遥感卫星数据接收中的最优任务分配 [1]

胡文龙 彭海良
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 在多地面站-多卫星的遥感数据接收条件下，通过定义卫星数据接收的任务集合将任务分配表达为任务集合和地面站集合之间的最优分配，并在构造代价函数的基础上实现最优分配算法在遥感数据接收任务管理中的应用。

关键词 组合优化，任务分配，遥感数据接收
中图号 TN911.7, TN911.7

1 前 言

在多地面站-多卫星的遥感数据接收任务管理中，一般可能存在几颗卫星在相同时间段内通过多个地面站共视范围的情况，再加之其他多种因素的影响，往往导致多站-多星数据接收任务分配的复杂性。实际应用中，只能依据某些逻辑限定条件或简化的接收准则制定接收方案，但这种方法所得到的解在性质上不具有全局最优性，而只能是局部最优的。

本文通过应用最优组合分配的数学模型，提出一种新的方法用于卫星数据接收任务分配：根据不同卫星通过多地面站可视范围的过境预报 [1]，首先定义卫星数据接收的任务集合，然后将遥感数据接收任务分配表述为任务集合和地面站集合之间的最优分配问题，并通过构造最优分配代价函数实现应用问题的求解。

2 最优任务分配模型

考虑到实际工作中多个地面站存在相互交叠的共视范围，本文将遥感卫星在特定时间段内通过多个地面站可视范围时的数据接收需求视为一个任务，并通过定义任务集和地面站集，将遥感接收任务的分配转化为两个数据集合之间的分配。

为此，定义任务集为

$$D = \{d_0, d_1, \cdots, d_M\} \tag{1}$$

其中 M 为任务个数，元素 d_i 为任务，当 $i=0$ 时 d_0 表示“空”任务；地面站集为

$$S = \{s_0, s_1, \cdots, s_N\} \tag{2}$$

其中 N 为地面站个数，s_j 为地面站，当 $j=0$ 时 s_0 表示“空”地面站。引入“空”任务和“空”地面站的目的在于实现当 $M \neq N$ 时的任务分配。

我们以元素 $d_i \in D$ 和 $s_j \in S$ 组成 2-元集合

$$\gamma_{ij} = (d_i, s_j) \tag{3}$$

(3) 式表示一个基本的分配假设，即将任务 d_i 分配给地面站 s_j。(3) 式又称为 2-元组，易知共存在 $(M+1)\times(N+1)$ 个表示基本分配假设的 2-元组。当 $i>0, j=0$ 时，(3) 式表示接收任务 i 被分配到“空”地面站，即任务 i 没有被分配；同样，当 $i=0, j>0$ 时 (3) 式表示地面站 j 没有分配接收任务。因此，当同时存在 $i=0, j=0$ 时 (3) 式没有意义。

我们可以为 (3) 式表示的基本分配假设定义代价函数为

[1] 2000-10-25 收到，2001-02-19 定稿

$$c_{ij} = c(d_i, s_j) \tag{4}$$

由此，我们可以将全部任务和地面站之间的任务分配表示为

$$\Gamma = \{\gamma_{i_n j_n}\}, \qquad n = 1, 2, \cdots \tag{5}$$

其中 γ_n 应满足以下条件:

$$\bigcup_{n=1} \gamma_{i_n j_n} = D \cup S, \qquad \forall \gamma_{i_n j_n} \in \Gamma \tag{6a}$$

$$\gamma_{ij} \cap \gamma_{i'j'} = \phi, \quad \forall \gamma_{ij}, \gamma_{i'j'} \in \Gamma, \quad i, j, i', j' \neq 0, \quad i \neq i', \quad j \neq j' \tag{6b}$$

即所有任务和所有地面站都必须包括在分配之中，且一个任务只能分配给地面站一次，一个地面站也只能接受一个任务.

在假设各地面站可以相互独立接受任务分配的条件下，由 (4) 式可以定义分配 (5) 式的总代价为

$$C(\Gamma) = C(\gamma_{i_1 j_1}, \gamma_{i_2 j_2}, \cdots) = \sum_{n=1} c_{i_n j_n} \tag{7}$$

即以各基本分配假设的代价通过加性求和方式构成总的代价. 为简化 (6), (7) 式的表达，相应于 (4) 式和 (5) 式引入决策变量:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 1, & \gamma_{ij} \in \Gamma \\ 0, & \gamma_{ij} \notin \Gamma \end{cases} \tag{8}$$

(8) 式同时综合考虑到 $(M+1) \times (N+1)$ 个全部基本分配假设 2-元组的情况， (7) 式转化为

$$C(\Gamma) = \sum_{i=0}^{M} \sum_{j=0}^{N} \omega_{ij} c_{ij} \tag{9a}$$

而 (6) 式转化为限定条件

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{j=0}^{N} \omega_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, 2, \cdots, M \\ &\sum_{i=0}^{M} \omega_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, 2, \cdots, N \end{aligned}\right\} \tag{9b}$$

本文目的就是在满足 (9b) 式限定条件所有可能的分配中，寻找一个具有最小代价的分配，也就是使 (9a) 式达到最小值的分配，即

$$\left.\begin{aligned} &\min_{\omega_{ij}} \sum_{i=0}^{M} \sum_{j=0}^{N} \omega_{ij} c_{ij} \\ &\text{s.t} \quad \sum_{j=0}^{N} \omega_{ij} = 1, \qquad \forall i = 1, 2, \cdots, M \\ &\qquad \sum_{i=0}^{M} \omega_{ij} = 1, \qquad \forall j = 1, 2, \cdots, N \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

(10) 式所表达的是 0-1 整数规划理论中最简单的分配 (Assignment) 问题 [2]．与标准的分配问题不同，(10) 式所涉及到的两个分配集合元素个数不等，因而被称为不平衡分配 [2]；此外，(10) 式给出的约束条件中没有对 $i=0, j=0$ 时的分配情况加以限定，但这种情况可以看成是标准分配问题的推广，并且与标准分配问题具有同样的最优解结构 [2]．(10) 式存在多种时间复杂度为 $O(n^3)$ 的求解算法，如经典匈牙利方法 [3]，适用于不平衡分配问题的 Munkres 算法等 [4]．具体算法及其性能分析请参见上述相关文献.

在信号处理领域，(10) 式所表达的数学模型曾被用来求解多站无源定位问题 [5]、异构多传感器多目标跟踪系统的数据互联问题 [2] 等. 由于全面考虑了参与分配各数据集合之间全部分配假设，(10) 式所给出的分配解是一种全局最优的解.

3 最优任务分配算法的应用

应用优化数学模型 (10) 式及其求解算法实现遥感接收任务的最优分配，需要根据工程实际分析与任务分配相关的各种具体因素及其影响，构造代价因子 c_{ij}．

为简化起见，本文仅考虑地面站接收准则以及卫星通过地面站可视区时所形成的相对关系对分配的影响. 为获取卫星相对地面站可视区时的接收关系，可以在精确的卫星轨道预测基础上，计算卫星通过各地面站可视区的参数，给出卫星相对于地面站的过境关系 [1]．本文将这种过境关系称为过境预报.

设卫星 r 相对于地面站 j 的过境预报为

$$P_{jr}=P_{jr}(t,\tau,\varphi) \tag{11}$$

其中 j 为地面站序号，$j=1,2,\cdots$；r 为卫星序号，$r=1,2,\cdots$；t 为卫星 r 进入地面站 j 可视区域时刻，称为入境时刻；τ 为卫星 r 进入地面站 j 可视区域的持续时间；φ 为卫星 r 相对于地面站 j 过境期间的最大仰角.

由 t 和 τ 可以定义一个时间区间，记为

$$\Omega=[t,t+\tau] \tag{12}$$

称为定义在过境预报 (11) 式上的过境时间区间. 对于 2 个过境时间区间:

$$\Omega_1=[a_1,b_1] \tag{13}$$

$$\Omega_2=[a_2,b_2] \tag{14}$$

若有条件

$$a_2<a_1 \text{ 且 } b_2>b_1 \tag{15}$$

或条件

$$a_2>a_1 \text{ 且 } b_2<b_1 \tag{16}$$

成立，则称两个地面站之间具有共视区，Ω_1,Ω_2 具有非空的相交子区间，记为

$$\Omega_1\cap\Omega_2=[\max(a_1,a_2),\min(b_1,b_2)] \tag{17}$$

进而，设 Ω_n 为地面站 n 相对于某卫星的过境时间区间，可以定义多个地面站过境时间区间具有非空相交子区间的表达式为

$$\bigcap_{n=1} \Omega_n \neq \phi \tag{18}$$

亦即多地面站对特定卫星具有共同的可视区.

根据至少两两具有共视区的过境预报，可以给出关于任务 i 的如下定义：

$$d_i = d_i(P_{1r}, P_{2r}, \cdots, P_{Nr}) \tag{19}$$

(19) 式中 i 为任务序号， $p_{1r}, p_{2r}, \cdots, p_{Nr}$ 为 N 个至少两两相交的预报时段.

任务 i 分配到地面站 j 的代价因子为

$$c_{ij} = \sum_{j_i=1}^{N} \delta(j - j_i) \cdot c(P_{j_i r_i}) \tag{20}$$

代入 (11) 式得

$$c_{ij} = \sum_{j_i=1}^{N} \delta(j - j_i) \cdot c(\tau_{j_i r_i}, \varphi_{j_i r_i}) \tag{21}$$

其中

$$\delta(j) = \begin{cases} 1, & \forall j = 0 \\ 0, & \forall j \neq 0 \end{cases} \tag{22}$$

$c(\tau_{jr}, \varphi_{jr})$ 表示由卫星 r_i 相对于地面站 j_i 过境关系产生的代价因子. (21),(22) 式表明，代价因子 c_{ij} 决定于卫星 r_i 相对于地面站 j_i 过境预报，其影响因素包括过境持续时间 τ 和过境最大仰角 φ 等. 各影响因素通常以加权和式构造代价因子 c_{ij} . 工程实践中往往还需要全面考虑其他多种因素的影响，如卫星优先等级就是一个经常需要考虑的因素，此处记为 ξ_r 并引入 (21) 式.

下面即给出由过境持续时间 τ, 过境最大仰角 φ 和卫星优先等级 ξ_r 构造代价因子 c_{ij} 的表达式. 考虑到 τ 和 φ 都是影响分配的有利因素，即 τ 和 φ 数值越大导致代价函数越小；而以较小数值表示较高的卫星优先等级，则 ξ_r 数值越小导致代价函数越大. 故可以采用加权求和的方式构造代价函数使

$$c(\tau_{jr}, \varphi_{jr}, \xi_r) = \sigma_1 \cdot \tau_{jr}^{-1} + \sigma_2 \cdot \varphi_{jr}^{-1} + \sigma_3 \cdot \xi_r \tag{23}$$

代入 (21) 式得

$$c_{ij} = \sum_{j_i=1}^{N} \delta(j - j_i)(\sigma_1 \cdot \tau_{j_i r_i}^{-1} + \sigma_2 \cdot \varphi_{j_i r_i}^{-1} + \sigma_3 \cdot \xi_{r_i}) \tag{24}$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 是加权因子，其数值的选择取决于各因素对于任务分配的重要性，并且需要根据工程应用效果加以调整.

(20) — (24) 式限定了非零值的下标 i 和 j . 考虑到“空”任务和“空”地面站在任务分配中意义，可以给出以下的代价函数定义

$$c_{i0} = \max_j \{c_{ij}\}, \qquad \forall i > 0, \quad j > 0 \tag{25a}$$

$$c_{0j} = \max_i \{c_{ij}\}, \qquad \forall i > 0, \quad j > 0 \tag{25b}$$

4 结 论

本文基于工程实践将遥感数据接收任务分配表达为数学规划理论中的最优分配问题，将不同因素对任务分配的影响以加权的方式归结为分配代价因子，为复杂条件下遥感数据接收任务分配问题的求解提供了统一的算法途径。

参 考 文 献

[1] 韦银高等，ERS-1 遥感卫星数据接收，星载 SAR 图像处理，北京，科学出版社，1996, 9, 19–27.

[2] 胡文龙，多传感器多目标跟踪中的数据互联与融合，博士学位论文，北京，北京航空航天大学研究生院，1995, 10, 15–26.

[3] 何叔俭等，线性规划与网络技术，上海，华东化工学院出版社，1989, 6, 114–126.

[4] S. S. Blackman, Multiple Target Tracking with Radar Application, Norwood, MA, Artech House, 1986, 219–246.

[5] K. R. Pattipati, S. Deb, Y. Bar-Shalom, R. B. Washburn, A new relaxation algorithm and passive sensor data association problem, IEEE Trans. on Automatic Control, 1992, 37(2), 198–213.

AN OPTIMAL TASK ASSIGNMENT APPROACH FOR REMOTE SENSING SATELLITE DATA RECEPTION

Hu Wenlong Peng Hailiang

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080, *China*)

Abstract A new approach is presented for the task assignment in multi-station multi-satellite data reception mission management systems by applying the optimal assignment algorithm in combinatorial mathematics based upon the definition of satellite data reception task collection and the construction of the assignment cost functions.

Key words Combinatorial optimization, Task assignment, Remote sensing data reception

胡文龙： 男，1963 年生，博士，研究领域为数据融合、遥感数据处理等.
彭海良： 男，1939 年生，研究员，研究领域为雷达系统与信号处理等.