

GMPLS 光网络中流量工程研究

王 辉, 张 健

(南京工业大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 211816)

摘 要: 引入并改进 NSGA-II 算法, 用于解决 GMPLS 光网络的流量工程问题. 首先给出流量工程问题数学模型; 然后提出一个基于线性规划和 NSGA-II 的混合启发性算法; 最后对算法进行仿真, 将结果与车比雪夫精确算法所得结果进行比较, 验证了本算法的有效性.

关键词: 多协议标签交换; 非支配排序遗传算法; 流量工程; 多目标优化

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)05-0067-04

The Research on Traffic Engineering in GMPLS Optical Networks

WANG Hui, ZHANG Jian

(Electronic and Information Engineering College, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: In this paper, we introduce and devise Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) for solving the constrained multipath traffic engineering problem in GMPLS optical networks. A formulation of this problem as a multiobjective constrained optimization is first extended. Then, we develop a hybrid heuristic algorithm based on linear programming. We also compare the performance of the proposed heuristic using a similar problem adopted from the literature with the exact solutions generated using a lexicographic Chebyshev method.

Key words: GMPLS; non-dominated sorting genetic algorithm; traffic engineering; multiobjective optimization

1 引言

近年来,随着光网络中数据量的激增以及对支持服务质量(QoS)的应用要求的提高,流量工程已经成为了光网络操作中必不可少的一部分.目前,已有的流量工程算法通常基于最短路径转发数据包,不支持数据流量分流,从而在路径选择不具有很强的灵活性^[1].针对流量工程的优化,很多研究者建立了许多具有不同目标函数和对应解决方案的数学模型,但绝大多数都是着重于单个目标的优化研究.这种算法在计算最短路径的时候没有考虑到对后续流量请求的影响,当前的一次流量分配可能会引起许多其他后续流量请求的阻塞.鉴于此,通过对CSPF协议的扩展可以实现将数据请求分流在多条路径上转发,这种方案的特点是目标之间的权衡,但多目标优化问题是NP完全问题.因此,在解决此类多目标优化问题时更倾向于使用启发性算法^[2].

本文研究了当前在解决其它领域的多目标优化问题上比较成熟和有效的NSGA-II算法,并将它进行适当改进用于GMPLS光网络的流量工程优化.

2 GMPLS 光网络流量工程模型

本文将GMPLS网络用有向图 $G=(V,E)$ 表示,其中 V 表示节点集合, E 表示链路集合, $|V|$ 和 $|E|$ 分别表示节点数和链路数. u_m 表示链路 $m(m \in E)$ 容量.文中假设网络拓扑和邻接矩阵 A 均已给出.需求矩阵用 D 表示,它的大小为 $|V| \times |V|$.

三元组 (i_t, e_t, d_t) 定义一个流量请求 t ,其中 i_t 表示网络入口LSR, e_t 表示网络出口LSR, d_t 表示请求 t 所需要的带宽.表1中给出了数学模型所用符号的详细说明^[3].

表2给出了流量工程优化问题的数学模型.其中,等式(2)约束条件确保请求的每一个分流都能得到转发处理;不等式(3)约束条件确保网络中没

有出口流向入口的回流;等式(4)和不等式(5)确保每一条链路上承载的数据流量不会超过链路的容量;等式(12)确保如果请求 t 没有使用路径 p_l^t , 则 x_l^t 的值被强制设为 0;等式(13)确保如果路径 p_l^t 上有数据分流的话, 则 y_l^t 的值被设为 1, 其中 ϵ 表示在被选中情况下, 每条路径上数据流量值的下限;等式(14)用来为每个流量请求的分流数目设置一个上限值 K , 其中 x_l^t 表示流量请求 t 在路径 p_l^t 上分流的数据流量. 对于每一个流量请求, 若没有设置一个分流数目上限值, 则问题最优解不具有统一的分流规则. 本文中, 在仿真时 K 取值参考文献[4]取 2. 模型中一共有两个目标函数: 路由开销目标函数以及均衡负载开销目标函数.

表 1 符号总结

索引符号:

$t \in T$: 流量请求符号

$m \in E$: 链路符号

$l = 1, 2, \dots, L_t$: 流量请求可行路径索引

常量:

T : 流量请求集合

E : 链路集合

L_t : 流量请求 t 的可行路径数目

d_t : 流量请求 t 所申请的带宽

u_m : 链路 m 的容量(带宽)

c_m : 链路 m 上单位流量产生的路由开销

$a_{l,m}^t$: 如果链路 m 包括在路径 l 中其值为 1, 反之为 0

k_t : 流量请求 t 的最大分流数目

h_t : 流量请求 t 的最大跳数

C_l^t : 单位流量在路径 l 上产生的路由开销

N : 可行路径总数

ϵ : 每条路径上的流量下限值, 为一个大于 0 的变量;

x_l^t : 流量请求 t 在路径 l 上的分流流量

y_l^t : 如果请求 t 的分流使用路径 l , 则其值为 1, 反之为 0

g_m : 链路 m 上的负载

φ_m : 链路 m 的均衡负载开销

2.1 路由开销目标函数

定义每单位数据流量在链路 m 上产生的路由开销值设为 c_m , 每单位数据流量在路径 l 上所产生的路由开销即为 l 所包含的所有链路产生的路由开销总和, 用 C_l^t 表示, 有

$$C_l^t = \sum_{m \in E} c_m a_{l,m}^t,$$

式中, x_l^t 表示流量请求 t 在路径 p_l^t 上分流的数据流量. 因此, 路由开销目标函数: $\sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{L_t} C_l^t x_l^t$

表 2 问题数学模型

目标函数:

$$\min(\sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{L_t} C_l^t x_l^t, \sum_{m \in E} \varphi_m) \quad (1)$$

限制条件:

$$\sum_{l=1}^{L_t} x_l^t = d_t, \forall t \in T \quad (2)$$

$$x_l^t \geq 0, \forall t \in T \text{ 以及 } \forall l \in \{1, 2, \dots, L_t\} \quad (3)$$

$$g_m = \sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{L_t} a_{l,m}^t x_l^t, \forall m \in E \quad (4)$$

$$g_m \leq u_m, \forall m \in E \quad (5)$$

$$\varphi_m \geq g_m, \forall m \in E \quad (6)$$

$$\varphi_m \geq 2g_m - (1/2)u_m, \forall m \in E \quad (7)$$

$$\varphi_m \geq 5g_m - (23/10)u_m, \forall m \in E \quad (8)$$

$$\varphi_m \geq 15g_m - (93/10)u_m, \forall m \in E \quad (9)$$

$$\varphi_m \geq 60g_m - (453/10)u_m, \forall m \in E \quad (10)$$

$$\varphi_m \geq 300g_m - (2613/10)u_m, \forall m \in E \quad (11)$$

$$x_l^t \leq d_t y_l^t, \forall t \in T, \forall l \in \{1, 2, \dots, L_t\} \quad (12)$$

$$\epsilon y_l^t \leq x_l^t, \forall t \in T, \forall l \in \{1, 2, \dots, L_t\} \quad (13)$$

$$\sum_{l \in \{1, 2, \dots, L_t\}} y_l^t \leq K, \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{L_t} y_l^t = N \quad (15)$$

$$y_l^t \in \{0, 1\}, \forall t \in T, \forall l \in \{1, 2, \dots, L_t\} \quad (16)$$

2.2 负载均衡开销目标函数

负载均衡目标函数主要是为了将数据流量均匀的分流在各条链路之上. 本文采用文献[3]中给出的一个以链路负载流量为自变量的分段凸线性函数. 图 1 给出了链路容量为 1 单位流量/秒的链路的均衡负载开销函数的图形. 其数学模型由表 2 中式(6)~(11)给出. 其中, φ_m 为链路 m 上的均衡负载开销, g_m 为链路 m 上承担的负载流量总和, 有

$$g_m = \sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{L_t} a_{l,m}^t x_l^t.$$

均衡负载开销目标函数: $\sum_{m \in E} \varphi_m$.

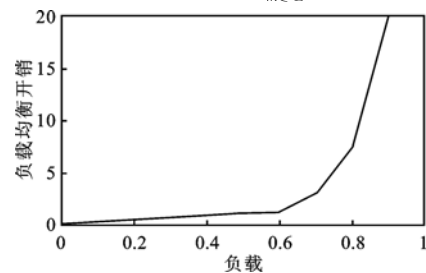


图 1 容量为 1 的链路负载均衡开销函数

3 基于 NSGA-II 流量工程算法

NSGA-II 使用带有精英策略的快速非支配排序算法和种群多样性维持机制提高了算法的效率^[5]. 图2给出了 NSGA-II 的操作流程说明. 它由拥有 N 个个体的第 t 代父种群 P_t 开始, 使用遗传操作产生同样拥有 N 个个体的第 t 代子种群 Q_t . 再将父子种群合并组成一个拥有 $2N$ 个个体的种群第 t 代父种群 R_t 并对其进行非支配排序, 产生一系列非支配解集 F_i 并计算拥挤度. 非支配集 F_1 中包含的个体是 R_t 中最好的, F_2 其次, 以此类推. 然后将非支配解集从 F_1 开始按顺序逐个添加到新一代父种群 P_{t+1} 中, 直到 P_{t+1} 被填满或者待添加的非支配解集中个体数大于 P_{t+1} 剩余的空位数, 此时对待添加的非支配解集进行拥挤度排序, 取排在前面的个体填充 P_{t+1} 直至填满^[6].

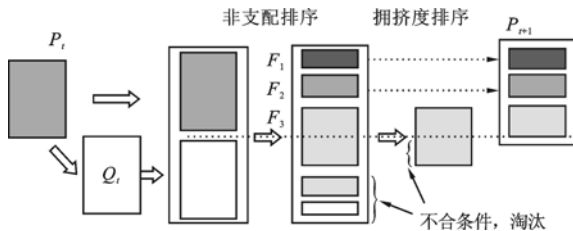


图2 NSGA-II 操作流程说明

3.1 染色体编码

本文中, 每个染色体由一个三维矩阵表示, 其中, 每个基因由一个二维矩阵表示. 一个基因表示一个给定的流量请求在源节点和目的节点之间几条不同路径上的分流转发情况. 表示基因的二维矩阵中一列表示网络中的一个源节点, 一行表示一个目的节点^[4]. 下面由一个4节点网络来说明染色体编码含义. 图3给出了网络拓扑结构. 图4给出了相应的邻接矩阵和流量请求矩阵. 图5是一个典型的3基因染色体编码示意图. 由流量请求矩阵可得共有3个流量请求: $d_1 = (1, 2, 10)$, $d_2 = (1, 4, 20)$, 和 $d_3 = (2, 3, 10)$. 可以将 d_1 均等分流在两条路径(1, 2)和(1, 3, 4, 2)上; 将 d_2 分流在三条路径上: 10单位流量在(1, 4), 5单位流量在(1, 2, 4)以及5单位流量在(1, 3, 4)上; d_3 不采取分流只在一条路径(2, 4, 3)上转发. 图6给出了3个流量请求的分流转发情况. 设流量请求的单位为“单位流量/秒”, 且链路容量为15单位流量/秒, 那么这种分流转发方案对应的染色体就是一个可行解, 但可能并不是一个非支配解.

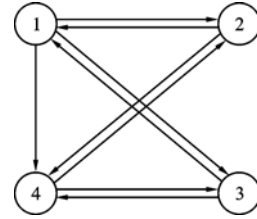


图3 4节点单向网络

		目的节点			
		1	2	3	4
源节点	1	0	1	1	1
	2	1	0	0	1
	3	1	0	0	1
	4	0	1	1	0

		目的节点			
		1	2	3	4
源节点	1	0	10	0	20
	2	0	0	10	0
	3	0	0	0	0
	4	0	0	0	0

图4 邻接矩阵(A)和流量请求矩阵(D)

		$d_1=(1,2,10)$			
		1	2	3	4
	1		5	5	
	2				
	3				5
	4		5		

		$d_2=(1,2,40)$			
		1	2	3	4
	1		5	5	10
	2				5
	3				5
	4				

		$d_3=(2,3,10)$			
		1	2	3	4
	1				
	2				
	3				10
	4			10	

图5 包含3个基因的典型染色体

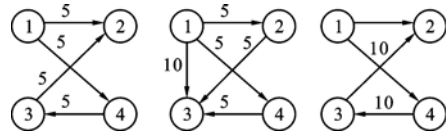


图6 与染色体对应的流量分转发路径

3.2 求解步骤

本文采用 NSGA-II 算法解决流量工程优化问题, 步骤如下:

Step 1. 种群初始化: 设置进化代数 G , 种群大小 N , 初始化 t 为 0; 将两个目标函数加权求和然后通过线性规划的方法, 随机改变权重值以产生不同的个体组成初始种群.

Step 2. 非支配排序: 基于目标函数值, 对 P_t 中的个体进行非支配排序, 产生一系列的非支配解集, 每个个体被分配一个与该个体所在非支配解集的索引值相等的非支配序. 例如, 非支配解集 F_i 中的个体均分配一个非支配序 i . 此外, P_t 中的每个个体还被分配一个拥挤度参数, 用于比较同一非支配解集中的不同个体.

Step 3. 锦标赛选择: 进行规模为 2 的锦标赛选择, 在 P_t 中随机选择两个个体, 然后比较它们的非支配序, 若非支配序相同, 则比较它们的拥挤度, 选择优秀的一个进入遗传池, 另一个被忽略. 如果遗传池的大小为 M (在本文仿真中, M 取值为种群大小的一半), 则锦标赛选择将重复进行 M 次.

Step 4. 遗传操作: 按照设定的交叉概率 p_c 和变

异概率 p_m 对遗传池中的个体进行交叉和遗传操作, 从而产生一个种群大小为 N 的子代种群 Q_t . 其中, 交叉算子采用的是随机两点交叉方式, 变异操作作为随机选择变异.

Step 5. 选择替换: 将父代种群 P_t 和子代种群 Q_t 进行合并, 组成一个大小为 $2N$ 的临时种群 R_t . 再对临时种群 R_t 中的个体进行非支配排序和拥挤度计算, 为每个个体分配一个非支配序和拥挤度. 最后根据非支配序和拥挤度从临时种群 R_t 中选择 N 个个体形成新一代的父种群 P_{t+1} .

Step 6. 重复步骤 2—5 直至达到设定的进化代数 D .

4 仿真与数值分析

本文采用了和文献[3]中的一个 10 节点的网络拓扑进行仿真, 在使用 NSGA-II 算法对问题进行求解时, 为了检验算法的稳定性, 针对每一个可行路径总数 N 均进行 5 次仿真. 仿真中部分参数设置如下:

参考文献[4]中取值, 种群大小为 250; 进化代数为 150; 交叉概率为 0.9.

分别采用 $N=90, 92, 94$. 针对每一个 N 值一共仿真 5 次, 并用不同的符号在图中标记. 由 NSGA-II 求出的解和精确算法求出的 Pareto 最优解非常接近, 并且在可行路径总数 N 值越大的条件下, NSGA-II 的解越接近于精确算法求出的 Pareto 最优解.

表 3 性能指标

路径数	指标	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
90	HR	1.032	0.977	1.008	0.996	1.031
	C	1	0.760	1	0.668	1
	GD	0.013	0.002	0.022	0.007	0.012
	SP	0.016	0.017	0.033	0.006	0.013
92	HR	1.020	1.022	1.030	1.034	1.063
	C	1	0.900	1	1	1
	GD	0.004	0.005	0.013	0.012	0.011
	SP	0.004	0.007	0.025	0.021	0.016
94	HR	1.046	1.028	1.038	1.017	1.017
	C	1	0.625	1	0.833	1
	GD	0.017	0.006	0.011	0.005	0.006
	SP	0.040	0.017	0.008	0.003	0.005

本文中选用文献[3]中提出的超区域比率

(HR)、两个解集的覆盖率(C)、一般化距离(GD)以及空间度(S)指标来对所提的基于 NSGA-II 的适应性算法的解的准确性和多样性进行分析评估.

表 3 中给出了仿真结果, 从中可以看出, HR 和 C 的值约为 1, 且 GD 和 S 的值接近于 0, 这就验证了本文所提的基于 NSGA-II 的适应性算法的准确性.

5 结束语

本文对 GMPLS 光网络中流量工程问题的分析与研究, 提出了一种基于 NSGA-II 的适应性算法用来解决流量工程中涉及的二目标优化问题, 即使得流量请求在网络上的分流转发能够同时满足路由开销和均衡负载开销最小化要求. 通过对仿真结果的分析, 验证了该算法的有效性和准确性.

参考文献:

- [1] 朱国晖, 史浩山. 面向业务的 GMPLS 网络动态生存性算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(11): 1514-1517.
- [2] Wang N, Ho K, Pavlou G, et al. An overview of routing optimization for internet traffic engineering[C]//IEEE Communications Surveys & Tutorials. Guildford: Surrey University, 2008: 36-56.
- [3] Erbas S C. Traffic engineering in MPLS networks with multiple objectives: modeling and optimization[D]. Germany, RWTH Aachen, 2004.
- [4] El-Alfy E S M, Selim S Z, Mujahid N. Solving the minimum-cost constrained multipath routing with load balancing in MPLS networks using an evolutionary method[C]//Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation(CEC 2007). Singapore, 2007.
- [5] 高媛. 非支配排序遗传算法(NSGA)的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 23-32.
- [6] Deb K, Agrawal S, Pratab A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for Multiobjective optimization: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

作者简介:

王 辉 女, (1962—), 博士, 教授, 硕士生导师. 研究方向为光传输理论与系统、信号处理与控制技术.

张 健 男, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为智能光网络流量工程.