迭代过程中, 基于上一轮得到的中间结果 (即调度窗口集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^l$) 构建本轮的调度窗口集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^{l+1}$ 。其中 $\text{OW}_{\text{selected}}^l$ 为被选入集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 的开始时间晚于 ow_{l-1} ($l \neq 1$) 的开始时间 b_{l-1} 的窗口集合。本节首先介绍了中间结果 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 的期望收益值的计算方法, 随后提出了卫星网络测控资源鲁棒调度算法。

3.1 期望收益计算

对于后向迭代中每次迭代得到的调度窗口集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^l$, 满足可行测控窗口调度集合收益期望 $\left\| \text{OW}_{\text{selected}}^l \right\|_{\mathbb{B}} \geq \left\| \text{OW}_{\text{selected}}^{l+1} \right\|_{\mathbb{B}}$, 期望收益 $\left\| \text{OW}_{\text{selected}}^l \right\|_{\mathbb{B}}$ 表示为

$$\left\| \text{OW}_{\text{selected}}^l \right\|_{\mathbb{B}} = \sum_{j=l}^{|\text{OW}|-l} v_j \cdot \mathbb{P}(\text{ow}_j \in \text{OW}_{\text{executed}}) \quad (6)$$

根据任务冲突定义, $\mathbb{P}(\text{ow}_j \in \text{OW}_{\text{executed}})$ 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\text{ow}_j \in \text{OW}_{\text{executed}}) &= \\ (1 - \alpha_j) \cdot \mathbb{P}(\nexists \text{ow}_{j_1} \in \text{OW}_{\text{executed}} : \phi(\text{ow}_j, \text{ow}_{j_1}) = 1) \end{aligned} \quad (7)$$

由此, 式(6)可表示为

$$\begin{aligned} \left\| \text{OW}_{\text{selected}}^l \right\|_{\mathbb{B}} &= \\ \sum_{j=l}^{|\text{OW}|-l} (1 - \alpha_j) \cdot v_j \cdot \mathbb{P}(\nexists \text{ow}_{j_1} \in \text{OW}_{\text{executed}} : \phi(\text{ow}_j, \text{ow}_{j_1}) = 1) \end{aligned} \quad (8)$$

C_l ($C_l \subset \text{OW}_{\text{selected}}^l$) 为 ow_l 后-非冲突可行测控窗口集合, 集合 C_l 中所有可行测控窗口均满足开始时间晚于可行测控窗口 ow_l 的开始时间 b_l , 且集合 C_l 中的可行测控窗口与 ow_l 不存在冲突关系, 即

$$\begin{aligned} \forall \text{ow}_l \in \text{OW}, \exists C_l \subset \text{OW}_{\text{selected}}^l : \forall \text{ow}_c \in \text{OW}_{\text{selected}}^l, \\ \text{ow}_c \in C_l \Leftrightarrow e_l < b(\text{ow}_c) \wedge \phi(\text{ow}_l, \text{ow}_c) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

根据式(8)和 ow_l 后-非冲突可行测控窗口集合 C_l , 调度窗口集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^l$ 的期望收益可表示为

$$\begin{aligned} \left\| \text{OW}_{\text{selected}}^l \right\|_{\mathbb{B}} &= \\ (1 - \alpha_l) \cdot \left(v_l + \left\| C_l \cap \text{OW}_{\text{selected}}^{l+1} \right\|_{\mathbb{B}} \right) + \alpha_l \cdot \left\| \text{OW}_{\text{selected}}^{l+1} \right\|_{\mathbb{B}} \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中, 第一部分为可行测控窗口 ow_l 任务执行成功的概率乘以执行成功后的整体收益期望值, 收益为可行测控窗口 ow_l 对应任务的收益 v_l 与可行测控窗口 ow_l 后非冲突可行测控窗口对应任务的收益期望值 $\left\| C_l \cap \text{OW}_{\text{selected}}^{l+1} \right\|_{\mathbb{B}}$ 之和; 第二部分为可行测控窗口 ow_l 任务执行失败的概率乘以执行失败后的整体收益, 其收益为集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^{l+1}$ 的收益期望值。

3.2 鲁棒调度算法

本文鲁棒调度优化问题的目标在于在给定的范围集合 OW 内寻找出具有最大期望收益的鲁棒调度集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$, 且有 $\text{OW}_{\text{selected}} \subseteq \text{OW}, \nexists \text{OW}_{\text{sub}} \subseteq \text{OW} : \left\| \text{OW}_{\text{sub}} \right\|_{\mathbb{B}} \geq \left\| \text{OW}_{\text{selected}} \right\|_{\mathbb{B}}$ 。相比较而言, 传统的卫星资源调度问题要求调度集合内的任务所使用的可见时间窗口不能重叠, 而本文中的鲁棒调度问题不局限于调度集合中任务所使用的可见时间窗口的时间窗口冲突约束, 以便在迭代计算过程中得到可能出现的其他高期望收益调度集合。

本文所提测控资源鲁棒调度方法的目标是最大化调度窗口集合的收益期望值 $\left\| \text{OW}_{\text{selected}}^l \right\|_{\mathbb{B}}$, 需同时保留整体期望收益高的可行测控窗口, 当前调度窗口集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^l$ 的收益期望值大于或等于调度窗口集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^{l+1}$ 的收益期望值时, 令可行测控窗口 ow_l 添加至集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^{l+1}$ 成为新集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^l$; 否则调度窗口集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^l$ 为原有调度窗口集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^{l+1}$,

$$\text{OW}_{\text{selected}}^l = \begin{cases} \{\text{ow}_l\} \cup \text{OW}_{\text{selected}}^{l+1}, & \left\| \text{OW}_{\text{selected}}^l \right\|_{\mathbb{B}} \geq \left\| \text{OW}_{\text{selected}}^{l+1} \right\|_{\mathbb{B}} \\ \text{OW}_{\text{selected}}^{l+1}, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

选取调度窗口集合中较高的收益期望值作为新调度窗口集合的收益期望值

$$\left\| \text{OW}_{\text{selected}}^l \right\|_{\mathbb{B}} = \max \left\{ \left\| \text{OW}_{\text{selected}}^l \right\|_{\mathbb{B}}, \left\| \text{OW}_{\text{selected}}^{l+1} \right\|_{\mathbb{B}} \right\} \quad (12)$$

算法1给出了测控资源鲁棒调度算法伪代码，其中，步骤3: $\text{Sort}(\text{OW})$ 为对可行测控窗口集合 OW 进行排序。步骤4: 为可行测控窗口分配可见时间窗口。步骤5-13: 对集合 $\text{OW}_{\text{matched}}$ 中的可行测控窗口进行反向迭代计算，得到集合 $\text{OW}_{\text{matched}}$ 中的可行测控窗口对应任务的期望收益，按照规则对集合 $\text{OW}_{\text{matched}}$ 中的可行测控窗口进行保留与移除，并得到迭代结果 $\text{OW}_{\text{selected}}^l$ 与 $\|\text{OW}_{\text{selected}}^l\|_{\mathbb{R}}$ 。其中，步骤7-9: 前移可行测控窗口 ow_l ，其开始时间早于可行测控窗口 ow_{l-1} ，交换 ow_l 与 ow_{l-1} ，并重新计算当前调度窗口集合 $\text{OW}_{\text{selected}}^l$ 和当前调度窗口集合的期望收益 $\|\text{OW}_{\text{selected}}^l\|_{\mathbb{R}}$ ；步骤14: 判断当前是否还有空闲的可见时间窗口以终止while循环，若无可用可见时间窗口，则终止while循环；步骤15: 更新初始调度集合 OW_{new} ；步骤17-18: 最终得到并输出调度集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 。

算法1 测控资源鲁棒调度算法

输入：可行测控窗口集合 OW

输出：调度集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$

```

1: 初始化:  $\text{OW}_{\text{new}} \leftarrow \text{OW}, \text{OW}_{\text{selected}} \leftarrow \emptyset, b_l \leftarrow 0, e_l$ 
    $\leftarrow e_l^{k_l}, \text{OW}_{\text{selected}}^l \leftarrow \emptyset$ 
2: while  $\text{OW}_{\text{new}} \neq \emptyset$  do
3:    $\text{OW}_{\text{new}} \leftarrow \text{Sort}(\text{OW}_{\text{new}})$ 
4:    $\text{OW}_{\text{matched}} \leftarrow \text{OW}_{\text{selected}}^l \cup \text{Match}(\text{OW}_{\text{new}})$ 
5:   for  $l = |\text{OW}|$  to 1
6:     if  $\text{ow}_l \in \text{OW}_{\text{matched}}$  then
7:       迭代更新  $[b_l, e_l] \leftarrow [b_l - \tau, e_l - \tau]$  直到
          $\text{tws}_n^{\phi(l)} > b_l$ 
8:       根据式 (11) 和式 (12) 计算
          $\text{OW}_{\text{selected}}^l$  和  $\|\text{OW}_{\text{selected}}^l\|_{\mathbb{R}}$ 
9:       更新  $[b_l, e_l]$ 
10:    else
11:       $\text{OW}_{\text{selected}}^l \leftarrow \text{OW}_{\text{selected}}^{l+1}$ ,
         $\|\text{OW}_{\text{selected}}^l\|_{\mathbb{R}} \leftarrow \|\text{OW}_{\text{selected}}^{l+1}\|_{\mathbb{R}}$ 
12:    end if
13:  end for
14:  若无可用可见时间窗口，则 break
15:   $\text{OW}_{\text{new}} \leftarrow \text{OW} - \text{OW}_{\text{selected}}^l$ 
16: end while
17:  $\text{OW}_{\text{selected}} \leftarrow \text{OW}_{\text{selected}}^1$ 
18: return  $\text{OW}_{\text{selected}}$ 

```

在算法1中有以下几个方法与参数及运算，其中 $\text{Sort}(\text{OW}_{\text{new}})$ 是初始可行测控窗口进行排序，根据执行时长对集合 OW 中的可行测控窗口进行降序排序，再将完成时长小于平均完成时长的可行测控窗口按可行测控窗口对应的任务平均收益 $v_l/(e_l - b_l)$ 进行降序

排序。 $\text{Match}(\text{OW}_{\text{new}})$ 是对可行测控窗口匹配可见时间窗口：寻找可行测控窗口所属卫星满足 $\text{twe}_n^z - \text{tws}_n^z \geq e_l - b_l$ 的空闲可见时间窗口，计算冲突窗口重叠部分与当前时间窗口的占比 prob_z ，以概率 prob_z 分配给可行测控窗口此窗口。 τ 为执行时间窗口前移长度，是由可行测控窗口的平均执行时间与分配时间窗口时间的平均值得到的，可行测控窗口平均执行时间为 $\text{time}_{\text{ow}} = \sum_{\text{ow}_l \in \text{OW}} (e_l - b_l) / |\text{OW}|$ ，分配时间窗口时间平均值为 $\text{time}_{\text{tw}} = \sum_{\text{tw}_n^z \in \text{TW}} (\text{twe}_n^z - \text{tws}_n^z) / |\text{OW}|$ 。

3.3 执行阶段

在执行完测控资源鲁棒调度算法得到调度集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 后，按照开始时间依次执行集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 中的可行测控窗口对应任务。对于调度集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 中存在冲突关系的可行测控窗口，若当前信道状态 k 等于或优于正在执行可行测控窗口要求的信道状态 k_l ，即 $k \geq k_l$ 时，则移除当前可行测控窗口之后与其冲突的可行测控窗口；若当前信道状态 k 较差于正在执行可行测控窗口要求的信道状态 k_l ，即 $k \leq k_l$ 时，则移除当前可行测控窗口，即

$$\text{OW}_{\text{selected}} = \begin{cases} \text{OW}_{\text{selected}} - \text{OW}_{\text{con}}^l, & k \geq k_l \\ \text{OW}_{\text{selected}} - \{\text{ow}_l\}, & k < k_l \end{cases} \quad (13)$$

其中， OW_{con}^l 表示集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 中可行测控窗口 ow_l 后与 ow_l 冲突的可行测控窗口集合，集合 OW_{con}^l 中的可行测控窗口都与可行测控窗口存在 ow_l 冲突关系，即 $\text{OW}_{\text{con}}^l = \{\text{ow}_c \mid (\phi(\text{ow}_l, \text{ow}_c) = 1) \wedge (\text{ow}_l, \text{ow}_c \in \text{OW}_{\text{selected}})\}$ 。

由于需要及时调整集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ ，需获取集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 中可行测控窗口的开始时间当作调整集合的时间节点。 $T' = \{b_l \mid l: \text{ow}_l \in \text{OW}_{\text{selected}}\}$ 为时间节点集合，其中的元素 b_l 为集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 中可行测控窗口的开始时间，并且 $b_l \in T'$ 依据时间升序的顺序排列。系统在每一个时间节点 $b_l \in T'$ ，能够对集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 进行调整。最后，使得集合 $\text{OW}_{\text{selected}}$ 最终保留下来的可行测控窗口添加到执行窗口集合 $\text{OW}_{\text{executed}}$ ，集合 $\text{OW}_{\text{executed}}$ 即为系统实际需要执行的可行测控窗口集合。

4 仿真与结果分析

4.1 仿真场景

使用STK卫星工具包搭建一个仿真场景，其由20颗用户卫星和1个测控站构成，具体参数见表1。仿真时间为24 h (00:00:00 ~ 23:59:59)，基于STK工具包得到各卫星与测控站间的可见时间窗口。使用MATLAB完成资源调度仿真，考虑场景中的测控站有4种信道分布状态，令信道状态分布随机生成，将调度周期平均划分为4个时段，每个时段测控站信道状态根据信道状态分布随机生

表1 场景参数

地面测控站			
纬度：40.370°		经度：116.843°	
卫星参数			
卫星序号	轨道高度 /km	轨道倾角(°)	升交点赤经(°)
1	1 500	83.003	159.088
2	1 500	83.003	159.088
3	650	97.790	121.820
4	650	97.809	125.221
5	830	98.835	93.707
6	720	98.275	178.444
7	700	98.243	154.619
8	640	98.133	335.424
9	510	60.002	5.032
10	600	74.876	5.024
11	620	97.990	113.985
12	640	98.143	235.104
13	630	98.077	107.437
14	650	97.861	27.577
15	480	97.188	69.056
16	660	98.105	303.466
17	1 200	100.314	22.686
18	1 000	63.431	25.163
19	1 000	63.422	24.713
20	1 000	63.424	25.341

成, 每颗卫星随机生成1~3个测控任务, 以均匀分布随机生成各任务属性。

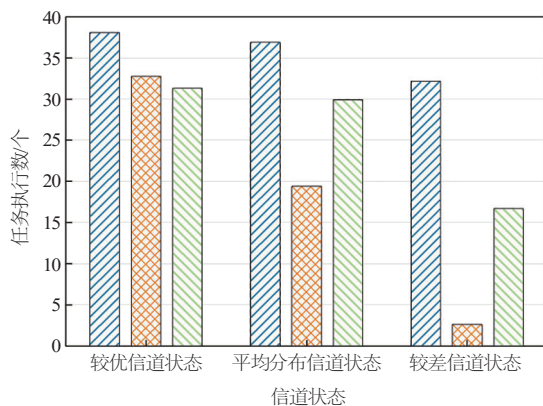
为提高仿真的有效性, 本文设计了多种仿真场景, 模拟在不同的信道状态分布下算法的性能, 包括较优信道状态、平均分布信道状态以及较差信道状态。根据传统卫星网络任务规划算法, 本文采用基于贪婪自适应随机搜索算法的分配固定长度窗口调度算法和分配完整卫星可见弧段调度算法作为对比, 在多种不同信道状态分布下进行仿真。此外, 本文进行100次仿真试验, 试验分别基于不同的任务集合、不同的实时信道状态以及多种信道状态分布的条件。

4.2 结果分析

在仿真中, 首先实验模拟在较优信道状态、平均分布信道状态和较差信道状态3种场景下几种算法对40个测控任务进行调度的性能。图2为算法任务成功执行数量对比。图3为算法获取任务总收益对比, 图4为算法任务执行成功率对比。从仿真结果能够看出, 本文所提的鲁棒调度算法在较优、平均分布和较差的信道状态下都有较

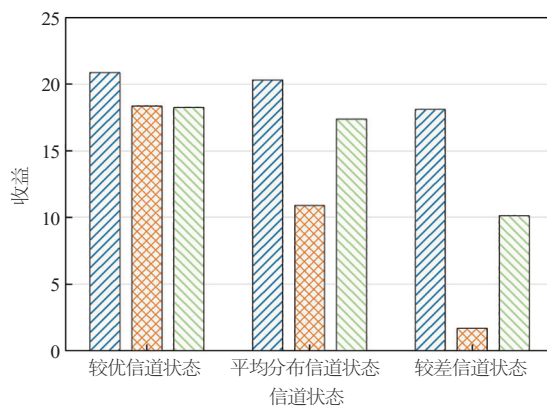
为稳定的性能, 并且可以获得较高的任务执行数、任务总收益以及被调度任务较高的执行成功率, 这是由于本文所提的鲁棒调度算法将不同信道状态都考虑在内, 规划多种可行测控窗口以适应复杂多变的信道状态。对比算法采用传统的分配固定执行时长的调度方式, 所以在多变的信道状态下, 其任务执行数和任务总收益都不稳定, 尤其信道状态从较优状态转变至较差状态时, 采用固定长度窗口调度算法和采用完整弧段调度算法的性能都会有明显的下降趋势, 而完整弧段调度算法相比于固定长度窗口调度算法分配给任务较长的执行时长, 所以在资源充足时会有一定的优势。

在信道状态随机分布的情况下, 实验模拟几种算法分别对总个数为20、30、40、50以及60的测控任务数进行调度的性能。图5为算法任务成功执行数量对比。图6为算法获取任务总收益对比。图7为算法任务执行成功率对比。从仿真结果能够看出, 随着总任务数的上升, 尽



图注: 鲁棒调度 固定长度窗口调度 完整弧段调度

图2 算法任务成功执行数量对比



图注: 鲁棒调度 固定长度窗口调度 完整弧段调度

图3 算法获取任务总收益对比

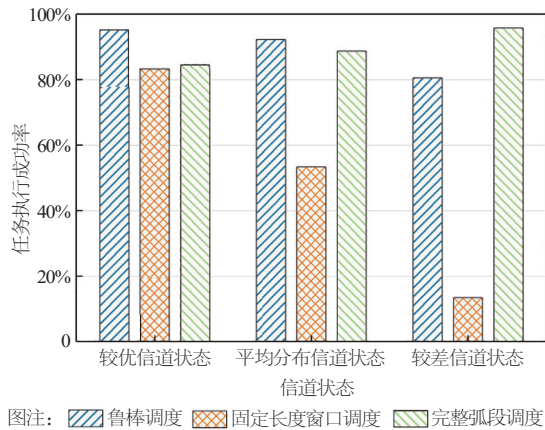


图4 算法任务执行成功率对比

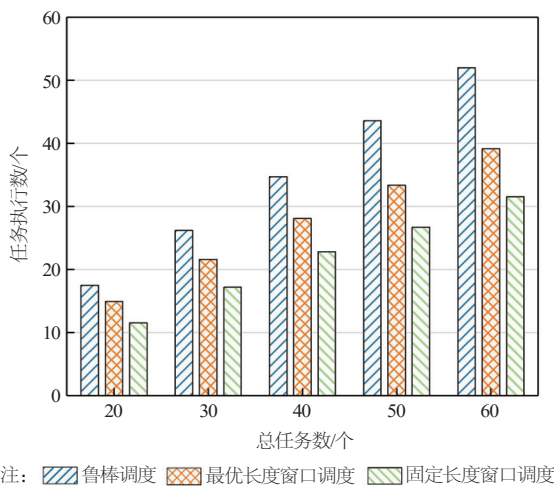


图5 信道状态随机分布的情况下，算法任务成功执行数量对比

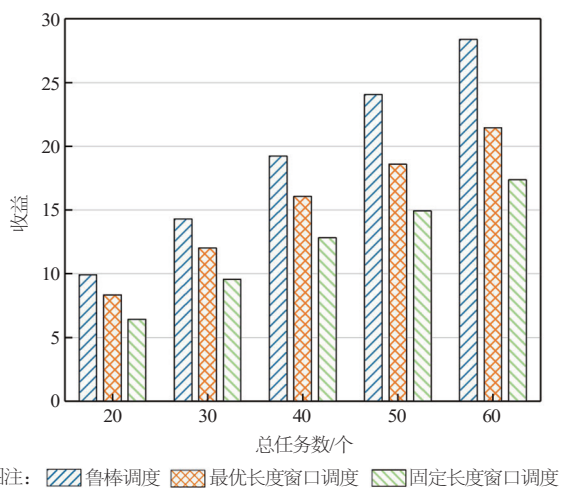


图6 信道状态随机分布的情况下，算法获取任务总收益对比

管3种算法成功执行的任务数和任务总收益也随之上升，但相较于根据预测最高信道分布状态分配的最优长度窗口调度算法和固定长度窗口调度算法，本文所提鲁棒调

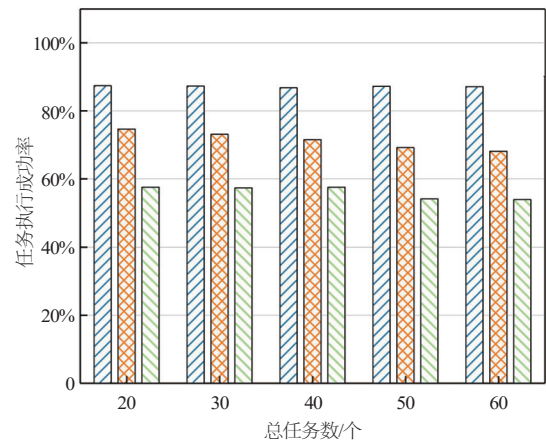


图7 信道状态随机分布的情况下，算法任务执行成功率对比

度算法的性能有着显著的提升。随着总任务数的增多，本文所提的鲁棒调度算法性能较为稳定，而其他两种算法的性能有略微下降的趋势。除此之外，相较于其他两种算法，本文所提算法调度后所得任务调度表的执行成功率也有明显提升。

本文所提的鲁棒调度算法相比于其他算法，成功规划的任务数更多，获得的收益也更多，算法所得的调度任务在较优、较差或平均分布的信道状态下，都有对应的可行测控窗口，因此该算法拥有较强的鲁棒性与较高的时间利用率。

参考文献：

- [1] 周笛, 盛敏, 郝琪, 等. 巨型星座系统的网络运维与资源管控技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 26-35.
ZHOU D, SHENG M, HAO Q, et al. Network operation, maintenance and resource management in mega constellation system full text replacement[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 26-35.
- [2] ZHAN Y F, WAN P, JIANG C X, et al. Challenges and solutions for the satellite tracking, telemetry, and command system[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(6): 12-18.
- [3] ZHANG N, FENG Z R, KE L J. Guidance-solution based ant colony optimization for satellite control resource scheduling problem[J]. Applied Intelligence, 2011, 35(3): 436-444.
- [4] ZHANG Z J, HU F N, ZHANG N. Ant colony algorithm for satellite control resource scheduling problem[J]. Applied Intelligence, 2018, 48(10): 3295-3305.
- [5] ZHANG Z J, ZHANG N, FENG Z R. Multi-satellite control

- resource scheduling based on ant colony optimization[J]. Expert Systems With Applications, 2014, 41(6): 2816-2823.
- [6] Wang Y, Zhou D, Song N, et al. Concurrent reconfiguration of resource-oriented emergency TT&C mission planning for space information networks[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2021, 6(2):11.
- [7] CHEN M, WEN J, PI B J, et al. A novel genetic algorithm with population perturbation and elimination for multi-satellite TT&C scheduling problem[C]//International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications. Singapore: Springer, 2020: 558-568.
- [8] CHEN M, WEN J, SONG Y J, et al. A population perturbation and elimination strategy based genetic algorithm for multi-satellite TT&C scheduling problem[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2021, 65: 100912.
- [9] DAS A. Enhancing capacity of a satellite broadband system via adaptive coding and modulation[C]//Proceedings of 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2006: 5367.
- [10] CSURGAI-HORVÁTH L. Receiver station in budapest for Q/V band satellite site diversity and adaptive coding and modulation experiments with Alphasat[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2019, 37(3): 149-162.
- [11] WU W H, LIU R Z, YANG Q H, et al. Learning-based robust resource allocation for D2D underlaying cellular network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 6731-6745.
- [12] WU W H, LIU R Z, YANG Q H, et al. Robust resource allocation for vehicular communications with imperfect CSI[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(9): 5883-5897.
- [13] VÁZQUEZ ÁLVAREZ A J, ERWIN R S. Robust satellite range scheduling[M]. Cham: Springer, 2015: 107-128.
- [14] VAZQUEZ A J, SCOTT ERWIN R. Robust fixed interval satellite range scheduling[C]//Proceedings of 2015 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [15] TANI S, MOTOYOSHI K, SANO H, et al. An adaptive beam control technique for diversity gain maximization in LEO satellite to ground transmissions[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [16] EVANS B G. Satellite communication systems[M]. 3rd ed. Stevenage: IET, 1999.
- [17] Recommendation ITU-R. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems: P.618-8[S]. 2001.
- [18] Recommendation ITU-R. Specific attenuation model for use in prediction methods: P.839-3[S]. 2005.
- [19] CIANCA E, DE LUISE A, RUGGIERI M, et al. Channel-adaptive techniques in wireless communications: an overview[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2002, 2(8): 799-813.

[作者简介]



纪翔（1996-），男，西安建筑科技大学信息与控制工程学院硕士生，主要研究方向为空间信息网络。

刘润滋（1988-），女，西安建筑科技大学副教授，主要研究方向为空间信息网络、天地融合网络、智慧城市组网技术。

要趁红（1982-），女，西安建筑科技大学讲师，主要研究方向为无线中继网络。

陈剑豪（2000-），男，西安建筑科技大学信息与控制工程学院硕士生，主要研究方向为计算机网络。

慕桃（2000-），女，西安建筑科技大学信息与控制工程学院硕士生，主要研究方向为卫星通信。