

基于遗传算法的全光组播路由

贾鹏 李健 顾婉仪

(北京邮电大学光通信中心 北京 100876)

摘要: 该文提出使用遗传算法优化组播业务放置进光网络的顺序, 按照此顺序为业务构建组播树并选择波长, 以最小化光网络中使用的波长数及组播链路数。比较了 3 种路由算法的优劣以及波长变换器对资源优化的改善作用。基于 NSFNet 网络的仿真证明组播能力节点只需占到全网节点数的一半就能达到很好的优化效果。

关键词: 光网络; 遗传算法; 组播; 路由

中图分类号: TN915.63

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0911-04

Multicast Routing Based on Genetic Algorithm in Optical Networks

Jia Peng Li Jian Gu Wan-yi

(Optical Communication Centre, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A genetic algorithm of optimizing the order of arranging multicast services in optical network is proposed. Then the multicast trees are constructed and wavelengths are chosen by the optimized order to minimize the required number of wavelengths and multicast links in optical network. Three routing algorithms and the ameliorative effect of wavelength converters on resource optimization are compared. Simulations in NSFNet show that in sparse splitting network, when the number of multicast capable nodes is half of the number of total nodes, the resource optimization has been acceptable.

Key words: Optical network; Genetic algorithm; Multicast; Routing

1 引言

将组播技术推广到光层可以引入许多有价值的宽带实时应用业务, 全光组播性能的实现要求光网络的节点具有组播分光(light splitting)能力。但是组播能力(Multicast Capable, MC)节点内部结构设计比较复杂, 从而使建网费用大大增高。因此一个有效的做法就是在不过度影响网络整体性能的情况下尽量减少组播能力节点的个数而换以非组播能力(Multicast Incapable, MI)节点, 即使用稀疏的分光节点(sparse splitting)。

目前对于稀疏分光节点下的网络性能研究可以分解为 3 个问题, 组播能力节点的放置, 组播树的建立及波长的分配问题。文献[1-4]提出了全光组播的路由算法: 第一种是构建到所有节点的树, 然后根据实际情况进行剪枝和重路由; 第二种是构建连接所有MC节点的树, 然后将MI节点和与其最近的MC节点相连; 第三种则是不考虑MC节点的问题, 直接构造组播树; 第四种则是一些启发式的算法。由于不是每个节点都具备组播能力, 有时一个业务需要建立多个组播树才可以满足要求, 这时一个业务需要分配多个波长^[3]。

目前的研究主要是针对单个业务组播树如何建立进行

讨论; 当网络中有多个组播业务时, 情况会更加复杂, 对于如何对它们进行综合考虑以达到全网性能的优化, 研究涉及得比较少。本文提出了使用遗传算法对组播业务进行排序, 而后按顺序构建组播树的一种启发式算法, 从而优化了全网使用波长数及组播所包含的链路数。本文同时考虑了有无波长变换两种情况。

2 组播树构建

在本文中, 我们假设: 网络中的节点由 MC 和 MI 节点组成, MC 和 MI 节点具有将光能量部分下路并将其余部分继续向外传递的能力。

我们把网络拓扑表示为 $G(V, E)$, 其中 V 和 E 为节点和链路集合。链路都是双向的, W 为每条链路上支持的波长数目。给定组播业务集合 $R = \{r_0, \dots, r_{n-1}\}$, 其中 n 为业务数目, $r_i(s_i, D_i)$ 为其中一个业务, s_i 是源节点, D_i 为目的节点集合。目标是寻找组播树满足各个业务要求的同时使全网使用的波长数最小化及组播经过的链路数总和最小化。为了以后计算的方便, 需要先构造基于 MC 的虚拟网络拓扑 $G_M(V_M, E_M)$ 。其中 V_M 是 V 中 MC 的节点集合, 两个 MC 节点在 G 中如有路径相连, 而路径所经过的点都是 MI 节点, 在 G_M 中就存在链路 $e \in E_M$ 直接连接这两点, e 的权重就是 G 中连接这两点的最短路径权重。下面提出 3 种构建算法。

(1) 先构造 G_M , 在 G 里对于 s_i 及 D_i 寻找与其最近的

2005-09-02 收到, 2006-03-14 改回

国家自然科学基金(60302026, 60372096)和国家 863 计划(2005AA122310)资助课题

MC 节点 $s_{M,i}, D_{M,i}$, 并记下相应的最短路 P_{s_i}, P_{D_i} 。然后在 G_M 上利用基于 TM 生成树算法^[5]的思想得出以 $s_{M,i}$ 为源以 $D_{M,i}$ 为目的的组播树, 同时将组播树经过的链路以原始拓扑 G 上相应的最短路替换。最后将 P_{s_i}, P_{D_i} 加进组播树即可。如文献 [1] 中的 NMCFC 算法。

(2) 先构造 G_M , 在 G 里寻找与 s_i 最近的 MC 节点 $s_{M,i}$, 记下相应最短路 P_{s_i} 。在 G_M 上按照 TM 生成树算法的思想得出以 $s_{M,i}$ 为源其它 MC 节点为目的的组播树, 并将组播树经过的链路以 G 上相应的最短路替换。将 P_{s_i} 加入组播树, 对 D_i 在 G 上寻找与其最近的 MC 节点, 将相应路径加入到组播树。最后进行剪枝, 剪去与 D_i 没有相连的分支。

(3) 与 TM 生成树算法相似。设 $A = \{s_i\}$, $B = D_i$, $d(a, b)$ 表示节点 a, b 在拓扑 G 上的最短路的权重, 在 A, B 中寻找节点 a_m, b_n 满足 $d(a_m, b_n) = \text{Min}_{a_k \in A, b_j \in B} \{d(a_k, b_j)\}$, 将 b_n 及 a_m 至 b_n 最短路经过的点加入 A , 将 b_n 从 B 中删除, 同时将这条最短路加入组播树。重复这个过程直到 B 为空。

在 3 种算法中, 都存在组播环路的可能性, 因此每加入一条路径到组播树, 如果此路径上有些点已经在组播树上, 就要将路径进行截断, 仅保留重复点下游的链路。

3 MC 节点放置算法

由于本文主要考虑对业务的排序及路由的计算问题, 对 MC 节点的放置就简单地按下述算法进行。算法主要考虑了 MC 节点应与尽量多的 MI 节点直接相连并保证均匀放置。算法如下: 构造集合 $A = \emptyset; B = V$; 初始化 $\text{MCC}(v_i) = 0$, 其表示与 v_i 相连的 MC 节点的个数; 初始化 $\text{MIC}(v_i)$ 与 v_i 相连的链路数, 其表示与 v_i 相连的 MI 节点的个数。另构造集合 $B_1 = \{b | b \in B, \text{MIC}(b) = \text{Max}_{b_i \in B} \{\text{MIC}(b_i)\}\}$, $B_2 = \{b | b \in B_1, \text{MCC}(b) = \text{Min}_{b_i \in B_1} \{\text{MCC}(b_i)\}\}$ 。从 B_2 随机选择 b 作为 MC 节点, 将所有与 b 相连的节点其 MCC 加 1, MIC 减 1, 将 b 移出 B 放入 A 。重新构造 B_1 和 B_2 并重复上述操作直到放置完指定数目的 MC 节点。

4 遗传算法的应用

遗传算法将问题的可行解以编码表示, 称为染色体或个体。首先产生一定数量的个体, 然后对这些个体按选择、交叉、变异顺序进行操作。以上的操作要迭代多次, 然后输出群体中的最优解^[6]。本文主要是利用遗传算法对业务集合进行排序, 不同的业务放置进网络的顺序对资源会有不同的要求, 希望优化这种顺序以达到资源使用的最小化。对给定的 n 个业务从 0 到 $n-1$ 进行编号作为 n 个基因, 任意 0 到 $n-1$ 间的所有整数的全排列都可以视为一个有效的染色体, 基因的顺序即为放置业务的顺序。

译码方案: 按照染色体基因顺序考虑相应业务流, 选择第 2 节所述的算法构建组播树, 并按照首次适配方法选择波

长。对于有波长变换的情况, 分别选择各链路上空闲的第一条波长即可。当所有业务都放置完, 计算全网使用的波长数 w 以及组播经过的链路数总和 l_T 。某些业务可能要建立多个组播树来满足要求, 特别是在 MC 节点较少时。

选择策略: 采取轮盘赌选择策略^[7], 按染色体的目标函数的值决定它在下一代群体中的出现概率。由于目标主要是减少使用的波长数, 因此目标函数定义为 $\text{obj} = M - w - l_T / N$, 其中 M 保证 obj 的值为正, N 是比例因子, 表示 l_T 在计算中的重要程度。

交叉策略: 采取两边基因保留策略^[7]。考虑两个染色体, 随机选择两个基因位置 i 和 j , 把 i, j 间的基因包括 i 和 j 按照它们在对方中的顺序重新排列, 其余的基因保持不变。交叉操作是群体中两两染色体随机搭配按照一定概率 P_c 进行的。

变异策略: 采取移位策略^[7]。随机选择染色体两个基因位置 i 和 j , 假设 $i < j$, 把 j 移至 i 前, 把 i, j 间的基因包括 i 顺序后移。变异操作是每个个体按照一定概率 P_m 进行的。

保存最优: 为提升算法的性能, 我们把曾经出现过的最好的染色体保存起来替换掉每代中最差的染色体。保存最优的操作在每次计算目标函数后及选择操作前根据 obj 的大小进行。

链路权重的设计: 如果对所有业务计算组播树时采用统一的链路权重, 可能出现链路负载不均匀的情况。为了达到业务在链路间的均衡配置, 对每个染色体进行计算时, 每处理完一个业务时, 就根据各条链路已经使用的波长数 w_l 改变链路的权重 weight_l , 具体的就是 $\text{weight}_l = 1 + k \times w_l$ 。其中 k 表示权重根据波长数改变的比例。

如上所述, 就完成了遗传算法的构建。

5 仿真结果

本文对遗传算法进行了仿真以检验各种算法的优劣。在 14 节点的 NSFNet 中进行业务设置, 链路初始权重为 1。选择迭代次数 GE 为 200, 群体规模 PS 为 90, 交叉概率 P_c 为 0.06, 变异概率 P_m 为 0.99, 计算目标函数时取 $M = 50$, $N = 2000$, 链路权重改变因子 $k = 10$ 。

(1) 密集组播时, 所需波长数随 MC 节点数变化的情况: 随机产生 30 个业务, 每个业务的目的节点数为 13, 将 MC 节点由 2 增至 14, 按照第 3 节的放置算法将 MC 节点安排至网络中, 以第 4 节的遗传算法搜索业务的最优计算顺序, 分别在有波长一致性要求和没有的条件下计算 w , 见图 1。其中 NC 表示没有波长变换器, 要遵守波长一致性条件, C 表示没有波长一致性条件限制, A1, A2, A3 表示第 2 节中的路由算法(1), 算法(2), 算法(3)。本文没有给出 l_T 随 MC 节点数变化的情况, 这是因为密集组播时, 不论用什么算法得到的组播树包含的链路数都差别不大, 改善的余地比较小。

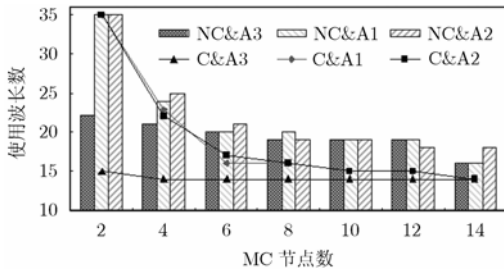


图 1 密集组播波长优化情况

(2) 稀疏组播时, 所需资源随 MC 节点数变化的情况: 将目的节点数改为 4, 其他条件不变。得到 l_r 变化的情况, 见图 2。由于波长数优化情况与密集组播时类似, 这里不再给出。

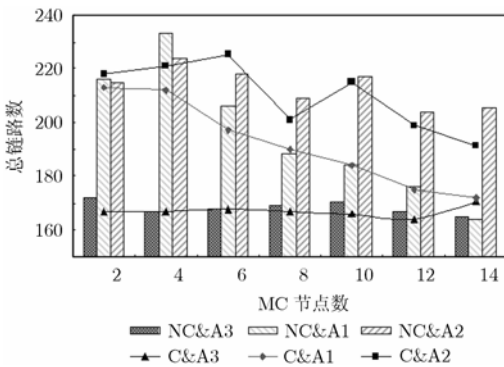


图 2 稀疏组播链路优化情况

(3) MC 节点数固定时, 所需资源随组播目的节点数变化的情况: 固定 MC 节点数目为 6, 随机产生 30 个业务, 将业务的目的节点数由 1 改变到 13, 其他条件不变。得到 w 和 l_r 变化的情况, 见图 3 和图 4。

针对本问题, 遗传算法一般都能在 200 代以内达到收敛。

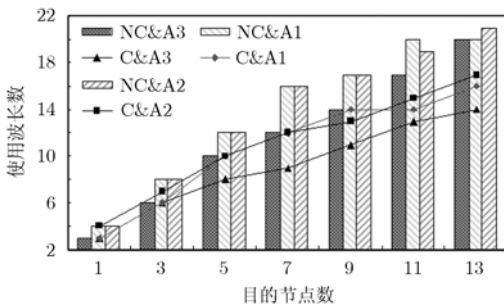


图 3 MC 节点数为 6 时波长优化情况

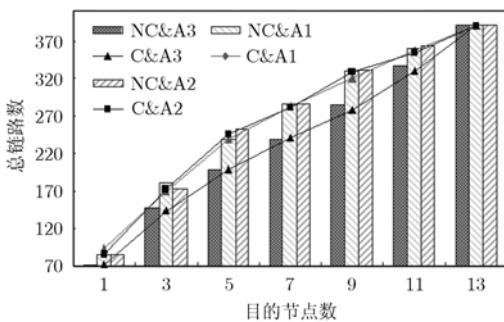


图 4 MC 节点数为 6 时链路优化情况

而且对于不同的路由算法及有无波长一致性条件都能达到优化的效果, 因此有很强的适用性。遗传算法的复杂度较低, 目前一些算法很少考虑多个业务共存的情况, 当有多个业务时, 遗传算法和业务全排列择优算法的效率比值为 $(GE \cdot PS)/n!$ 。

从图中可以看出: 以路由算法(3)的性能最优。算法(1)和算法(2)是类似的, 只是算法(2)先构建包括所有 MC 节点的组播树, 在目的节点选择与其最近的 MC 节点及计算关于 MC 节点的组播树时会与算法(1)产生差别。虽然算法(1)和算法(2)考虑了对 MC 节点的利用问题, 但是由于每个业务都要尽可能地使用 MC 节点, 导致与 MC 节点相连的链路所需波长急剧增加; 另外在构造组播树时多个目的节点需要通过最短路径与同一个 MC 节点相连, 有可能导致这些最短路的某些链路重合, 如果重合链路的首端是 MI 节点, 那么同样要使用多个波长。事实上 MC 节点并没有利用上。使用算法(3)虽然不能充分利用 MC 节点, 但由此造成的资源损失远小于上述的损失。因此对于单个业务算法(1)和算法(2)构建的组播树会较优, 但当多个业务存在时, 总体效果反而不如算法(3)。当 MC 节点较多时, MC 的影响可以忽略, 3 个算法的性能比较接近。

另外, l_r 的优化也是算法(3)最优, 这是由于算法(1)和(2)要求目的节点和 MC 节点相连, 可能需要构造较长的链路才能实现, 而算法(3)只是基于最短路的算法, 因此效果较好。在算法中, l_r 有时会随着 MC 节点数的增加而增加, 这是由于在优化波长数时可能需要构造更长的链路, 而本文是以波长数作为主要优化目标的, 所以波长数的减少可能需要链路数的增加作为代价。

可以观察到, 无论使用波长一致性条件还是存在波长变换器, MC 节点并不需要满配置, 当 MC 节点占总节点数的一半时, 优化已经能达到比较理想的效果。当然波长变换器的引入会在一定程度上优化目标。

本文的算法通用性很强, 适用于任意拓扑中的任意业务的资源优化。当组播业务的目的节点数变为 1, 同时任意两个节点间存在一个业务时, 本问题就转化为一个单播的 RWA(Routing and Wavelength Assignment)问题。用本算法在 4 个典型网络拓扑中求解最小使用波长数, 同时与理论下限^[8]进行比较, 得到优化结果在 ARPANet 和 NSFNet 中与理论下限一致, 在 EON 和 UKNet 中分别比理论下限多 1 和 3。可见本算法在求解 RWA 问题时有相当好的性能。

6 结束语

遗传算法对于光网络中不同情况下组播业务的资源优化都有很好的适应性和效果, 同时算法复杂度较低。在 NSFNet 网络中的仿真证明, MC 节点的数目只需达到全网总节点数的一半, 资源优化情况就和 MC 节点满配置相近了。在存在多业务的情况下, 使用单纯基于最短路的 TM 生成树

算法的思想进行资源优化, 其性能优于考虑 MC 节点位置的情况。波长变换器的引入可以进一步优化资源使用。

参 考 文 献

- [1] Hsieh Cheng-Yu and Liao Wanjiun. All optical multicast routing in sparse-splitting optical networks [C]. 28th Annual IEEE International Conference, Bonn/Knigswinter, 20-24 Oct., 2003: 162-167.
- [2] Sreenath N, Krishna Mohan Reddy N, and Mohan G, *et al.*. Virtual source based multicast routing in WDM networks with sparse light splitting[C]. 2001 IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing, Dallas, 29-31 May, 2001: 141-145.
- [3] Zhang Xijun, Wei J Y, and Qiao Chunming. Constrained multicast routing in WDM networks with sparse light splitting[J]. *Lightwave Technology*, 2000, 18 (12): 1917-1927.
- [4] Xin Yu-feng and Rouskas G N. Multicast routing under optical layer constraints[C]. 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Hong Kong, 7-11 March 2004, 4: 2731-2742.
- [5] Takahashi H and Matsuyama A. An approximate solution for the Steiner problem in graphs[J]. *Math. Japonica*, 1980, 24(6): 573-577.
- [6] Cheng Peng, Dai Qionghai and Wu Qiufeng. An application layer multicast routing algorithm based on genetic algorithms[C]. 8th International Conference on Telecommunications, Zagreb, 15-17 June, 2005, 2: 413-418.
- [7] 焦悦光. 波分复用光网络中的业务梳理[D]. [博士学位论文], 北京: 清华大学, 2004.
- [8] Baroni S and Bayvel P. Wavelength requirements in arbitrarily connected wavelength-routed optical networks[J]. *Lightwave Technology*, 1997, 15(2): 242-251.

贾 鹏: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为下一代光网络.

李 健: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为下一代光网络.

顾婉仪: 女, 1946 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为下一代光网络.