

一种解决多星遥感地面接收资源冲突及优化的方法

王无敌^{1,2,3,4}, 周志鑫⁴, 李湘⁴, 詹明⁴, 王宏琦^{1,2,3}

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100190; 4. 北京遥感信息研究所, 北京 100192)

摘要: 针对多星遥感任务规划中的地面接收资源冲突问题, 提出了一种利用互斥关系矩阵解决多星遥感中地面接收资源冲突及优化分配的技术, 详细解释了互斥矩阵技术的实现方法; 应用该技术能够给出多种无冲突的优化分配预案。同时以遥感任务完成量为基准, 根据卫星上数据存储能力和星地数据传输能力, 采用优化决策技术建立了一种地面接收资源分配的综合评价模型, 用来对多个地面站分配的无冲突预案进行评估, 解决多星遥感地面接收资源分配的最优化问题。

关键词: 地面接收资源冲突; 互斥矩阵; 无冲突预案评估; 综合评价模型;

中图分类号: TP 301.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.06.20

Optimization method to resolve the conflict of ground station receiving resources for multi-satellites data

WANG Wudi^{1,2,3,4}, ZHOU Zhixin⁴, LI Xiang⁴, ZHAN Ming⁴, WANG Hongqi^{1,2,3}

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Technology in Geospatial Information Processing and Application System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Beijing Remote Sensing Information Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: This article puts forward an optimization method based on mutex-matrix to resolve the conflict of the ground station resources in receiving multi-satellites remote sensing data, and describes its achievement in detail. This method can provide manifold preferable non-conflict multi-missions solutions of the ground station resources arrangement. Moreover, this article establishes an integrated evaluating model on the arrangement of the ground station resources, which is based on the number of the achieved remote sensing tasks and considers satellite's data storage capacity and data transferring capacity. This model is used to evaluate the non-conflict multi-missions solutions on the arrangement of the ground station resources. The best evaluation result can be selected as the optimization solution of the data receiving mission on the assumed condition.

Keywords: conflict of ground station receiving resources; mutex-matrix; non-conflict multi-missions solution; integrated evaluating model

0 引言

随着现代科学技术的发展, 卫星遥感技术已成为世界各国获取与国民经济发展所需各类数据的重要手段。世界各航天大国必将拥有越来越多的遥感卫星, 为了提高地面资源的利用率, 需要多星共用多个地面站。多星遥感地面接收资源冲突涉及许多问题, 包括时间窗口、任务优先级综合排序、数据密度、链路带宽、接收资源调度等方面, 是一个

复杂的系统优化问题^[1-2]。遥感任务优先级与行业应用相关, 不同的遥应用领域有不同的优先级定义策略。在民用遥感中, 通常采用紧急编程模式的任务优先级最高, 而在军用遥感中, 军事行动保障和作战支持任务优先级最高。在数据密度方面, 不同的传感器具有不同的数据密度, 即使同一传感器, 不同成像模式也会导致不同的数据密度。当前遥感主要面临的核心问题是数据链路过窄, 而高分辨率卫星下传的数据量过大, 链路的扩展总是跟不上带宽的需求, 即使

收稿日期: 2010-03-08; 修回日期: 2011-01-12。

作者简介: 王无敌(1973-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为遥感信息处理技术、遥感信息处理系统设计、遥感任务规划与优化、计算机应用。E-mail: wudiwang@263.net

美国现在依然没有完全解决链路的问题。因此,如果将上述多种问题简化,对多地面站时间窗口进行综合优化,从地面资源的角度着手,可以从一定程度上缓解这一矛盾。

随着卫星和地面站数量的增多,当多颗卫星通过同一个地面站的时间相互之间存在重叠时,必然带来冲突,时间重叠的冲突问题成为一个复杂的资源优化问题。对于卫星的地面接收设备而言,卫星工作有较严格的时间窗口限制。该时间窗长度取决于任务类型(对卫星的指令操作类型),可从几秒钟到几分钟不等。多星的时间窗口可能会出现交叉,这些交叉区域内的任务需求即为冲突需求。

近年来,国内外许多专家在多星任务规划方面进行了深入的研究^[6-10],建立了各种模型进行仿真,取得了很多成果,如协同控制模型^[3]、背包问题模型^[4]、动态约束满足问题模型^[5]、动态调度模型^[6]、树搜索模型^[7]、禁忌搜索模型^[8]、神经控制模型^[9]、UML 分层上下文图表模型^[10]等。国内在这方面的研究包括遗传算法^[11]、约束满足问题模型和混合整数规划模型^[12-13]、动态约束满足调度模型^[14]、基于贪心策略的任务调度算法^[15-16]、动态重调度模型^[17]、基于 PDDL 任务建模^[18-19]、优先级动态变化数传规划算法^[20]、一站多无线任务调度模型^[21]等。本文与前面大多数论文和算法不同的地方是侧重于地面接收资源调度优化,而不是任务调度优化。文献[20-21]也是着眼于解决数传和地面接收方面的问题,前者侧重链路的优化,重要任务优先下传;后者侧重单个接收站的任务调度优化。互斥关系矩阵算法主要面向多遥感接收任务中地面接收系统资源冲突的问题,解决多星遥感中地面接收资源冲突并进行资源的优化分配。该方法在卫星数量较大,地面站数量较多的情况下不但运算速度快,而且能够得到最优解。

1 利用互斥关系矩阵解决资源冲突问题

卫星通过地面站下传遥感数据的冲突示意图如图 1 所示。图中, A、B、C、D 表示 4 个按时间排序的多星(4 颗不同卫星)通过地面站下传数据的时间段,其长度表示时长。从时间轴上可以看出,卫星 AB 间、BC 间、CD 间、BD 间均存在数据接收时间段的冲突,但卫星 AC 间和 AD 间不存在接收时间段上的冲突。

在多星遥感中,由于每个地面站冲突的卫星数量、各个冲突卫星的遥感任务量各不相同,因而地面站接收资源的分配是一个比较复杂的问题。为了解决这个问题,必须从中选出没有冲突的一个或多个时段的组合,这些时段在时间排序上相互不存在冲突,但可以最大限度地下传卫星遥感数据。

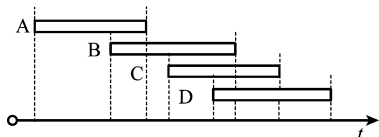


图 1 多星通过地面站传输数据时段冲突示意图

对于每个存在卫星数据下传冲突的地面站,根据图 1 所示的 4 颗卫星冲突关系可以建立互斥关系矩阵,即

$$Mutex = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

式中,“0”表示没有冲突,“1”表示存在时间上的冲突。如:单独每颗卫星接收不产生冲突,所以对角线都为 0;卫星 AB 有接收冲突,则第一行第二列和第二行第一列都为 1。Mutex 是一个对称矩阵,即该矩阵与其转置矩阵相同。

矩阵对角线处元素表示单个卫星经过地面站可接收范围的时间段,其与自身不存在冲突关系,从而对角线上所有元素均为“0”。

卫星 A、B、C、D、AC 组合和 AD 组合接收的可能是 6 种无冲突接收组合,对应矩阵上三角部分的 6 个“0”(含对角线)。

为了从互斥关系矩阵中找出所有可行的卫星下传数据时间段的有效组合,但又避免存在冗余(即一种组合包含在另一种组合中),可以采用以下处理步骤:

以一个 8×8 矩阵为例,假设 8 颗卫星先后相继通过同一个地面站,每颗卫星通过地面站的时间只与前后各一颗卫星存在时间上的重叠,与其他卫星都不存在时间重叠,如表 1 所示。

步骤 1 对于矩阵中任意一行或一列,只要非对角线部分有至少一个“0”,即可置该行或列对角线处元素为“1”。这表示对该对角线处对应的数据传输时段 T,肯定能找到至少一个接收组合 XT 或 TY,因而数据传输时段 T 必须与其他传输时段组合,不能单独使用。

表 1 冲突卫星的矩阵描述

0	1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0
0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	1	0

经步骤 1 处理后,表 1 矩阵将变为表 2。

表 2 冲突矩阵变换

1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0
0	0	0	0	1	1	1	0
0	0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1

步骤 2 对于矩阵的上三角部分所有值为“0”的元素 a_{ij} ($0 < i < j < 9$), 当存在至少两个值均为“0”的元素 a_{jk} 和 a_{kj} ($i < k < j$) 时, 可置 a_{ij} 为“1”, 同时置 a_{ji} 为“1”。这表示接收组合 XZ 可被接收组合 XYZ 替代, 而接收组合 XYZ 肯定优于接收组合 XZ。如元素 a_{ij} 对应的接收组合是 AE, 元素 a_{ik} 对应的接收组合是 AC, 元素 a_{kj} 对应的接收组合是 CE, 接收组合 ACE 显然优于接收组合 AE。

经步骤 2 处理后, 表 2 矩阵将变为表 3。

表 3 冲突矩阵优化变换

1	1	0	0	1	1	1	1
1	1	1	0	0	1	1	1
0	1	1	1	0	0	1	1
0	0	1	1	1	0	0	1
1	0	0	1	1	1	0	0
1	1	0	0	1	1	1	0
1	1	1	0	0	1	1	1
1	1	1	1	0	0	1	1

步骤 3 对于矩阵上三角部分所有值为“0”的元素 a_{ij} ($0 < i < j < 9$), 当该元素所在行至少存在一个值为“0”的元素 a_{ik} ($0 < k < i$) 时, 对元素 a_{ij} 作标记。这表示元素 a_{ij} 不能作为组合段的起始接收组合。如元素 a_{ij} 对应的接收组合是 BD, 元素 a_{ik} 对应的接收组合为 AB, 很显然接收组合 ABD 肯定优于接收组合 BD。

经步骤 3 处理后, 表 3 矩阵将变为表 4。

表 4 经步骤 3 处理后的冲突矩阵优化变换

1	1	0	0	1	1	1	1
1	1	1	0	0	1	1	1
0	1	1	1	<u>0</u>	<u>0</u>	1	1
0	0	1	1	1	<u>0</u>	<u>0</u>	1
1	0	0	1	1	1	<u>0</u>	<u>0</u>
1	1	0	0	1	1	1	<u>0</u>
1	1	1	0	0	1	1	1
1	1	1	1	0	0	1	1

表 4 中带下划线的元素表示其对应的组合段不能作为最优组合段的起始接收组合段。

步骤 4 对于矩阵上三角部分所有值为“0”, 且不带下划线标记的元素 a_{ij} ($0 < i < j < 10$) (对应的 i, j 表示卫星 A、B、C、D、E、F、G、H), 任选一个作为组合段的起始接收组合, 选择一个值为“0”的元素 a_{jk} ($j < k < 10$) 作为 a_{ij} 的后续, 继续为 a_{jk} 寻找后继, ……直到找不到合适的元素为止。则找到的所有前后相继的元素组合就代表了一个没有冗余的接收组合段。如: 从 a_{13} 开始, 可以找到一个前后相继的元素组合 $a_{13} \rightarrow a_{35} \rightarrow a_{57}$, 即卫星 ACEG 的组合是一个满足要求的接收组合段, 并且不存在其他包含该接收组合段的接收组合段。

求出所有可行无冲突卫星传输数据时段的组合集合, 该集合中的每一种组合方式都是多星遥感数据星地传输的

无冲突传输方案。

在多种无冲突传输方案集合中, 根据卫星数据存储能力不同、星地数据传输能力不同、遥感任务需求和遥感任务量的不同, 对最优传输组合方案有不同的评估准则。第 2 节将以遥感任务的完成量为基准, 根据卫星数据存储能力和星地数据传输能力因素, 建立星地数据传输方案的综合评价模型, 选择最佳星地数据传输时段组合。

2 一种地面接收资源优化分配的综合评价模型

本综合评价模型的建模原则: 在遥感任务既定的情况下, 以传输的遥感数据量为基准, 完成尽可能多的遥感任务, 获得最大的星地资源利用率。遥感任务量因素在一般意义上是资源优化分配模型的主要因素。在遥感资源优化算法研究中, 任务优先级、数据密度的权重在不同的应用背景下各不相同, 而遥感任务完成量在合理规划任务优先级的前提下, 是地面接收资源效益最大化的最终体现。

根据建模原则, 采用如下思路建模: (1) 求每个冲突地面站对于每颗卫星的遥感任务完成量的影响 *Benefit*; (2) 遍历无冲突传输方案组合, 其中 $\sum Benefit$ 最大值的组合被认为是最佳多星数据传输时段组合。

2.1 遥感时段等效时间

所谓遥感时段, 指针对每颗卫星, 每两个时序相邻的卫星过站时段(遥感数据传输时段)之间的遥感时间。根据遥感任务需求不同和遥感目标分布不同, 在一个遥感时段内可能有多个遥感任务。根据遥感需求不同、遥感目标位置分布不同以及卫星有效载荷约束不同, 这些遥感任务对应的遥感时长可能相互重叠, 需要求出每一个遥感时段内所有遥感任务的等效遥感时长, 即有效遥感时段。等效方法为: 将每一个遥感任务等效为一个遥感时长, 所有这些任务的遥感时长再等效为一个总的遥感时长(不计时间上重叠部分), 如图 2 所示。

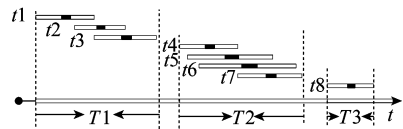


图 2 等效时长示意图

图 2 中, $t_1 \sim t_8$ 是根据 8 个遥感任务等效的 8 个遥感时长。不计重叠部分, 这些拍摄时长可以等效为 3 个等效遥感时段 T_1 、 T_2 和 T_3 (见图 2 中紧贴时间轴的三段长条矩形), 则 $T_1 + T_2 + T_3$ 作为该遥感时段的等效时间。

对于每个遥感时段, 等效遥感时间为 $T = \cup T_i$ 。

2.2 综合评价模型

为了求冲突地面站对于某颗冲突卫星遥感任务完成量

的影响, 需要分别计算该站分配和不分配给该卫星两种情况下的卫星遥感任务完成量, 求出这两个量的差值, 作为该冲突地面站对该卫星的影响指标。

为了计算遥感任务完成量, 针对某指定卫星, 根据时间序将其遥感和星地数据传输任务分为一系列相间的等效遥感时段和星地数据传输时段。

遥感任务完成量计算方法如下: 不失一般性, 不妨假设第一段是等效遥感时段, 于是有 n 个遥感时段, 各段所有遥感任务的总的等效遥感时间分别为 $SAT_1, SAT_2, \dots, SAT_n$; 并且有 m (不妨只考虑 $m = n$) 个星地数据传输时段, 各个星地数据传输时段时间跨度分别为 $GST_1, GST_2, \dots, GST_m$; 卫星的存储器等效遥感时长记为 W 。

$$K_1 = \begin{cases} \min(SAT_1, W) - GST_1, & \min(SAT_1, W) \geq GST_1 \\ 0, & \min(SAT_1, W) < GST_1 \end{cases}$$

表示第一个星地数据传输时段后剩余任务量(等效为时长);

$$K_2 =$$

$$\begin{cases} \min(K_1 + SAT_2, W) - GST_2, & \min(K_1 + SAT_2, W) \geq GST_2 \\ 0, & \min(K_1 + SAT_2, W) < GST_2 \end{cases}$$

表示第二个星地数据传输时段后剩余任务量;

$$K_n =$$

$$\begin{cases} \min(K_{n-1} + SAT_n, W) - GST_n, & \min(K_{n-1} + SAT_n, W) \geq GST_n \\ 0, & \min(K_{n-1} + SAT_n, W) < GST_n \end{cases}$$

表示第 n 个星地数据传输时段后剩余任务量。则 K_n 表示该卫星的总剩余任务量(等效为时长)。

设 K'_n 为针对该卫星, 不分配该冲突地面站进行接收时卫星的总剩余任务量; K''_n 为对该卫星, 分配该冲突地面站进行接收时卫星的总剩余任务量。易知, $K'_n \geq K''_n$ 。则每个冲突地面站对于每颗卫星的遥感任务完成量的影响, 可以描述为

$$Benefit = \frac{K'_n - K''_n}{\sum_{i=1}^n \min(SAT_i, W)}$$

3 利用基于矩阵的优化搜索算法和综合评价模型解决地面资源冲突

假设 S 表示卫星(数量为 L), G 表示地面站(数量为 P), BT 表示进站开始时间, ET 表示进站结束时间。

步骤 1 求出地面站对卫星的数据传输窗口集合 $GST\{G, S, BT, ET\}$;

步骤 2 求出存在冲突的数据传输窗口集的集合 $GSCT\{GST\{G, S, BT, ET\}\}$ (此处 $GST\{G, S, BT, ET\}$ 包含地面站每次前后相继重叠冲突的数据传输窗口集。如: 图

1 中卫星 A、B、C、D 前后相继重叠经过某个地面站 i , 形成 4 个时间前后重叠冲突的数据传输窗口, 这 4 个数据传输窗口就是一个存在冲突的数据传输窗口集 $\{\{G_i, S_A, BT_A, ET_A\}, \{G_i, S_B, BT_B, ET_B\}, \{G_i, S_C, BT_C, ET_C\}, \{G_i, S_D, BT_D, ET_D\}\}$);

步骤 3 采用前面的互斥矩阵方法求出 $GSCT\{GST\{G, S, BT, ET\}\}$ 中每个地面站的每次冲突的所有可行无冲突卫星传输数据时段组合的集合 $GSNCT\{GST\{G, S, BT, ET\}\}$ 。如: 图 1 中 4 个冲突的数据传输窗口的所有可行无冲突卫星传输数据时段组合的集合为 $\{\{\{G_i, S_A, BT_A, ET_A\}, \{G_i, S_C, BT_C, ET_C\}\}, \{\{G_i, S_A, BT_A, ET_A\}, \{G_i, S_D, BT_D, ET_D\}\}\}$;

步骤 4 对于每个地面站 $G_i (0 < i \leq P)$ 的每次冲突时段 $GST\{G_i, S, BT, ET\}$, 其可行无冲突卫星传输时段组合的集合为 $GST\{G_i, S, BT, ET\}$, 用 K_i 表示对应集合中组合的个数, 则地面站 G_i 的某次冲突时段有 K_i 种可行无冲突卫星传输时段组合方案; 设每种组合中元素个数为 $SN_x (0 < x \leq K_i)$, 则表示该传输组合包含 SN_x 个卫星的传输时段;

步骤 5 从步骤 1 的 $GST\{G, S, BT, ET\}$ 求出每颗卫星 $S_j (0 < j \leq L)$ 的数据传输窗口集合 $GST\{G, S_j, BT, ET\}$, 用 Y_j 表示对应集合中元素个数, 即卫星 S_j 的数据传输窗口数为 Y_j ; 把卫星 S_j 的每两个相邻传输窗口之间的有效遥感任务总量设为一个等效遥感时段, 则卫星 S_j 有 Y_j 个等效传输时段;

步骤 6 结合前面的综合评价模型, 假设某个地面站 G_i 的某次冲突时段共有 CS_i 颗卫星相互冲突, 利用互斥矩阵求出 K_i 种可行无冲突卫星传输时段组合方案, 每种组合方案中包含 $N_k (0 < k \leq K_i)$ 个卫星的传输时段。对于冲突的 CS_i 颗卫星而言, 每颗卫星有 $Y_x (0 < x \leq CS_i)$ 个数据传输时段。则可以求出每个地面站 G_i 的每次冲突时段对 K_i 种无冲突窗口集合中每种传输组合方案带来的综合全局影响为

$$Benefit = \sum_{i=1}^{CS_i} \frac{K'_i - K''_i}{\sum_{i=1}^{CS_i} \sum_{j=1}^{Y_x} \min(SAT_j, W)}$$

则 K_i 种无冲突传输组合中 $Benefit$ 最大的传输组合就是每个地面站 G_i 每次冲突时段的最佳传输窗口组合 $GST\{G_i, S, BT, ET\}$ 。

4 实例分析

4.1 测试方法及分析

为了分析基于矩阵的优化搜索算法在解决遥感卫星地面资源冲突中的应用性能, 同时采用三种算法进行测试: 基于矩阵的优化搜索算法、基于规则的算法与遍历搜索算法。

基于矩阵的优化搜索算法测试方法见第 3 节。

基于规则的算法中的规则设定为高级优先级规则, 即对于每个地面站的每个冲突时段, 有若干冲突卫星, 按照时间优先、互不冲突的规则(以时间窗口最靠前的卫星传输时段为基准, 依次选取后续不冲突的卫星时段) 求解出无冲突的传输窗口组合, 该算法只能求出较优解。

遍历搜索算法则对每个冲突时段的各种组合方式遍历, 求出其中可行无冲突的数据传输窗口组合, 再应用前述的综合评价模型求解出每个冲突时段的最佳传输窗口组合。

其中, 基于矩阵的优化搜索算法和遍历搜索算法都是先求出每个冲突地面站的所有可行无冲突数据传输窗口组合, 再利用综合评价模型求出最佳传输窗口组合, 因此都能够求出最优解; 不同之处在于, 遍历算法没有任何优化处理, 花费时间长, 卫星数量越多, 差距越明显。

4.2 测试数据

为了检测互斥矩阵在解决多星遥感地面接收资源冲突问题中的性能, 本文根据多星遥感接收资源冲突消解问题的基本结构特征, 设计了一定的算例。这些算例针对性强, 可调参数又允许系统地控制和改变问题的具体特性, 以便修正数据的偏颇性。

具体在生成的时候, 随机算例主要考虑了以下几种可调控参数, 主要包括:

- (1) 卫星数目;
- (2) 每颗卫星轨道上分布的遥感任务的数目;
- (3) 地面数据接收站的数目;
- (4) 卫星的最大数据存储容量。

为了简化问题, 随机数据在生成时采用了如下假设:

假设 1 可供使用的卫星及其轨道特征从卫星分析工具包软件(satellite tool kit, STK) 提供的近地极轨卫星想定数据中随机抽取;

假设 2 地面目标均为点目标, 在每颗卫星轨道观测范围内随机生成该星点目标的地理位置, 每颗卫星的观测目标数量在 $[N, N + 6]$ 范围内随机生成 (N 指测试数据中每颗卫星轨道上分布的遥感任务的数目, 如测试集中 100、200、300、500、1 000 等可调, 对应测试数据中的遥感任务);

假设 3 可供使用的地面站及其地理位置从 STK 提供的中国境内的地面站想定数据中随机抽取;

假设 4 卫星数据下传与数据存储的速率比为 1;

假设 5 每个任务最短记录时间为 30 s。

4.3 结果分析

针对生成的不同规模的测试数据, 表 5 给出基于矩阵的优化搜索算法、基于规则的算法与遍历搜索算法之间的计算性能比较。表中, NT 表示“完成任务数目”; T 表示“CPU 时间”; “测试数据集”的命名规则是: TestSets $M-N-P$ 代表测试数据集的规模是 M 个卫星、 N 个遥感任务、 P 个地面站。

表 5 不同搜索算法之间的计算结果

测试数据集	基于矩阵的优化搜索		高级优先级规则		遍历搜索算法	
	NT	T/s	NT	T/s	NT	T/s
TestSets6- 100- 2	82	0.25	60	0.24	82	0.32
TestSets6- 300- 4	190	0.3	133	0.29	190	0.49
TestSets6- 500- 6	243	0.34	162	0.35	243	0.53
TestSets8- 100- 2	96	0.31	78	0.3	96	0.93
TestSets8- 300- 4	244	0.36	154	0.35	244	1.04
TestSets8- 500- 6	298	0.39	183	0.40	298	1.19
TestSets10- 100- 2	100	0.71	87	0.69	100	4.33
TestSets10- 300- 4	267	0.93	198	0.91	267	5.47
TestSets10- 500- 6	426	1.02	277	1.01	426	5.96
TestSets12- 200- 2	186	2.63	136	2.39	186	257.81
TestSets12- 500- 4	398	2.74	248	2.41	398	278.37
TestSets12- 1000- 6	512	2.86	377	2.54	512	312.54
TestSets15- 200- 2	198	8.91	167	8.19	198	9 856.75
TestSets15- 500- 4	435	9.24	329	8.32	435	10 019.68
TestSets15- 1000- 6	688	10.02	512	8.59	688	11 927.59

由表 5 可知, 算法理论上的预期与算例的计算结果基本上是一致的。基于矩阵的优化搜索算法和遍历搜索算法都能够得到最优解, 因此对于相同的问题实例完成任务数目相同; 但是, 当卫星数量达到 12 个以上时, 遍历搜索算法性能急速下降。基于矩阵的优化搜索算法和高级优先级规则算法的效率都很高, 但是基于矩阵的优化搜索算法能够得到最优解, 而高级优先级规则只能得到较优解。

5 结束语

多星遥感地面接收站冲突消解和优化分配属于多星多站遥感任务规划问题之一。针对地面站资源的冲突消解, 本文提出了一种利用互斥矩阵解决遥感卫星地面站冲突的技术, 简单可行, 具有很好的适应性。遥感卫星地面站资源的最优化分配根据不同需求和约束有不同的评价准则, 本文以遥感任务完成量为评价基准, 根据星上数据存储能力和星地数据传输能力, 提出了一个地面接收资源优化分配的综合评价模型, 具有一定的代表性和实用性。当然, 遥感卫星资源冲突需要考虑的因素非常多, 如等效时间与内容密切相关, 因此资源内容(任务优先级)和数据密度对任务有效性的影响很大, 如果能够在优化模型中全面考虑这些因素的影响, 优化解会具有更好的任务适应性。这也是多星遥感地面接收资源优化未来需要重点研究的方向。

参考文献:

- [1] Chizek J G. Military transformation: intelligence, surveillance and reconnaissance, congressional research service (CRS) intelligence and related issues[R]. Washington, D. C.: Congressional Research Service, 2003: 1- 34.
- [2] Das A, Chakrabarti B K. *Quantum annealing and related optimization methods*[M]. Heidelberg: Springer, 2005: 145- 150.
- [3] Rabbath C A, Gagnon E, Lauzon M. On the cooperative control of multiple unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Canadian Review-Spring/Printemps*, 2004, 46(1): 15- 19.

- [4] Cerny V. Thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1985, 45(1): 41– 45.
- [5] Bellicha A. Maintenance of a solution in a dynamic constraint satisfaction problem[C] // *Proc. of the Artificial Intelligence in Engineering XIII*, 1993: 261– 274.
- [6] Elkhyari A, Gueret C, Jussien N. Conflict based repair techniques for solving dynamic scheduling problems[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006(2470): 137– 173.
- [7] Rasmussen S J, Shima T. Tree search algorithm for assigning cooperating UAVs to multiple tasks[J]. *International Journal of Robust Nonlinear Control*, 2007, 18(2): 135– 153.
- [8] Cordeau J F, Laporte G. Maximizing the value of an Earth observation satellite orbit[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2005, 56(8): 962– 968.
- [9] Darren M C. An evolved autonomous controller for satellite task scheduling[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2004(3102): 253– 254.
- [10] Bourdeau E. Hierarchical context diagrams with UML: an experience report on satellite ground system analysis[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 1999(1618): 227– 239.
- [11] 玄光南, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 80– 92. (Xuan G N, Cheng R W. *Genetic algorithms and engineering optimization* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 80– 92.)
- [12] 王凌霄, 张文毅. 基于约束满足求解思路的卫星接收任务调度[J]. *科学技术与工程*, 2008, 8(19): 5370– 5375. (Wang L X, Zhang W Y. Satellite data receive mission scheduling based on resolvable of constraint satisfaction problem[J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(19): 5370– 5375.)
- [13] 李云峰, 武小悦. 基于多星联合侦察的卫星数据调度问题模型[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(8): 948– 951. (Li Y F, Wu X Y. Model of satellite data transmission scheduling problem based on multi satellite combined reconnaissance[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(8): 948– 951.)
- [14] 刘洋, 陈英武, 谭跃进. 一类多卫星动态调度问题的建模与求解方法[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(12): 2696– 2699. (Liu Y, Chen Y W, Tan Y J. Modeling and solution of the problem of multisatellites dynamic scheduling [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(12): 2696– 2699.)
- [15] 崔子祥, 刘湘辉, 李军. 基于贪心策略中继卫星任务调度算法研究[J]. *科技信息*, 2009(3): 117– 118. (Cui Z X, Liu X H, Li J. Study of greedy strategy based scheduling algorithm for relaying satellite [J]. *Science and Technology Information*, 2009, (3): 117– 118.)
- [16] 徐雪仁, 宫鹏, 黄学智, 等. 资源卫星(可见光)遥感数据获取任务调度优化算法研究[J]. *遥感学报*, 2007, 11(1): 109– 114. (Xu X R, Gong P, Huang X Z, et al. Study on optimization algorithms for remote sensing data collection planning of satellite[J]. *Journal of remote sensing*, 2007, 11(1): 109– 114.)
- [17] 刘洋. 成像侦察卫星动态重调度模型、算法及应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004. (Liu Y. Study on photoreconnaissance satellite dynamic rescheduling model, algorithm, and application [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.)
- [18] 张正强. 基于PDDL的侦察卫星应用任务建模研究[J]. *航天控制*, 2009, 27(5): 77– 82. (Zhang Z Q. Application mission modeling of reconnaissance satellite based on PDDL [J]. *Aerospace Control*, 2009, 27(5): 77– 82.)
- [19] 陈克伟, 安蓓. 基于PDDL的成像卫星任务规划建模[J]. *兵工自动化*, 2008, 27(12): 41– 44. (Chen K W, An B. Modeling of mission planning for imaging satellite based on PDDL [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2008, 27(12): 41– 44.)
- [20] 陈浩, 李军. 优先级动态变化的多地面站数传规划问题研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(7): 1655– 1660. (Chen H, Li J. Study of the multi-ground stations scheduling problem with the characteristic of flexible priority [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(7): 1655– 1660.)
- [21] 王小筠. 关于一站多天线任务调度模型算法的实现[J]. *信息化研究*, 2009, 35(4): 48– 51. (Wang X J. Implementation of an algorithm of task assignment model for multi-antenna earth station [J]. *Information Research*, 2009, 35(4): 48– 51.)

(上接第 1260 页)

- [10] Deng X P, Liu Z, Jiang W L, et al. Passive location method and accuracy analysis with phase difference rate of change[J]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2001, 148(5): 302– 307.
- [11] 许耀伟, 孙仲康. 利用相位差变化率对固定辐射源的无源被动定位[J]. *系统工程与电子技术*, 1999, 21(3): 34– 37. (Xu Y W, Sun Z K. Passive location of fixing emitter using phase rate of changing [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1999, 21(3): 34– 37.)
- [12] 许耀伟, 孙仲康. 利用相位差变化率对运动辐射源的无源被动定位[J]. *系统工程与电子技术*, 1999, 21(8): 7– 8. (Xu Y W, Sun Z K. Passive location and observability analysis to moving target with phase rate of change measurements [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1999, 21(8): 7– 8.)
- [13] 邓新蒲, 祁颖松, 卢启中, 等. 相位差变化率的测量方法及其测量精度分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2001, 23(1): 20– 23. (Deng X P, Qi Y S, Lu Q Z, et al. Measurement method and precision analysis for phase difference rate from two-element antenna array [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, 23(1): 20– 23.)
- [14] Ristic B, Boashash B. Comments on the Cramer-Rao lower bounds for signals with constant amplitude and polynomial phase[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1998, 46(6): 1708– 1709.
- [15] Tretter S A. Estimating the frequency of a noisy sinusoid by linear regression[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1985, 32(6): 832– 835.