

多目标的 Internet 路由优化控制算法

刘 红¹, 白 栋², 丁 炜¹, 曾志民¹

(1. 北京邮电大学宽带通信网络实验室, 北京 100876; 2. 北京大学卫星通信实验室, 北京 100871)

摘 要: 研究通过优化链路权值以控制网络路由来实施流量工程. 以网络拥塞最小化和时延最小化为流量工程目标, 建立了多目标的全局路由优化数学模型. 求解该问题是 NP 困难的, 提出一种混沌群搜索优化算法进行求解. 算法采用群局部搜索, 利用混沌变量产生一组分布好的初始解, 并在邻域搜索进程中应用扩展贪心思想, 提高了算法的全局搜索能力. 仿真结果表明所提算法能够有效减少由于流量分布不平衡造成的网络拥塞, 同时限制长路径, 提高了网络性能.

关键词: 流量工程; 路由; 拥塞; 时延; 局部搜索

中图分类号: TN393. 02 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 02-0306-04

Internet Routing Optimization Control Algorithm with Multiple Objectives

LIU Hong¹, BAI Dong², DING Wei¹, ZENG Zhi2min¹

(1. Broadband Communication Network Lab, Beijing University of Posts and Telecomm, Beijing 100876, China;

2. Satellite Communication Lab, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Internet routing control by link weights optimization with traffic engineering objectives is studied. It is modeled as a mathematical programming problem with the objectives of network congestion minimization and delay minimization. It is a NP-hard problem, and a chaotic group search algorithm based on local search is proposed, which makes use of chaos variable to find initial solutions with favorable distribution, and applies extended greedy principle to local search process to increase global search ability. Simulation results manifest that it improves network performance with decreased congestion probability caused by unbalanced traffic distribution, and restricted extra path hops.

Key words: traffic engineering; routing; congestion; delay; local search

1 引言

为满足日益增长的业务需求, 当前的 Internet 必须能够提供有保证的业务质量. 流量工程是实现这一目标的关键技术. 流量工程的主要目的就是优化网络资源利用率, 提高网络性能^[1]. 路由优化是实现流量工程目标的重要策略之一. 目前 Internet 上应用最为广泛的内部网关协议是 OSPF (Open Shortest Path First 开放最短路径优先). 它采用 SPF (Shortest Path First 最短路径优先) 算法选路, 即网络中的每一条链路与一个可管理的权值相关, SPF 总是选择链路权值总和最小的路径. 因此通过恰当地调整设置网络中各链路的权值, 即可以对网络路由进行控制, 达到流量工程目标. 与基于 MPLS (Multiprotocol Label Switching 多协议标签交换) 实现流量工程的方式相比, 这种方式保持了 IP 网络的无连接特性, 以及由此带来的简单性和良好的可扩展性, 这是 IP 网络获得巨大成功的重要原因.

Cisco 建议将链路权值设置为 $1/q$ (q 为链路容量), 这种

方式没有利用网络中流量分布信息, 因此不能很好地利用网络资源. Khanna 等早期研究者们提出将链路权值与当前链路上的负载状态对应起来以避免拥塞^[2,3], 这种方法会带来频繁的路由改变, 导致网络不稳定. Fortz 等建立了以平衡网络流量分配为目标的链路权值全局优化模型^[4], 并提出一种启发式算法求解该 NP-hard 优化问题. Fortz 的研究说明了优化链路权值对于改善网络性能的重要意义. Wang 等研究发现通过求解路由优化问题的对偶问题, 可以得到一组链路权值, 使得通过 SPF 算法得到的路由与求解线性规划问题得到的最优路由一致^[5], 但需要在等价最短路径中任意分配流量, 这在实际网络中是难以实现的.

在上述的研究工作中, 只是注重了网络负载均衡, 忽略了对路径传输时延的控制, 而后者对于 QoS 的影响不容忽视. 本文以拥塞最小化和时延最小化为目标, 建立了多目标全局路由优化数学模型, 并提出一种基于局部搜索的混沌群搜索算法进行求解.

2 多目标的路由优化数学模型

用 $G=(V, E)$ 描述基本的网络拓扑, V 是网络节点集合, E 是链路集合. 对任意 $(i, j) \in E$, c_{ij} 表示该链路的容量. K 为业务量需求集合, $P \subseteq K$, 用三元组 (s_k, t_k, K_k) 表示, 其中 s_k, t_k 分别是入口节点与出口节点, K_k 是带宽需求. f_{ij}^k 表示链路 (i, j) 上承载的第 k 业务流的流量大小, r_{ij} 表示链路 (i, j) 的总负载.

这里的优化目标是实现网络拥塞最小化的同时使路径时延最小化. 以控制拥塞为目标的主要原因在于网络拥塞是导致网络性能下降, 丢包率增大的一个主要原因^[1]. 如果网络拥塞减少了, 相应的分组丢失率会降低, 网络的总吞吐量会增加, 用户得到的服务质量就会提高. 另一方面, 时延是保证业务质量的一个基本要素, 限制选择没有必要的长路径, 可以减少网络负载总量和总传输时延. 文^[1]中指出可以用最大链路利用率 A 来表征网络的拥塞程度, 通过最小化最大链路利用率来达到负载均衡, 减少拥塞. 定义网络拥塞代价 $\langle^A(f) = A$, $A = \max_{(i,j) \in E} A_{ij}$, 其中 $A_{ij} = r_{ij} / c_{ij}$.

路径时延包括两个基本的元素^[6]: 传播时延和队列时延. 队列时延可以通过链路利用率来反映, 下面只考虑传播时延. 设 d_{ij} 是链路 (i, j) 的传播时延, 若取 $d_{ij} = 1$, 则是用跳数衡量时延. 时延代价 $\langle^d(f)$ 的定义见式(1).

$$\langle^d(f) = \sum_{(i,j) \in E} \langle_{ij}^d(f) = \sum_{(i,j) \in E} \left(d_{ij} \# \sum_{k \in K} f_{ij}^k \right) \quad (1)$$

多目标的路由优化的数学模型可以用式(2)~(6)表述. 式(2)为优化目标, 式(3)是对节点的流量限制, 式(4)是链路负载, 式(5)是对链路上承载的业务流的限制.

$$\min \langle(f) = \{ \langle^A(f), \langle^d(f) \} \quad (2)$$

subject to

$$\sum_{j: (i,j) \in E} f_{ij}^k - \sum_{j: (j,i) \in E} f_{ji}^k = \begin{cases} K_k, & \text{if } i = s_k \\ -K_k, & \text{if } i = t_k \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

$$P \subseteq I \subseteq V, k \in K \quad (4)$$

$$r_{ij} = \sum_{k \in K} f_{ij}^k, P(i, j) \in E \quad (4)$$

$$0 \leq f_{ij}^k \leq K_k, P(i, j) \in E, k \in K \quad (5)$$

下面采用权值法结合距离法将该多目标优化问题进行转化, 将式(2)的多目标优化转化为式(6)的单目标优化问题. 其中 \langle^A^* 和 \langle^d^* 分别为网络拥塞代价和时延代价的理想值. D 为权重因子, $0 \leq D \leq 1$, 用于衡量拥塞代价和时延代价的优先级.

$$\min \langle(f) = D \left| \frac{\langle^A(f) - \langle^A^*}{\langle^A^*} \right| + (1 - D) \left| \frac{\langle^d(f) - \langle^d^*}{\langle^d^*} \right| \quad (6)$$

根据 SPF 的原理, 路由的优化可以通过确定一组恰当的权值 $w^* = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_M^*\}$ (M 为链路数目) 来实现, 该问题的求解是 NP 困难的.

3 混沌群搜索优化启发式算法

局部搜索是求解组合优化问题中具有计算复杂性 NP 问题的有效方法之一, 它是基于贪心思想, 从任一解出发, 通过对其邻域的不断搜索和当前解的替换来实现优化^[7]. 我们提

出一种基于局部搜索的混沌群搜索算法(CGLSA: Chaotic Group Local Search Algorithm)来求解多目标路由全局优化控制问题的非劣解. 先利用混沌变量得到一组分布好的初始解, 从多个初始解出发分别进行邻域搜索, 各搜索过程独立进行, 选取其中的最优解作为最终解.

3.1 初始解的计算

由于混沌运动具有遍历性、随机性等特点, 能在一定范围内按其自身的规律不重复地遍历所有状态, 因此如果利用混沌变量生成初始解会比随机产生更具有优越性^[8]. 选用式(7)所示的 Logistic 映射, 其中 L 是控制参量, 取 $L = 4$. 利用混沌运动对初值敏感的特点, 赋予式(7) 1 个微小差异的初值即可得到 1 个轨迹不同的混沌变量 x_i^j . 第 i 群搜索的初始解 $w^i = \{w_1^i, w_2^i, \dots, w_M^i\}$, w_i^j 用式(8)计算, 其中 MAXWT 为预定义的最大权值, $\text{Mod}(f, \#)$ 为取整操作.

$$x^{i+1} = Lx^i(1 - x^i) \quad (7)$$

$$w_i^j = \text{Mod}(1 + x_i^j \text{MAXWT}) \quad (8)$$

3.2 邻域的定义

设 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_M\}$, 定义 w 的邻域 $J(w) = \{wc \mid S(wc, w) = 1\}$, $S(wc, w)$ 是 wc 和 w 间不同元素的数目, 即仅有一条链路的权值发生了改变, 并且符合下面的条件: 使先前经由的某条(或某些条)业务流发生转路, 并且转路的业务流数目最少. 设节点对 (s_k, t_k, K_k) , $k \in K$, s_k, t_k 间的最短路径用 p_k 表示, 其长度为 h_k . 设 $l \in E \subseteq \bigcup_{k \in K} p_k$, h_k^l 表示从网络中断开链路 l 后, s_k, t_k 间的最短路径的长度变化. 若改变链路 l 的权值为 $w_l' \setminus w_l + \$h_k^l$, s_k, t_k 间的最短路径将从链路 l 转路, 即 $l \in p_k$. 同理, 对 $P \subseteq I \subseteq K \subseteq \bigcup_{k \in K} p_k$, 都能计算得到这样一个阈值 $\$h_k^l$. 不妨设 $\$h_k^l < \h_k^e , 若改变链路的权值为 $w_l' > w_l + \$h_k^l$, $\$h_k^l < \$h_k^e < \$h_k^e$, 那么 $i \in K$ 的最短路径将从链路 l 转路, 而 $i \in K$ 仍然经由 l . 因此通过控制链路权值的调节, 可以控制业务流最短路径的改变.

设 $\$h_k^l$ 表示在屏蔽链路 l 后, 所有业务流最短路径改变的最小值, $\$h_k^2$ 表示次小值, k_1^l 表示最短路径改变最小的业务流, k_2^l 表示最短路径改变次小的业务流, 则可以取链路 l 的权值变化 $\$h^l = (\$h_{k_1^l}^l + \$h_{k_2^l}^l) / 2$.

3.3 扩展贪心思想

在判断是否接受新解时, 贪心思想只接受优于当前解的状态作为下一当前解, 这里采用扩展贪心思想, 来改善局部搜索算法的全局搜索性能. 设 $w^j = J(w^i)$, 若 $\langle(w^j) < \langle(w^i)$, 仍然接受 w^j , 将其作为下一当前解, 同时采用 HASH 表的方法避免重复搜索. 仿真表明这样大大增加了跳出局部最优解概率.

4 仿真分析

我们采用应用非常广泛的 Waxman 模型^[9]生成仿真网络. 网络模型图中边 (u, v) 的生成概率由式(9)决定. d 是 (u, v) 之间的欧式距离, L 为网络中任意两点间的最大距离.

$$P(u, v) = Ge^{-d(u,v)/L}, 0 \leq G \leq 1, B \leq 1 \quad (9)$$

对节点对 (s, t) , 取三个随机数 $O_s, D_t, C_{(s,t)} \in [0, 1]$, 则 s, t 之间的业务量用式(10)计算^[4], C 为正常数. 设各链路的

容量均为 155.

$$K(s, t) = CO_{ij} C_{s,t} e^{-d(s,t)/2L}, 0 \leq O_s, D_t, C_{s,t} \leq 1 \quad (10)$$

4.1 负载均衡

在式(6)中, 设 $D=1$, 即只考虑负载均衡. 将本文算法与以下四种权值设定方法进行比较: (1) InvCapOSPF, 即链路权值与链路容量的倒数成正比; (2) L2OSPF, 即链路权值与两节点的距离成正比; (3) RandomOSPF, 即随机设定链路权值; (4) UnitOSPF, 即各链路权值都设为同一个值, 如单位值 1. 当各链路的容量都相同时, 式(1)和(4)的方法是等价的. 采用式(9)和式(10)的方法分别生成节点数为 14, 30 和 60 的仿真网络及相应的业务量需求集合, 进行了大量的仿真, 仿真结果如图 2

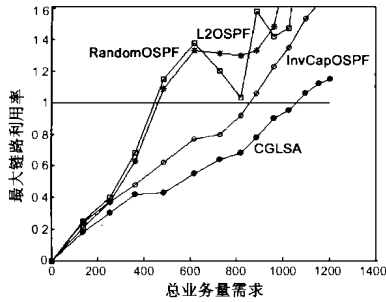


图 2 14 个节点的网络

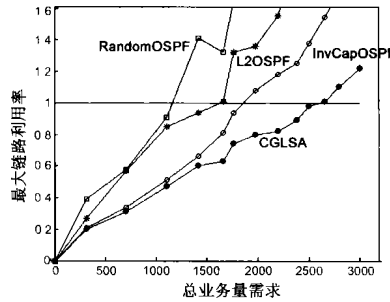


图 3 30 个节点的网络

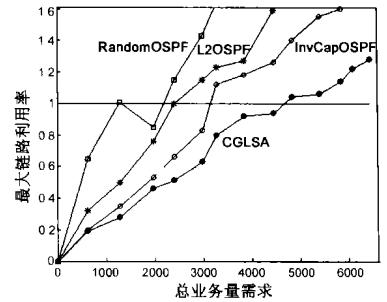


图 4 60 个节点的网络

4.2 综合优化目标

下面对式

(6) 中的加权参数 D 对综合优化目标值的影响进行仿真分析. 选择 60 个节点的仿真网络, 总业务流需求 $T = 3283$. 取 $d_{ij} = 1$, $P(i, j) = I/E$, 在

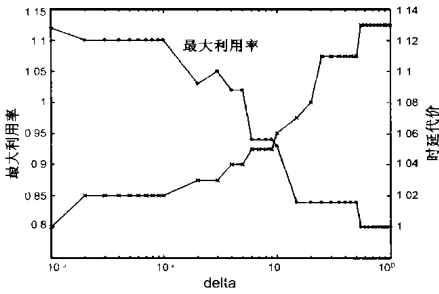


图 5 加权参数 D 的变化

$[0, 1]$ 之间变化参数 D , 相应计算得到的最大链路利用率以及时延代价的变化如图 5 所示. 为了便于比较, 图中的时延代价是进行了归一化处理后的值, 用式(11)和(12)计算. 这里 h_k 为各链路权值均设为 1 时计算得到的最小跳数路径长度, d_s^d 为优化得到的时延代价. 在本文仿真网络中计算得到 $h_{uncap} = 10946$, 则 $d_s^d = h_{uncap} = 10946$.

$$h_{uncap} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K h_k \quad (11)$$

$$d_s^d = d_s^d / h_{uncap} \quad (12)$$

可以看到, 随着 D 的增加, 最大链路利用率(拥塞代价)在综合优化目标中所占的权值越来越大, 它的降低是以增加的时延代价为代价的. 并且最大链路利用率和时延代价都呈现出明显的阶梯状的变化, 这是由于根据优化原则, 重载链路上的负载将尽可能向轻载链路上转移, 因此优化的结果会出现一些转折点. 对不同的网络, 可以获得不同的加权参数变化曲线图, 它可以作为选择合适的 D 值的一个依据, 以平衡网络的拥塞代价和时延代价.

~ 图 4 所示. 这里没有限制 $A < 1$, 当 $A > 1$ 时, 表示在当前的网络流量分配状况下, 网络的负载超过其承载能力的程度.

可以看到 RandomOSPF 和 L2OSPF 的性能都比较差, 并且出现大的跳跃, 性能不可控. InvCapOSPF 的方法较前两者有较好的改善, 但由于它只考虑了局部信息, 因此不可避免地仍然具有较强的局限性. 在网络相对业务量很小的时候, CGLSA 算法相对于 InvCapOSPF 的优化效果不很明显. 随着业务量的增加, 在网络负载越是沉重, 路由越需要优化的时候, CGLSA 的优化意义与效果也越为明显. 利用 CGLSA 算法优化网络全局路由之后, 业务流的分布得到了良好的平衡, 网络的服务能力因而大大提高.

5 总结

本文提出一种混沌群搜索算法, 求解以拥塞最小化和时延最小化为目标的全局路由优化控制问题, 算法具有以下特点: 不同于局部优化, 以全局路由优化为目标; 采用群局部搜索, 利用混沌特性得到一组分布好的初始解, 并应用扩展贪心思想, 提高了算法的全局搜索能力.

参考文献:

- [1] AWDUCHE D, CHIU A, et al. Overview and principles of Internet traffic engineering[S]. IETF RFC 3272, May 2002.
- [2] KHANNA A, ZINKY J. The revised ARPANET routing metric[A]. ACM SIGCOMM[C]. Austin, TX, 1989. 45- 56.
- [3] GLAZER D W, TROPPER C. A new metric for dynamic routing algorithms[J]. IEEE Trans. on Comm, 1990, 38(3): 360- 367.
- [4] FORITZ B, THORUP M. Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights[A]. INFOCOM 2000[C]. Israel, 2000. 519- 528.
- [5] WANG Y F, WANG Z, et al. Internet traffic engineering without full mesh overlaying[A]. INFOCOM 2001[C]. Anchorage, 2001, 565- 571.
- [6] WANG Z, CROWCROFT J. QoS routing for supporting resource reservation[J]. IEEE J. on Selected Areas in Comm, 1996, 14(7): 1228- 1234.
- [7] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [8] 李兵, 蒋慰孙. 混沌方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613- 615.
- [9] WAXMAN B M. Routing of multipoint connections[J]. IEEE J. on Selected Areas in Comm, 1988, 6(9): 1617- 1622.