

文章编号: 1001-2486(2002)04-0037-05

一种基于多目标优化的 QoS 路由交互式算法*

汪泽焱

(解放军理工大学理学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了满足通信网络中一些特定业务对于多个网络指标性能的同时要求, 研究了一类基于多目标决策的 QoS 路由算法。通过选取带宽作为约束条件, 把时延和丢失率作为优化目标, 建立了 QoS 路由选择的多目标非线性整数规划模型, 并给出了一种求解模型的交互式算法。该算法通过逐步调整目标函数的上界, 压缩目标函数的搜索空间来满足决策者的要求和网络条件。实例计算结果表明了算法的可行性。

关键词: QoS 路由; 多目标非线性整数规划; 交互式算法

中图分类号: TN915.0 **文献标识码:** A

An Interactive Multiobject Optimization QoS Routing Algorithm

WANG Ze-yan

(Institute of Science, Science and Technology Univ. of PLA, Nanjing 210016, China)

Abstract: Some special tasks demand more than one object to be optimized at the same time in the communication network. To satisfy the demand, an interactive QoS routing algorithm based on multi-object decision-making is studied. A multi-object nonlinear integer programming model is established which minimizes the delay and loss rate constrained by the bandwidth. According to the character of the model, an interactive algorithm for solving the model is presented. The upper bounds of the objective functions considered are modified in each iteration step to adapt to the decision-maker's information and network needs currently, which compress the solution space. An example demonstrates the interactive algorithm is feasible.

Key words: QoS routing; multi-object nonlinear integer programming; interactive algorithm

近几年来, 人们对 QoS 路由问题进行了广泛的研究, 普遍认为 QoS 路由的基本问题是在满足多个约束条件的基础上对某个参数或多个参数进行优化^[1-4,7,8]。目前提出的 QoS 路由算法仅仅考虑了单目标优化的情况。比如 Chen^[2]提出了在满足时延条件下最小耗费路由算法以及满足带宽条件下最小耗费路由算法。文献 [3] 较为全面地描述了与网络 QoS 有关的参数, 并为计算不同 QoS 需求的路由提供了参考模型。文献 [7] 中建立了一个带有多约束条件最小时延的 QoS 路由选择的非线性整数规划模型, 并给出用线性整数规划迭代求精确解的算法。

但这些模型和算法不能满足通信网络中某些业务对多个目标 (如时延和丢失率) 的同时要求, 基于多约束的多目标优化模型可以更准确地反映这种路由选择问题。但是要找到满足多约束条件下的多目标优化路径是一个非常困难的问题^[5], 文献 [4] 中指出当路由选择的约束条件包含两个或两个以上的可加性参数, 或者包括可加性参数和/或可乘性参数的组合时, 该路由选择将是 NP-完全问题。文献 [8] 对同时优化时延和丢失率两个目标的 QoS 路由选择算法进行了初步研究, 但给出的求解算法比较烦琐, 而且也没有考虑网络需求的适时变化。

在多目标优化问题中, 绝大部分情况下是难以找到同时使得多个目标达到最优值的解。同时由于通信网络环境复杂多变, 决策者有时很难给出合乎实际的具体的 QoS 需求, 往往需要根据网络资源及时调整路由策略, 可能一会儿需要找较小时延路由, 一会儿又需要找较小丢失率路由。因此在通信网络中, 要求路由算法应能够根据决策者的需要以及当前网络的实际情况来找出满意的路由。通常由算法求解出问题的全部有效解, 让决策者在大量的有效解中选择满意解将是费时费量的。

交互式算法克服了以上不足。本文提出了一种基于多目标非线性整数优化的交互式算法。每当得

* 收稿日期: 2002-03-14
基金项目: 国防科技重点实验室基金 (00JS04. 4. 1. JB3801)
作者简介: 汪泽焱 (1972-), 男, 讲师, 硕士。

到一个有效解时，决策者可根据需要对当前的有效解提出修改方向，算法则根据这些信息确定下次计算的解空间。如果决策者的要求合乎实际，算法就能够求解出一个改进的有效解；否则决策者要调整其要求继续交互过程，或者在已求出的有效解中选择一个作为满意解。文中给出了通信网络抽象模型图，并选取带宽作为约束条件，把时延和丢失率作为 QoS 优化目标，建立了多目标非线性整数优化模型；详细给出了求解模型的交互式算法，给出了一个计算实例，并对计算结果作了简要分析。

1 问题描述和数学模型

为简化模型，将通信网络抽象成一个加权无向图 $G(V, E^*)$ ，如图 1 所示。集合 V 的元素称为节点，其中首、末节点分别代表通信网络中的源节点和目的节点，其它节点则代表网络中的网关节点；集合 E^* 的元素称为边，两节点之间可能存在多条边，用 e_{ij} 表示节点 i 到节点 $i + 1$ 的第 j 条边，其权值序列 $\langle b_{ij}, t_{ij}, l_{ij} \rangle$ 表示从节点 i 经过边 e_{ij} 到节点 $i + 1$ 的带宽、时延和数据包丢失率 ($i = 1, 2, \dots, m - 1; j = 1, 2, \dots, n_i$)

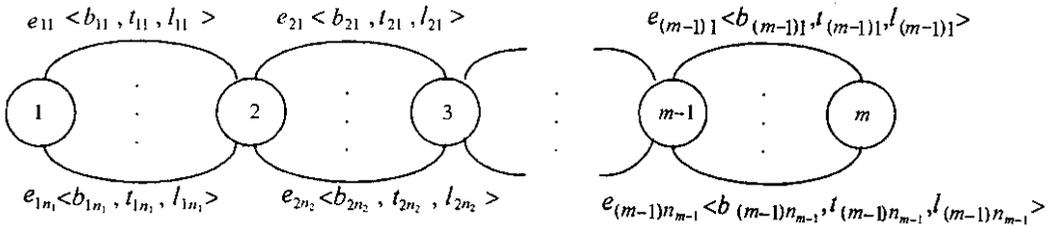


图 1 通信网络抽象模型图

Fig. 1 Communication network model

引入决策变量 x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m - 1; j = 1, 2, \dots, n_i$)，其取值为

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 到节点 } i + 1 \text{ 的第 } j \text{ 条边 } e_{ij} \text{ 被选为到目的节点的路由} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

这样从节点 1 到节点 m 的路由 P 的带宽 bandwidth (P)、时延 delay (P) 和丢失率 lose (P) 分别定义如下：

$$\text{bandwidth}(P) = \min \left\{ b_i = \sum_{j=1}^{n_i} b_{ij} x_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m - 1 \right\}$$

$$\text{delay}(P) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n_i} t_{ij} x_{ij}$$

$$\text{lose}(P) = 1 - \prod_{i=1}^{m-1} \left(1 - \sum_{j=1}^{n_i} l_{ij} x_{ij} \right)$$

设 B_0 是所求网络路由必须满足的最小带宽。寻找满足该带宽要求且具有最小时延和最小丢失率的通信路由可通过如下的多目标整数优化模型 (MOIP) 来求解：

$$\min F(x) = [F_1(x), F_2(x)] = \left(\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n_i} t_{ij} x_{ij}, 1 - \prod_{i=1}^{m-1} \left(1 - \sum_{j=1}^{n_i} l_{ij} x_{ij} \right) \right) \quad (2)$$

约束条件为：

$$\min \left\{ b_i = \sum_{j=1}^{n_i} b_{ij} x_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m - 1 \right\} \geq B_0 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, m - 1), x_{ij} \in (0, 1) \quad (i = 1, 2, \dots, m - 1; j = 1, 2, \dots, n_i) \quad (4)$$

其中，式(2)中 x 表示所有变量构成的向量，式(3)保证选出的路由必须满足带宽约束，式(4)则保证任意两相邻节点间仅有一条边被选中。设 X 是满足约束条件(3)和(4)的所有 x 构成的集合。

2 交互式 QoS 路由算法

定义 1 称 x^* 是模型 (MOIP) 的有效解, 如果不存在 X 中的 x , 使得不等式 $F_1(x^*) \geq F_1(x)$, $F_2(x^*) \geq F_2(x)$ 成立。

定义 2 设 (MOIP) 的两个目标函数 $F_1(x)$ 及 $F_2(x)$ 在约束条件 (3) 及 (4) 下的最优解分别为 x_1^* 、 x_2^* , 最优值分别为 F_1^* 、 F_2^* , 则称 $F^* = (F_1^*, F_2^*)$ 是 (MOIP) 的理想点。如果 $x_1^* = x_2^*$, 则令 $x^* = x_1^*$, x^* 称为 (MOIP) 的绝对最优解。

需要注意的是, (MOIP) 的绝对最优解不一定存在, 但有效解总是存在的^[5]。

令 $d_{\min} = \min(F_1(x))$, $d_{\max} = \max(F_1(x))$, $l_{\min} = \min(F_2(x))$, $l_{\max} = \max(F_2(x))$, 约束条件都是 (3) 和 (4)。显然有 $d_{\min} = F_1^*$, $l_{\min} = F_2^*$ 。

设 k 为正整数, 取 $r^k = (r_1^k, r_2^k)$, 使满足 $d_{\min} < r_1^k < d_{\max}$, $l_{\min} < r_2^k < l_{\max}$ 。记

$$S_k = \{x \mid x \in X \text{ 且 } F_1(x) \leq r_1^k, F_2(x) \leq r_2^k\} \quad (5)$$

考虑多目标优化问题 (MOIP1)

$$\begin{aligned} \min F(x) &= [F_1(x), F_2(x)] \\ \text{s.t. } &x \in S_k \end{aligned} \quad (6)$$

根据定义 1, 容易得到下面的结论。

定理 1 如果 x 是 (MOIP1) 的有效解, 则它也是 (MOIP) 的有效解。

考虑单目标优化问题 (SIP):

$$\begin{aligned} \min &\left[\frac{1}{r_1^k - d_{\min}} F_1(x) + \frac{1}{r_2^k - l_{\min}} F_2(x) \right] \\ \text{s.t. } &x \in S_k \subset E \end{aligned} \quad (7)$$

这是一个单目标非线性整数规划问题, 一些较为有效的求解方法可以参见文献[6]。

定理 2 如果 x^* 是 (SIP) 的最优解, 则它也是 (MOIP) 的有效解。

证明: 由定理 1 可知, 只要证明 x^* 是 (MOIP1) 的有效解即可。用反证法来证明。若 x^* 不是 (MOIP1) 的有效解, 则存在 $x \in S_k$, 使得 $F_1(x) \leq F_1(x^*)$, 且 $F_2(x) \leq F_2(x^*)$ 。因为 $(r_1^k - d_{\min})^{-1} > 0$, $(r_2^k - l_{\min})^{-1} > 0$, 从而不等式 $\left[\frac{F_1(x)}{r_1^k - d_{\min}} + \frac{F_2(x)}{r_2^k - l_{\min}} \right] < \left[\frac{F_1(x^*)}{r_1^k - d_{\min}} + \frac{F_2(x^*)}{r_2^k - l_{\min}} \right]$ 成立, 这与 x^* 是 (SIP) 的最优解矛盾。

根据定理 2, 只要求出 (SIP) 的最优解, 即可得到 (MOIP) 的有效解。由 (5) 式中 S_k 的构造, 我们提出一种交互式算法。此算法能够根据决策者的需要压缩目标空间, 让每个目标尽量达到决策者的要求, 快速地找到满意的 QoS 路由。

设 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 是预先取定的调整精度, 分别表示每次调整目标时的最小压缩范围。

算法具体步骤为:

Step 1 求理想点。即在约束条件 (3) 和 (4) 下求出 d_{\min} , d_{\max} , l_{\min} 和 l_{\max} 。如果理想点可达, 则绝对最优解存在, 算法结束; 否则转 Step 2。

Step 2 置 $k = 0$, 令 $r_1^k = d_{\max}$, $r_2^k = l_{\max}$, 求解问题 (SIP)。设最优解为 x^0 。

Step 3 置 $k = k + 1$, 且令

$$r_1^k = \begin{cases} F_1(x^0) & \text{时延参数需要调整} \\ d_{\max} & \text{时延参数不需要调整} \end{cases} \quad (8)$$

$$r_2^k = \begin{cases} F_2(x^0) & \text{丢失率参数需要调整} \\ l_{\max} & \text{丢失率参数不需要调整} \end{cases} \quad (9)$$

Step 4 设 $S_k = \{x \in X \mid F_1(x) \leq r_1^k, F_2(x) \leq r_2^k\}$, 表示决策者满意的有效解集合。如果决

策者的要求能够实现, 则 S_k 非空。

Step 5 求解单目标优化问题 (SIP), 如果是可行的, 求出其最优解 x^{k+1} ; 否则转 Step 7。

Step 6 如果决策者满意, 则停止交互过程, 算法结束; 否则转 Step 8。

Step 7 如果决策者愿意调整 QoS 需求 (即调整时延或丢失率的要求), 置

$$r_1^{k+1} = \begin{cases} r_1^k + \varepsilon_1 & \text{时延参数需要调整} \\ r_1^k & \text{时延参数不需要调整} \end{cases} \quad (10)$$

$$r_2^{k+1} = \begin{cases} r_2^k + \varepsilon_2 & \text{丢失率参数需要调整} \\ r_2^k & \text{丢失率参数不需要调整} \end{cases} \quad (11)$$

且置 $k = k + 1$, 返回 Step 4, 否则取有效解 x^{k+1} 为满意解, 停止交互过程, 算法结束。

Step 8 置

$$r_1^{k+1} = \begin{cases} F_1(x^{k+1}) - \varepsilon_1 & \text{时延参数需要调整} \\ r_1^k & \text{时延参数不需要调整} \end{cases} \quad (12)$$

$$r_2^{k+1} = \begin{cases} F_2(x^{k+1}) - \varepsilon_2 & \text{丢失率参数需要调整} \\ r_2^k & \text{丢失率参数不需要调整} \end{cases} \quad (13)$$

且置 $k = k + 1$, 返回 Step 4。

算法注释: 1) 若 S_k 是空集, 算法通过 Step 7 帮助决策者调整其需求使其更现实; 2) 若 S_k 非空, 且 x^{k+1} 不属于 S_k 时, 通过算法 Step 8 使得 $S_{k+1} \subseteq S_k$, 压缩解空间, 避免了盲目的搜寻, 有利于尽快地找到决策者满意的有效解。3) 若 S_k 非空, 且 x^{k+1} 属于 S_k 时, 交互过程在 Step 6 或 Step 7 就停止了。

实例: 设某通信网络的抽象模型如图 2 示 (带宽、时延单位分别为 kbps、ms)。

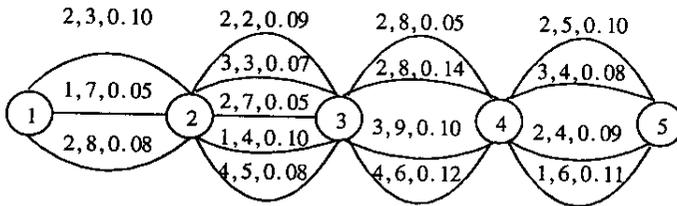


图 2 抽象的网络模型实例图
Fig.2 Network model of example

应用上述交互式算法求解从节点 1 到节点 5 的满足通信带宽不小于 2 的最短时延和最小丢失率的路由, 其中调整精度 $\varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = 0.01$, 计算过程如下:

第一步求得时延极值为 $d_{\max} = 29, d_{\min} = 15$, 其最优解 (时延取最小值时的解) 为 $x_{11} = x_{21} = x_{34} = x_{42} = 1$ 和 $x_{11} = x_{21} = x_{34} = x_{43} = 1$, 其余 $x_{ij} = 0$; 求得丢失率极值为 $l_{\max} = 0.3661, l_{\min} = 0.2361$, 最优解 (丢失率取最小值时的解) 为 $x_{12} = x_{23} = x_{31} = x_{42} = 1$, 其余 $x_{ij} = 0$ 。检查两个最优解不等, 即不存在绝对最优解, 理想点不可达。

第二步执行算法 Step 2 ~ 7 的交互过程, 结果如表 1 所示。

表 1 实例计算结果

Tab.1 Results of example

迭代步 k	时延	丢失率	需调整参数	r_1^k	r_2^k	解 x_{ij}
0	18	0.2685	时延	17	0.3661	$x_{11} = x_{22} = x_{31} = x_{42} = 1$, 其余 $x_{ij} = 0$
1	16	0.3224	丢失率	17	0.3124	$x_{11} = x_{22} = x_{34} = x_{42} = 1$, 其余 $x_{ij} = 0$
2	17	0.2842	/	/	/	$x_{11} = x_{21} = x_{31} = x_{42} = 1$, 其余 $x_{ij} = 0$

算法第一次求解得到时延为 18ms, 丢失率为 0.2685 的路由 ($x_{11} = x_{22} = x_{31} = x_{42} = 1$), 决策者认为时延偏大, 算法调整时延参数; 第二次得到时延为 16ms, 丢失率为 0.3224 的路由 ($x_{11} = x_{22} = x_{34} = x_{42} = 1$), 决策者认为时延满意, 但丢失率偏高, 算法调整丢失率参数; 第三次得到时延为 17ms, 丢失率为 0.2842 的路由 ($x_{11} = x_{21} = x_{31} = x_{42} = 1$), 决策者认为满意, 算法结束。

3 结束语

通信网络中的 QoS 路由算法不仅要关注某些业务对多个目标的同时要求, 同时也要考虑瞬息万变的网络环境。本文选取带宽作为约束条件, 把时延和丢失率作为 QoS 优化目标, 建立了 QoS 路由选择的多目标非线性整数优化模型, 并给出了结合决策者需求的交互式算法。

从数学模型可以看出, 提出的模型可以方便地扩展到求解基于多个参数约束的多目标路由优化问题, 只需在多目标优化模型 (MOIP) 中添加相应的参数约束条件和所求的目标函数即可。从算法描述和计算实例可以看出, 本文提出的求解算法综合考虑了决策者的主观意志和网络的实时变化。由此可见, 文中提出的模型和算法对于通信网络中的 QoS 路由选择具有一定的实际意义。

参考文献:

- [1] Xiao Xipeng, Lionel M Ni. Internet QoS: A big picture [J]. IEEE Network, 1999, 13(2): 8-18.
- [2] Shigang Chen, Klara Nahrstedt. Distributed Quality-of-Service routing in ad hoc network [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(8): 1488-1505.
- [3] 冯径, 马小骏, 顾冠群. 适应 QoS 路由机制的网络模型研究 [J]. 计算机学报. 2000. 23(8): 799-805.
- [4] Wang Zheng, Crowcroft Jon. Quality of service routing for supporting multimedia applications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1228-1234.
- [5] Fandel G, Gal T. Multiple Criteria Decision Making - Theory and Application [M]. Springer-Verlag, 1980.
- [6] Nemhauser G L, Wolsey L A. Integer and Combinatorial Optimization [M]. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- [7] 刘千里, 汪泽焱, 倪明放等. 一种基于多条件约束的 QoS 路由选择优化算法 [J]. 计算机研究与发展, 2001, 38(3): 275-278.
- [8] 汪泽焱, 倪明放. 基于线性约束的多参数优化的 QoS 路由算法 [J]. 计算机工程. 2002, 28(3): 53-55.

