卫星通信网络中带宽动态分配

清华大学电子工程系

阳志明　学号：　2006310340

Email: yangzm06mails.tsinghua.edu.cn

因刚入学，加上平时工作中很少涉及优化方面的知识，自己还不能就专业相关问题建立优化模型，所以查阅本篇文献 [2]．通过阅读本文献，比较直接地了解了优化知识在卫星通信方面的应用，同时对卫星通信网中带宽分配问题的优化建模过程有了一定的认识. 经过一个多星期对该文章的阅读和理解，自己编制了 Lingo8 程序，并做了三组数值实验。在实验过程中，对于 Lingo 的编程和调试有较大的提高，同时对 DAMA 带宽分配有了更深的理解. 通过这次作业，熟悉了优化在通信问题上的建模过程，提高了 Lingo 编程能力，对今后的学习将会有很大的促进作用。

摘　要　本文将 ATM 卫星通信系统中按需分配带宽的问题建模为非线性混合整数指配问题，然后将该非线性混合整数规划问题转化为线性混合整数规划问题，最后对该转化后的线性混合整数规划问题利用 Lingo8.0 优化软件进行求解，说明该模型是可行且有效的.

关键词　卫星通信，带宽，动态分配，ATM

卫星通信具有覆盖区域大，通信距离远，三颗同步卫星可以覆盖全球，频带宽，容量大，通信可靠性高，通信质量好，稳定，多址能力强，组网灵活，可实线区域及全球个人移动通信等特点，因此卫星通信在通信领域具有非常重要的意义. 扩展地面网络以包含卫星通信链路非常有意义，且非常有吸引力. 本文涉及 ATM 卫星通信网络中关于信道接入的 DAMA(按需分配多址) 协议. 该协议在保证系统的通信容量以及服务质量 QoS 等方面起着非常重要的作用.

带宽按需分配问题，即 DAMA 问题包括以下几个方面：在满足某种传输约束和容量约束情况下，最大程度满足各个信道连接对带宽资源的申请，同时要保持公平性，以及最小化小区时延变化. 本文将 ATM 卫星通信系统中带宽的按需分配归纳为一个非线性混合整数指配问题，然后将该非线性问题转化为一个线性混合整数规划问题，接着对该转化后的线性混合整数规划问题进行求解.

1. DAMA 指配问题

简单地说，卫星通信网络由用户终端 (ST), 网络控制器 (NC), 以及卫星组成．其中用户终端是多个，网络控制器是一个或者多个，卫星可以是一个或者多个．为了讨论简单，我们仅仅讨论了只有一个 NC 和一颗卫星以及多个用户终端 ST 的情况，而且只涉及上行链路中带宽资源的分配．具体示意图见图 1 .

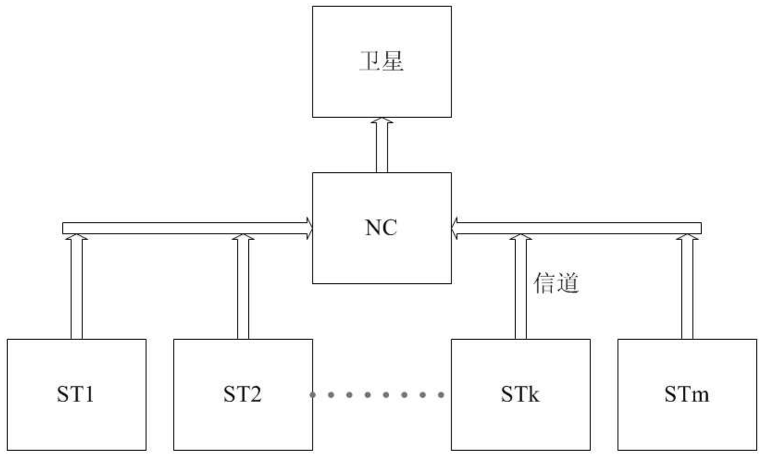

图 1. 卫星通信网络示意图

图中的 NC 代表网络控制器，它是网络的中心控制单元，负责各终端 ST 上行链路带宽的分配工作．由于所有的终端 ST 共享系统的带宽资源， NC 必须负责将带宽资源分配给各个终端 ST, 因此，该 DAMA 指配算法必须驻留在 NC 中． DAMA 算法的其它部分可以驻留在终端 ST 中．本文只涉及驻留在 NC 中的 DAMA 指配问题.

在建模之前，先简单地介绍一下 DAMA 带宽分配的过程．如果某 ST 需要申请带宽，则它必须明确给出每个优先级 (任何 ATM 服务都有指定的优先级) 所需的最大时隙 (slot) 个数和最小时隙个数．此时所设计的 DAMA 带宽分配算法便开始工作．举例来说，某 ST 建立了新的 ATM 连接后，想增加其带宽资源，就要向 NC 提出带宽申请，则 NC 中的 DAMA 算法便要通盘考虑整个系统带宽资源，根据各种约束情况来动态调整各终端的带宽．类似地，某 ST 断开某条 ATM 连接后，申请减少其已有的带宽资源，则 DAMA 算法也得执行动态调整过程.

本文 DAMA 算法需要解决的问题是合理地分配可用带宽 (信道以及时隙) 资源，以最大限度地满足各终端对带宽资源的需求．除此之外，还要尽量使小区时延变化 CDV 最小，且对所有的终端 ST 保持公平性.

2 DAMA 带宽分配问题的优化建模

下面为 DAMA 指配问题建立优化模型. 为表述方便，先给出一些集合，变量和参数的定义.

集合

- $\mathcal{I}$ － －用户终端 ST 所组成的集和;
- $\mathcal{J}$ － －业务优先级所组成的集合;
- $\mathcal{K}$ － －信道 (频率) 组成的集合;
- $\mathcal{L}$ － －一个信道中时隙所组成的集合.

i, j, k, l 分别为这些集合中的元素.

变量

该模型要用下面几个变量： x_{ikl}， z_{ij}， y_{ik}， $w_{il_1l_2}$. 具体含义如下：

x_{ikl} 表示分配给终端 ST 的信道和时隙数，是 (0,1) 变量，即

$$x_{ikl}=\begin{cases}1, & \text{信道 } k \text{ 中的时隙 } l \text{ 分配给终端 ST}i,\\ 0, & \text{其它情况.}\end{cases}$$

z_{ij} 表示分配给 STi 用于传输优先级为 j 的业务的时隙数，是整型变量.

y_{ik} 表示分配给 STi 的信道数，是 (0,1) 变量，即

$$y_{ik}=\begin{cases}1, & \text{信道 } k \text{ 中有时隙分配给终端 ST}i,\\ 0, & \text{其它情况.}\end{cases}$$

$w_{il_1l_2}$, 是 (0,1) 变量，具体为

$$w_{il_1l_2}=\begin{cases}1, & \text{ST}i\text{同时使用两相邻时隙}l_1\text{和}l_2\text{(两时隙之间没有其它的时隙存在)},\\ 0, & \text{其它情况.}\end{cases}$$

另外，为了表示带宽申请的满意度，还定义了变量 lb_j 和 ub_j, 用来表述每个带宽申请的 (该申请的优先级为 j) 满意度的下界和上界.

参数

a_{kl}, 表示信道 k 中时隙 l 的使用情况， (0,1) 参数，即

$$a_{kl}=\begin{cases}1, & \text{信道 } k \text{ 中时隙 } l \text{ 可以参与动态分配},\\ 0, & \text{其它情况.}\end{cases}$$

c_k, 容量参数，表示信道 k 中的可用的时隙数.

$\min_{ij}, \max_{ij}$, 表示 STi 在优先级 j 时申请的最大时隙数和最小时隙数.

ch_{max}, 表示可以分配给某个 ST 的最大信道数.

有了上述集合，变量和参数的定义后，下面开始建模. 首先根据第 1 节中 DAMA 分配过程及要求得到各个约束条件.

由于 ST 在每个时隙中只能传输一个频率，因此有

$$\sum_k x_{ikl} \le 1 \qquad \forall i, l. \tag{1}$$

假设只有一个 ST 可以分配得到一个可用时隙，则有

$$\sum_i x_{ikl} \le a_{kl} \qquad \forall k, l. \tag{2}$$

由于分配给 ST 的每个信道的时隙数不能超过该信道中总的可用时隙数，因此有

$$\sum_l x_{ikl} \le c_k y_{ik} \qquad \forall i, k. \tag{3}$$

同样，由于分配给某个 ST 的信道总数不能超过 ch_{max}, 因此有

$$\sum_k y_{ik} \le ch_{max} \qquad \forall i. \tag{4}$$

还有，分配给 ST 总的时隙数应等于该 ST 为各种优先级业务所申请的时隙数，即

$$\sum_{k,j} x_{ikl} = \sum_j z_{ij} \qquad \forall i. \tag{5}$$

每次分配应该在下面的范围内进行，即：

$$\min_{ij} \le z_{ij} \le \max_{ij} \qquad \forall i, j. \tag{6}$$

所有 ST 对资源分配的满意度应该尽量相等，以保持分配的公平性，因此有

$$lb_j \le \frac{z_{ij} - \min_{ij}}{\max_{ij} - \min_{ij}} \le ub_j \qquad \forall i, j. \tag{7}$$

最后，将变量 $w_{il_1l_2}$ 表述为

$$w_{il_1l_2} = \left(\sum_k x_{ikl_1}\right)\left(\sum_k x_{ikl_2}\right)\left(\prod_{l=l_1+l_2}^{l_2-1}\Big(1 - \sum_k x_{ikl}\Big)\right), \quad \forall i, l_1 < l_2. \tag{8}$$

如果时隙 l_1 没有分配给 STi, 则 (8) 式中的第一项为 0, 如果时隙 l_2 没有分配给 STi, 则 (8) 式中的第二项为 0, 如果分配给 STi 的时隙处于 l_1 和 l_2 之间，则 (8) 式中

的第三项为 0. 这是一个非线性约束.

下面来建立目标函数. 引入非线性目标函数如下

$$\xi = \lambda_\sigma \sum_{i,l_1<l_2} \left| w_{il_1l_2}(l_2 - l_1) - w_{il_1l_2}\frac{|L|}{D_i} \right| - \lambda_\chi \sum_{i,k,l} x_{ikl} + \lambda_l \sum_j (ub_j - lb_j). \qquad (9)$$

绝对值中的第一项 $w_{il_1l_2}(l_2 - l_1)$ 表示已经分配给 ST 的时隙 l_1 和 l_2 之间的时隙数. 绝对值中的第二项 $w_{il_1l_2}\frac{|L|}{D_i}$ 表示的意义：如果有 D_i 个时隙分配给了 STi, 则其中任意两个时隙间的最优距离 (即最优时隙数) 由该项给出. 此处， D_i 表示 STi 申请时隙数的平均值，即：

$$D_i = \frac{\sum\limits_j \min_{ij} + \sum\limits_j \max_{ij}}{2} \qquad \forall i.$$

该 D_i 选取与目标函数的线性转化有关系，选取上述 D_i 后，目标函数的线性转化过程相对简单一些. 该式中的权系数 $\lambda_\sigma, \lambda_\chi, \lambda_l$ 满足关系：

$$\lambda_\sigma + \lambda_\chi + \lambda_l = 1 \quad 且 \quad \lambda_\sigma + \lambda_\chi + \lambda_l \geq 0$$

在该目标函数中，第一项与小区时延变化量 CDV 有关，通过最小化目标函数，可以保证 CDV 尽量小；第二项与分配的带宽数量有关，通过对该量进行最大化 (即最小化所有 z_{ij} 的和的负值) 实现最大程度满足各终端对带宽资源的需求；第三项与带宽分配的公平性有关，通过最小化各优先级满意度的差别，尽量使各个终端的满意度相等.

现在， DAMA 指配问题的数学模型已经完整地给出. 它是一个非线性混合整数规划问题，目标函数由上面的 (9) 式给出，约束条件由 (1)-(8) 式给出. 将它重新书写为

$$\begin{aligned}
\text{minimize} \quad & \xi = \lambda_\sigma \sum_{i,l_1<l_2} \left| w_{il_1l_2}(l_2 - l_1) - w_{il_1l_2}\tfrac{|L|}{D_i} \right| - \lambda_\chi \sum_{i,k,l} x_{i,k,l} + \lambda_l \sum_j (ub_j - lb_j) \\
\text{subject to} \quad & \sum_k x_{ikl} \leq 1, \\
& \sum_i x_{ikl} \leq a_{kl}, \\
& \sum_l x_{ikl} \leq c_k y_{ik}, \\
& \sum_k y_{ik} \leq ch_{max}, \\
& \sum_{k,j} x_{ikl} = \sum_j z_{ij}, \\
& \min_{ij} \leq z_{ij} \leq \max_{ij}, \\
& lb_j \leq \tfrac{z_{ij} - \min_{ij}}{\max_{ij} - \min_{ij}} \leq ub_j, \\
& w_{il_1l_2} = \Big(\sum_k x_{ikl_1}\Big)\Big(\sum_k x_{ikl_2}\Big)\Big(\prod_{l=l_1+l_2}^{l_2-1}\Big(1 - \sum_k x_{ikl}\Big)\Big), \\
& i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}.
\end{aligned}$$

考虑到非线性混合整数规划问题求解的复杂性以及实际应用中的实时性等方面，需要将该非线性混合整数规划模型转化为线性混合整数规划模型，然后再求解.

3. 非线性混合整数规划转化为线性混合整数规划

引入变量 v_{il}, 即

$$v_{il} = \sum_k x_{ikl} = \begin{cases} 1, & \text{ST}i\text{使用任意信道中的时隙 } l, \\ 0, & \text{其它情况.} \end{cases}$$

由约束条件 (1) 可知该变量是 (0,1) 变量. 根据 $w_{il_1l_2}$ 的定义以及其可行性，由 (8) 式可得

$$v_{il_1} + v_{il_2} \geq 2w_{il_1l_2} + \frac{v_{il_1} + v_{il_2}}{M} \sum_{l=l_1+1}^{l_2-1} v_{il}, \quad \forall i, l_1 < l_2. \tag{10}$$

且

$$v_{il_1} + v_{il_2} - \left(1 + \sum_{l=l_1+1}^{l_2-1} v_{il}\right) \leq w_{il_1l_2}, \quad \forall i, l_1 < l_2. \tag{11}$$

对于 (10) 式，引入 (0,1) 变量 $u_{ill'}$, 令 $u_{ill'} = v_{il}v_{il'}$, 定义

$$v_{il} + v_{il'} \geq 2u_{ill'}, \quad \forall i, l < l'. \tag{12}$$

$$v_{il} + v_{il'} - 1 \leq u_{ill'}, \quad \forall i, l < l'. \tag{13}$$

这样，(10) 式可改写为：

$$v_{il_1} + v_{il_2} \geq 2w_{il_1l_2} + \frac{1}{M} \sum_{l=l_1+1}^{l_2-1} (u_{il_1l} + u_{ill_2}), \quad \forall i, l_1 < l_2. \tag{14}$$

此处 M 是一个充分大的整数.

为了去掉目标函数中的绝对值符号，引入两个非负变量 $p_{il_1l_2}$ 和 $q_{il_1l_2}$, 并令

$$w_{il_1l_2}(l_2 - l_1) - w_{il_1l_2}\frac{|L|}{D_i} = p_{il_1l_2} - q_{il_1l_2} \quad \forall i, l_1 < l_2.$$

如果 (9) 式绝对值中的差值为正数，令 $q_{il_1l_2} = 0$，即 $p_{il_1l_2} = w_{il_1l_2}(l_2 - l_1) - w_{il_1l_2}\frac{|L|}{D_i}$；反之，如果 (9) 式绝对值中的差值为负数，令 $p_{il_1l_2} = 0$，即 $q_{il_1l_2} = -\left(w_{il_1l_2}(l_2 - l_1) - w_{il_1l_2}\frac{|L|}{D_i}\right)$，这样，目标函数可以改写为

$$\xi = \lambda_\sigma \sum_{i,l_1<l_2} (p_{il_1l_2} + q_{il_1l_2}) - \lambda_\chi \sum_{i,k,l} x_{ikl} + \lambda_l \sum_j (ub_j - lb_j). \tag{15}$$

这样，得到一个线性混合整数规划问题 LMIP, 重新改写如下：

$$
\begin{aligned}
\text{minimize}\quad & \xi=\lambda_\sigma\sum_{i,l_1<l_2}(p_{il_1l_2}+q_{il_1l_2})-\lambda_\chi\sum_{i,k,l}x_{ikl}+\lambda_l\sum_j(ub_j-lb_j)\\
\text{subject to}\quad & \sum_k x_{ikl}\le 1,\\
& \sum_i x_{ikl}\le a_{kl},\\
& \sum_l x_{ikl}\le c_k y_{ik},\\
& \sum_k y_{ik}\le ch_{max},\\
& \sum_{k,j} x_{ikl}=\sum_j z_{ij},\\
& \min_{ij}\le z_{ij}\le \max_{ij},\\
& lb_j\le \tfrac{z_{ij}-\min_{ij}}{\max_{ij}-\min_{ij}}\le ub_j,\\
& v_{il_1}+v_{il_2}-\left(1+\sum_{l=l_1+1}^{l_2-1}v_{il}\right)\le w_{il_1l_2},\\
& v_{il}+v_{il'}\ge 2u_{ill'},\\
& v_{il}+v_{il'}-1\le u_{ill'},\\
& v_{il_1}+v_{il_2}\ge 2w_{il_1l_2}+\tfrac{1}{M}\sum_{l=l_1+1}^{l_2-1}(u_{il_1l}+u_{ill_2}),\\
& i\in\mathcal{I},j\in\mathcal{J},k\in\mathcal{K},l\in\mathcal{L}.
\end{aligned}
$$

4 求解

在求解该问题时，需要给出如下信息：网络的规模，传输以及容量约束，带宽需求，在进行带宽分配时网络的状态等. 对于网络的规模，可以由集合 $\mathcal{I},\mathcal{K},\mathcal{L}$ 中元素的个数来确定；对于传输和容量约束，可用 ST 使用信道数的最大值以及 ST 的传输限制来明确；对于网络的状态，可用信道数和时隙数来明确；对于带宽需求状况，可以根据各 ST 申请的信道和时隙的最大数量和最小数量来确定.

在数值实验前，假设系统中有 3 个用户终端 ST1 ， ST2 和 ST3 ，即集合 $\mathcal{I}$ 有三个元素，用 $|\mathcal{I}|=3$ 表示；系统中有 4 个上行信道，每个信道中有 10 个时隙，每种 ATM 业务有 3 种优先级，即 $|\mathcal{K}|=4$, $|\mathcal{L}|=10$, $|\mathcal{J}|=3$. 又假设最多可给任意一个终端 ST 分配 2 条信道，即 $ch_{max}=2$. 同时，考虑到要实现最大带宽分配，选取 $\lambda_\sigma=\lambda_l=0.05,\lambda_\chi=0.9$.

用 LINGO8 来求解， LINGO 程序见附页。

假设在带宽分配时，系统中 4 个信道共 40 个时隙的可用性 (即某时隙可以参与动态分配过程) 分如下三种情况 (在这三种情况下，每个 ST 申请的最少时隙数均匀分布在 [1,5] 之间，最大时隙数都为 10 。每个信道中不能参与分配的时隙数均匀分布在 [1,6] 之间，且这些不参与分配的时隙位置均匀分布在 [1,10] 之间) ：

第一种情况， 4 个信道中共 29 个时隙可以参与带宽动态分配过程，该 29 个时隙在

4 个信道中的分布如下表 1 所示：

第二种情况， 4 个信道中共 27 个时隙可以参与带宽动态分配过程，该 27 个时隙在 4 个信道中的分布如下表 2 所示：

第三种情况， 4 个信道中共 23 个时隙可以参与带宽动态分配过程，该 23 个时隙在 4 个信道中的分布如下表 3 所示：

表 1. 可供分配的 29 个时隙在 4 个信道中的分布

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	x	o	x	x	o	o	o	x	x	o
2	o	o	x	o	o	o	o	o	o	o
3	o	x	x	o	o	o	x	o	o	o
4	o	x	o	o	o	x	o	o	o	o

表 2. 可供分配的 27 个时隙在 4 个信道中的分布

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	o	o	x	o	x	o	o	x	x	o
2	o	x	o	o	x	o	o	o	x	o
3	o	o	x	o	o	o	o	o	o	o
4	x	o	x	x	o	o	o	x	x	o

表 3. 可供分配的 23 个时隙在 4 个信道中的分布

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	x	o	x	o	x	o	o	o	o	o
2	x	x	x	x	o	o	o	x	o	o
3	x	o	x	x	o	o	o	o	x	o
4	x	x	x	o	x	o	o	x	o	o

[注：] 以上表格中，行代表信道，即 4 个信道，列代表时隙，即每个信道有 10 个时隙，“ o ”代表该时隙可参与动态分配，而“ x ”表示该时隙不能参与动态分配。

5 数据分析和结论

针对上述三组数据， Lingo 运行结果，即时隙分配结果如下表 4-6.

表 4. 29 个时隙的分配示意

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	x	ST3	x	x	o	ST2	ST3	x	x	o
2	ST2	ST2	x	ST2	ST2	ST1	ST2	ST2	ST2	ST2
3	ST3	x	x	ST3	ST3	ST3	x	ST3	ST3	ST3
4	ST1	x	ST1	ST1	ST1	x	ST1	ST1	ST1	ST1

表 5. 27 个时隙的分配示意

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ST2	ST3	x	ST2	x	o	o	x	x	o
2	ST3	x	ST3	ST3	x	ST3	ST3	ST3	x	ST3
3	ST1	ST2	x	ST1	ST2	ST2	ST2	ST1	ST2	ST2
4	x	ST1	x	x	ST1	ST1	ST1	x	x	ST1

表 6. 23 个时隙的分配示意

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	x	ST2	x	ST3	x	o	ST2	ST2	ST3	ST2
2	x	x	x	x	ST1	ST1	o	x	ST1	o
3	x	ST3	x	x	ST3	ST3	ST3	ST3	x	ST3
4	x	x	x	ST1	x	ST2	ST1	x	ST2	ST1

[注：] 以上表格中，“ o ” 代表该时隙可参与动态分配，但在此次动态分配过程没有分配给任何终端使用，而 “ x ” 表示该时隙在此次动态分配过程中不能参与动态分配， ST1 表示它所在的时隙在此次动态分配过程中分配给 ST1 使用， ST2 表示它所在的时隙在此次动态分配过程中分配给 ST2 使用， ST3 表示它所在的时隙在此次动态分配过程中分配给 ST3 使用.

从以上结果可以看出，各个终端对带宽资源的需求都得到了满足，且没有发生将不可用时隙分配给某个终端的情况，说明该模型是正确的，有效的.

参考文献

[1] S.K. Biswas and Rauf izmailov. Design of a Fair Bandwidth Allocation Policy for VBR Traffic in ATM Networks. *IEEE/ACM Trans. Networking, Vol. 8, No. 2, 212-223, April 2000.*

[2] Thomas V. Huynh and David C. Gillen. Dynamic Bandwidth Allocation in a Satellite Communication Network. *Lockheed Martin Management and Data Systems.*