

并行量子遗传算法在 QoS 组播路由中的应用

周志芳, 孙力娟, 郭 剑, 饶林果
(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

摘 要: 随着网络通信技术和 Internet 的普及, 性能出色的组播路由越来越重要。著名的组播路由 Steiner 树问题是 NP 完全问题, 应采用启发式方法求解。文中在常规量子遗传算法中引入并行进化模型, 提出了一种解决多约束 QoS 组播路由优化问题的算法。在满足带宽、时延约束条件下寻找代价最小的组播树, 并合理安排节点负荷, 减少通信开销。仿真实验结果表明本算法搜索速度快、全局寻优能力强, 性能和效率优于常规量子遗传算法。

关键词: 组播路由优化; QoS; 量子遗传算法; 并行进化模型

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2008)08-0185-03

Application of a Parallel Quantum Genetic Algorithm in Multicast Routing Optimization with QoS Constraints

ZHOU Zhi-fang, SUN Li-juan, GUO Jian, RAO Lin-guo

(Computer College of Nanjing University of Post and Telecommunication, Nanjing 210003, China)

Abstract: Along with the developing of telecommunication technology and prevailing of the Internet, multicast routing with excellent performance becomes more and more important nowadays. The notable multicast routing problem named Steiner tree problem is an NP-complete problem and should be solved by heuristic methods. In this paper, a parallel evolution model is introduced into general quantum genetic algorithm, and a new algorithm is proposed to solve multicast routing optimization problem with multiple QoS constraints. This new algorithm can search out minimum cost multicast tree satisfying bandwidth, delay-constraints while correctly arranging nodes' loads and decreasing communication spending. The simulation results show that this new algorithm has fast search speed and finer global search capacity. Its performance and efficiency is better than general quantum genetic algorithm.

Key words: multicast routing optimization; QoS; quantum genetic algorithm; parallel evolution model

0 引 言

随着网络通信技术和 Internet 的普及, 多媒体通信和分布式环境中的协同工作等应用越来越广泛, 这些应用对网络提出了不同的 QoS 以及组播要求。通过使用组播降低带宽占用, 减少网络拥塞, 减轻服务器负荷, 并改善传输数据的质量。由于组播传输大多为多媒体数据, 数据量大并对 QoS 要求相对严格, 所以有必要设计专门的组播路由算法。性能出色的组播路由算法为数据准确及时的传递、新业务的应用和 QoS 的保证提供了保障。

网络上时延受限且满足带宽等要求的最小组播树问题^[1,2]是组播中的典型问题。该问题是经典计算中的 NP 难度问题, 目前常采用启发式方法求解。文中用改进的量子遗传算法 (Quantum Genetic Algorithm, QGA) 实现多约束 QoS 组播路由优化, 算法的核心是引入并行进化模型来克服现有量子遗传算法的不足。仿真实验结果表明, 文中的算法在效率和求解性能上优于常规量子遗传算法, 能加速最佳个体迁移, 搜索速度快, 全局寻优能力强。

1 多约束 QoS 组播路由问题描述

用有向图 $G = (V, E)$ 表示网络, 其中 V 是节点集, 代表交换机、路由器、主机或者子网; E 是边集, 代表通信链路。QoS 组播路由问题定义为: 给定有权图 $G = (V, E)$, 对于任一链路 $e \in E$, 定义三种属性: 时延函数 $\text{delay}(e): E \rightarrow R^+$; 代价函数 $\text{cost}(e): E \rightarrow R^+$; 可用带宽函数 $\text{bandwidth}(e): E \rightarrow R^+$ 。对于任一网络

收稿日期: 2007-11-23

基金项目: 江苏省高技术研究计划 (BG2005038); 江苏省高校自然科学基金研究计划 (04KJB520095); 南京邮电大学青蓝计划资助项目 (NY207084)

作者简介: 周志芳 (1983-), 女, 云南昆明人, 硕士研究生, 研究方向为计算机在通信中的应用; 孙力娟, 教授, 硕士生导师, 研究方向为演化计算、计算机网络。

节点 $n \in V$, 定义两种属性: 时延函数 $\text{delay}(n): V \rightarrow R^+$; 代价函数 $\text{cost}(n): V \rightarrow R^+$ 。对于给定的源节点 $s \in V$, 终点集 $M \in \{V - \{s\}\}$, s 和 M 组成的组播树 $T(s, M)$ 存在下列关系:

- ① $\text{delay}(p_T(s, t)) = \sum_{e \in p_T(s, t)} \text{delay}(e) + \sum_{n \in p_T(s, t)} \text{delay}(n)$
- ② $\text{cost}(T(s, M)) = \sum_{e \in p_T(s, t)} \text{cost}(e) + \sum_{n \in p_T(s, t)} \text{cost}(n)$
- ③ $\text{bandwidth}(p_T(s, t)) = \min(\text{bandwidth}(e), e \in p_T(s, t))$

其中, $p_T(s, t)$ 为组播树 $T(s, M)$ 上源节点 s 到终点 t 的路由路径。

多约束 QoS 组播路由由优化问题中路由的结果是要寻找一棵组播树 $T(s, M)$ 满足条件:

- ① 时延约束: $\text{delay}(p_T(s, t)) \leq D_t$
- ② 带宽约束: $\text{bandwidth}(p_T(s, t)) \geq B$
- ③ 代价约束: 在满足前面两个约束的条件下, $\text{cost}(T(s, M))$ 最小。

其中, D_t 、 B 分别代表业务对时延、带宽的约束限制。模型中假设所有组播终点的带宽、时延约束相同。

2 求解 QoS 组播路由问题的量子遗传算法

量子遗传算法^[3-6]是遗传算法和量子计算相结合的产物。算法建立在量子的态矢量表述基础上, 用量子比特编码表示染色体, 用量子旋转门和量子非门更新染色体(文中未使用量子非门), 进而找到目标问题的最优解。它具有易操作、收敛速度快、全局寻优能力强等优点。

2.1 量子比特编码

量子比特是量子遗传算法中最小的信息单元, 一个量子比特可以为 $|0\rangle$ 态或 $|1\rangle$ 态, 或它们任意叠加的中间态, 可表示为: $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

其中, α 、 β 是两个复常数, 满足 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。 $|\alpha|^2$ 、 $|\beta|^2$ 分别为量子比特在 $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ 状态的概率。

在量子遗传算法中, 用量子比特代表一个基因。则该基因可表达所有可能的信息, 而对该基因的任一操作也会同时作用于所有可能的信息。这样, 一条染色体可用多量子比特编码如下:

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11} | \alpha_{12} | \dots | \alpha_{1k} | \alpha_{21} | \alpha_{22} | \dots | \alpha_{2k} | \dots | \alpha_{m1} | \alpha_{m2} | \dots | \alpha_{mk} \\ \beta_{11} | \beta_{12} | \dots | \beta_{1k} | \beta_{21} | \beta_{22} | \dots | \beta_{2k} | \dots | \beta_{m1} | \beta_{m2} | \dots | \beta_{mk} \end{pmatrix}$$

其中, k 为每一个基因的量子比特数, m 为染色体的基因个数, α_{xy} 、 β_{xy} ($1 \leq x \leq m$, $1 \leq y \leq k$) 是两个复常数, 满足 $|\alpha_{xy}|^2 + |\beta_{xy}|^2 = 1$ 。

2.2 量子进化操作

量子旋转门是最终实现演化操作的执行机构, 其

调整操作如下:

$$\begin{pmatrix} \alpha_i' \\ \beta_i' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{pmatrix}$$

其中, $(\alpha_i, \beta_i)^T$ 为更新前染色体中的第 i ($1 \leq i \leq mk$) 个量子比特, $(\alpha_i', \beta_i')^T$ 为更新后染色体中的第 i 个量子比特。 θ_i 为旋转角, 其大小和方向根据设定的调整策略来确定。文中采用动态旋转角调整策略^[6], 如表 1。

表 1 旋转角选择策略

x_i	b_i	$f \geq f_b$	$\Delta\theta_i$	$S(\alpha_i\beta_i)$	
				$\alpha_i\beta_i > 0$	$\alpha_i\beta_i < 0$
0	0	False	0	—	—
0	0	True	0	—	—
0	1	False	δ	+1	-1
0	1	True	δ	-1	+1
1	0	False	δ	-1	+1
1	0	True	δ	+1	-1
1	1	False	0	—	—
1	1	True	0	—	—

x_i 是当前染色体测量值的第 i 位, b_i 是当前目标值的第 i 位, f 与 f_b 分别为其相应的适应度。 $S(\alpha_i, \beta_i)$ 与 $\Delta\theta_i$ 分别代表旋转的方向和角度, 则旋转角 $\theta_i = S(\alpha_i, \beta_i) \times \Delta\theta_i$ 。 δ 为每次调整的步长, 算法的性能与其取值有很大关系。 δ 取值过小, 染色体更新缓慢, 算法将处于停滞状态; δ 取值过大, 易出现早熟现象, 算法会收敛到局部最优解。

文中取 $\delta = 0.02\pi \times \cos(\frac{t}{\max t})$, t 为进化代数, $\max t$ 是根据待求解问题而设定的常数。

2.3 组播路由问题的编码

文中采用树型结构编码, 每条染色体代表一棵组播树。首先按照深度优先搜索算法找到源节点到每个目的结点的满足带宽、时延、时延抖动和丢包率约束的路径集, 作为算法编码空间的备选路径集。具体实现: 从源节点出发随机搜索一条到任意组播终点的路径, 将该节点标识为已访问。然后从未被访问的组播终点出发随机搜索, 直到某个节点在先前组建的子树中。重复上述步骤, 直到所有的组播终点都被访问过。在随机选择节点过程中要避免产生回路, 并且要使所选链路满足组播的时延、带宽、时延抖动和丢包率的约束。对满足要求的备选路径按代价大小进行顺序排序, 使得代价小的路径更易被选中参与构成多播树。

2.4 适应度函数

适应度函数是量子遗传算法判断个体好坏的衡量尺度。本算法采用直接对链路相加的原则, 将适应度函数确定为:

$$f(T) = C(T) = \sum_{e \in ET} c(e)$$

在计算代价和时,如果再次经过相同的链路,为避免重复计算,该链路代价只计算一次。组播树的代价和越小,对应染色体的适应度越高,故适应度函数值越小则适应度越高。

2.5 并行进化模型

常规并行遗传算法计算模型分为主从式、细粒度和粗粒度^[7]。文中提出一种并行进化模型,模型由多个进化模块和一个选优模块构成。在各进化模块上并行执行进化操作和适应度函数评价,而在选优模块上进行最佳个体的比较和选择。模型合理安排了进化、选优模块的负荷。同时,模型中各进化模块间不需要相互通信,唯一的通信开销是各进化模块向选优模块报告本模块的最佳个体以及选优模块向各进化模块返回比较后选出的全局最佳个体。

算法流程如下:

①初始化所有进化模块上的种群。种群中所有染色体的基因均初始化为 $(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}})$,一个染色体所表达的是其所有可能状态的等概率叠加。

②各进化模块上的种群进化一代后,根据适应度函数选出其上群体的最佳个体,将最佳个体送往选优模块。

③选优模块接收到所有进化模块传来的最佳个体后进行比较,选出全局最佳个体,并将全局最佳个体返回给各进化模块。

④各进化模块以全局最佳个体为进化目标继续执行算法。若满足优化要求或达到指定进化代数则结束,否则返回②继续执行。

其中,步骤②中各进化模块执行的进化操作为常规量子遗传算法^[3]。

3 仿真实验

随机生成网络拓扑图的方法如文献[8]所述。随机生成的20节点网络图如图1所示。先根据系统对时延、带宽的要求: $D = 46, B = 70$ ^[1]简化网络拓扑图,然后对满足要求的备选路径按代价大小进行排序。之后分别应用常规量子遗传算法和文中算法求解满足QoS约束的最佳组播树。

设置初始种群大小为20,最大运行代数为100代。源节点为0,目的节点为{3,4,10,12}。在应用文中算法时,安排3个进化模块,1个选优模块,进化模块每进化1代就与选优模块通信1次。结果找到的最佳组播树如图2所示。

将常规量子遗传算法和文中算法在搜索过程中每

一代最小组播树的代价绘制成曲线,如图3所示。

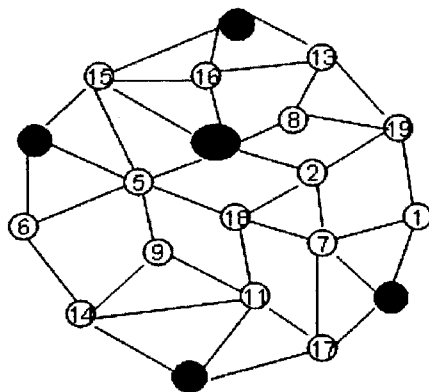


图1 网络拓扑图

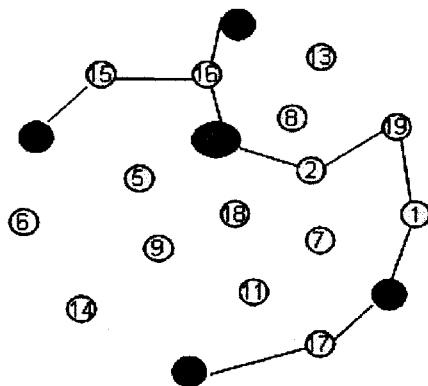


图2 最佳组播树

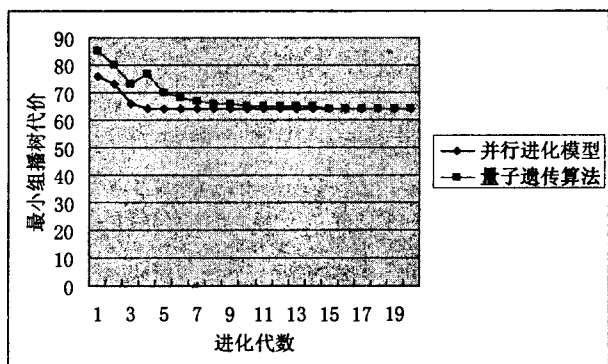


图3 应用文中算法和量子遗传算法所得代价曲线

与常规量子遗传算法相比,在搜索速度上,文中算法在第4代就搜索到最佳组播树,且此后每一代操作都能找到最佳组播树;常规量子遗传算法在第15代才搜索到最佳组播树。在搜索时间上,文中算法搜索到最佳组播树用时97.3毫秒;常规量子遗传算法用时285.6毫秒。通过对比说明,文中算法搜索速度快、寻优能力强,有较强的有效性和收敛性。

4 结束语

仿真实验表明,文中算法收敛速度快,全局寻优能

(下转第191页)

低频的操作点。两种状态下,最左边的操作点是集合中最低耗的,其中像素时钟是几乎不工作的(因为 VGA 显示器的显示功能需要的像素时钟频率最小为 17MHz),并且外部时钟是完全不工作的。其余两个操作点的区别仅仅在于是否开启了外部时钟而已。

现假设 LCD 控制器工作而安全芯片脱机的情形。在这种状态下,每种状态的第一个操作点都是无效的,因为没有足够的像素时钟频率。在 LCD 控制器改变状态的时候,LCD 控制器的像素时钟请求会传达给系统,因此当 LCD 控制器被激活时,DPM 系统会使指示的操作点无效。每个操作点同余类中的下一个操作点是合法的,所以这是一个合法的策略。这里假设 DPM 的具体实现使用了预定义的排序,它对类中的操作点按照优先权排了顺序(图中从左至右优先权依次递减),用这种方法来选择合法的操作点。

再设想另外一种安全芯片联机的情形。在这种情况下,每个状态下只有一个操作点是合法的,即那个以 33MHz 开启外部时钟端口的那个操作点。一旦安全芯片设备驱动器决定该芯片可以脱机时,这个决定会传达给功耗管理系统然后策略将会把两个状态都关联到图 4 中各自的最右边的操作点。

在用户仅仅把例中这个设备用作音频播放器的时候,LCD 控制器与安全芯片可能都不工作。在这种情况下,会选中每个操作点同余类中的最低耗操作点。由于 LCD 控制器不工作,那么对 PLB 和存储器带宽的需求量也很有限,所以“空闲”状态操作点指定了最低耗的状态,这个状态的功耗仅仅只够让系统退出“空闲”状态并回到“任务”状态而已。

(上接第 187 页)

力强。尤其在网络规模较大,备选路径较多时,本算法搜索速度快,减少了路由计算时间,解决了实时通信中动态拓扑结构下的多约束 QoS 组播路由问题,算法有效性强。同时,通过并行进化模型,解决了主从并行遗传算法中主、从节点负荷不均匀,运行效率不高;细粒度并行遗传算法中需要大量处理器;粗粒度并行遗传算法中通信开销大、算法收敛速度慢等问题。

参考文献:

- [1] 王征应,石冰心.基于启发式遗传算法的 QoS 组播路由问题求解[J].计算机学报,2001,24(1):55-61.
- [2] 曹元大,蔡 烈.组播路由 QoS 路由的遗传算法研究[J].计算机工程,2004,30(7):80-82.
- [3] Han K-H. Genetic Quantum Algorithm and its Application to Combinatorial Optimization Problems[C]//In: IEEE Proc. of

2 结束语

介绍了一个针对嵌入式系统的支持动态功耗管理的体系结构。这个结构是以当代处理机以及其应用需求为基础的,它是基于“策略”的一种抽象定义,并定义为“操作点”到系统中的“操作状态”的一种映射。最后用了一个简单设计实例说明 DPM 体系结构关于动态改变来自外围设备请求的操作。可以看出该结构不但能很好地完成复杂系统的功耗管理功能,而且具有较好的可扩展性,并且可以大幅度地降低系统功耗。

参考文献:

- [1] Lorch J, Smith A. Software strategies for portable computer energy management[J]. IEEE Personal Commun, 1998, 5: 60-73.
- [2] 陈静华,陈迪平,徐勇军,等.面向芯核设计的功耗层次化管理策略[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(5):1079-1084.
- [3] 车 健.嵌入式系统中低功耗设计[J].电子测量技术,2005(3):16-18.
- [4] Benini L, De Micheli G. Dynamic Power Management: Design Techniques and CAD Tools[M]. Norwell, MA: Kluwer, 1998.
- [5] Benini L, Bogliolo A, De Micheli G. A survey of design techniques for system-level dynamic power management[J]. IEEE Transactions on VLSI Systems, 2000, 8(3): 299-315.
- [6] Shaffer S, Beyda W J, Gold C. Apparatus and Method for Automatic CPU Speed Control Based on Application-Specific Criteria[P]. United States Patent: 6,298,448, 2001-10.
- [7] 卢春鹏.动态电压与频率调节在降低功耗中的作用[J].单片机与嵌入式系统应用,2007(5):12-17.

the 2000 Congress on Evolutionary Computation. San Diego, USA: IEEE Press, 2000: 1354-1360.

- [4] Narayanan A, Moore M. Quantum Inspired Genetic Algorithm [C]//In: Proc. of the 1996 IEEE Intl. Conf. on Evolutionary Computation (ICEC96). Nogyaya, Japan: IEEE press, 1996: 41-46.
- [5] Yang Junan, Zhuang Zhenquan. Research of Quantum Genetic Algorithm and Its Application in Blind Source Separation[J]. Journal of Electronics(China), 2003, 20(1): 62-68.
- [6] 杨俊安,庄镇泉.量子遗传算法研究现状[J].计算机科学,2003,30(11):13-15.
- [7] 陈国良,王熙法.遗传算法及其应用[M].北京:人民邮电出版社,1996.
- [8] Bernard M, Waxman. Routing of Multipoint Connections[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1988, 6(9): 1617-1622.