

认知网络中基于无性繁殖优化的组播路由算法*

黄希文¹, 王兴伟², 李婕¹, 黄敏³



¹(东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

²(东北大学 软件学院, 辽宁 沈阳 110819)

³(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

通讯作者: 王兴伟, E-mail: wangxw@mail.neu.edu.cn

摘要: 为了保证网络用户的服务质量, 认知网络与可信网络从提高网络的智能性与可信性方面提供了保证机制. 基于人工免疫系统的智能化特征, 在认知网络架构的基础上, 提出了一种基于无性繁殖优化的可信 QoS 组播路由算法. 该算法将免疫器官的功能集成在网络节点中, 使其具备认知能力. 同时, 采用滑动窗口思想设计信任评价机制, 对每个网络节点的行为记录进行信任评价. 根据无性繁殖优化机制, 基于用户满意度和节点的信任值进行路由选择, 得到满足用户服务质量需求的可信路由最优解. 最后, 在仿真平台上将该组播路由算法与经典组播路由算法进行性能评价, 结果表明, 该算法能够为网络用户提供更好的服务质量.

关键词: 可信网络; 认知网络; QoS 组播路由; 无性繁殖优化

中文引用格式: 黄希文, 王兴伟, 李婕, 黄敏. 认知网络中基于无性繁殖优化的组播路由算法. 软件学报, 2016, 27(Suppl. (2)): 261-271. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16040.htm>

英文引用格式: Huang XW, Wang XW, Li J, Huang M. Multicast routing algorithm based on the asexual propagation optimization in cognitive networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(Suppl. (2)): 261-271 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16040.htm>

Multicast Routing Algorithm Based on the Asexual Propagation Optimization in Cognitive Networks

HUANG Xi-Wen¹, WANG Xing-Wei², LI Jie¹, HUANG Min³

¹(College of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

²(College of Software, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

³(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to improve the quality of service for network users, the cognitive network and the trusted network provide guarantee mechanisms with intelligence and credibility. On the basis of the intelligent characteristics of artificial immune system, a trusted QoS multicast routing algorithm is proposed based on the asexual propagation optimization under the framework of the cognitive network using technologies of the trusted network. Meanwhile, the sliding window method is used to design the trust evaluation mechanism. It records and evaluates the behavior of each network node in order to keep the credibility of the network. According to the optimization mechanism of asexual propagation, the routing selection is based on the user satisfaction and node trust value, and the optimal solution which satisfies the QoS for users is obtained. Finally, the performances of the proposed multicast routing algorithm and classical multicast

* 基金项目: 国家杰出青年科学基金(61225012, 71325002); 国家自然科学基金(61572123, 61502092); 辽宁省百千万人才工程项目(2013921068); 中央高校基本科研业务费专项资金(N151604001); 中国博士后科学基金(2016M591449)

Foundation item: National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (61225012, 71325002); National Natural Science Foundation of China (61572123, 61502092); Liaoning BaiQianWan Talents Program (2013921068); Fundamental Research Fund for the Central Universities (N151604001); China Postdoctoral Science Foundation (2016M591449)

收稿时间: 2016-06-05; 采用时间: 2016-10-18

routing algorithms are evaluated on the simulation platform. The results show that the trusted QoS routing mechanism can provide better quality of service for network users than the other ones.

Key words: trustworthy network; cognitive network; QoS multicast routing; asexual propagation optimization

在网络技术飞速发展的今天,Internet 已经成为人们日常生活中不可缺少的部分.互联网以及智能移动终端的普及、用户数量的激增使得网络规模不断地扩大,互联网面临着可扩展性、异构性和动态性等关键技术挑战,同时在日趋复杂的网络服务中,保证用户的服务质量(quality of service,简称 QoS)需求成为未来互联网研究的关键问题.

面对上述研究问题,有关学者提出了认知网络的概念,认为未来网络应该具有智能性和自适应性^[1].认知网络通过感知网络的自身状态,以用户的服务需求为目标,通过学习推理做出合理的网络行为决策.认知网络强调端到端的网络性能保证,能够提供 QoS 保证的认知网络才是真正的认知网络.同时,为了增强网络的安全性,将可信网络^[2-4]的技术应用到认知网络体系架构中,根据用户和节点的历史行为以及实时行为进行信任度评价,从而进行网络行为决策.QoS 路由是认知网络的重点研究问题.相对于单播路由,组播路由更具高效性,但其实现相对复杂,因此,在认知网络中设计一套有效的可信组播路由机制对提高网络性能具有重要意义.本文基于人工免疫思想设计构架认知网络,并在此基础上提出了基于无性繁殖优化的可信组播路由机制,实现了具有可信性和服务质量保证的认知网络 QoS 组播路由机制.

1 相关工作

认知网络的概念由 Clark 等人^[1]提出,在认知网络中,通过对当前网络状态的感知,将网络高层目标与底层行为进行匹配,根据用户需求的变化进行网络行为的调整,例如,能够及时感知网络的故障位置,进行合理的分析与修复;根据网络历史记录信息,对当前的网络行为进行合理决策.Li 等人^[5]提出了一种生物启发式策略来探究认知网络中的机会数据通信问题.Misic 等人^[6]研究了跳频认知网络中恢复机制的性能,并讨论了各种网络和信道参数对恢复算法性能的影响,表明了准确的感知信息对于成功恢复的重要性.Wang 等人^[7]基于认知行为提出了一种 QoS 组播路由协议 CogMRT,这是一种分布式协议,每个节点只维护本地信息,用逐跳的方式进行路由搜索.

对于可信网络,林闯等人^[2]认为,可信网络在网络信息传输过程中,网络服务提供者和用户的行为及其导致的结果总是可以预期并且是可控制的,即监测行为状态、评估行为结果、控制异常行为.Ma 等人^[8]对可信计算组织(TCG)提出的可信网络连接架构的安全性进行了探究,发现其存在被平台替换攻击的危险,并提出一种可证明安全的可信网络连接协议模型(TNC-PS)来解决这个问题.Luo 等人^[9]重点研究 TNC 协议架构的安全性问题,提出了一种针对 TNC 协议的基于半马尔可夫过程的安全性量化分析方法.Li 等人^[10]基于节点的历史行为进行节点信任值的评价,从而进行数据分发策略的执行.Wang 等人^[11]基于云服务提出了一种智能经济分配方法,考虑用户行为的可信性解决云市场中动态资源分配的问题.

对于 QoS 路由的研究,研究者提出了多种解决方案.Wang 等人^[12]针对绿色多粒度传输网络提出了一种能效 QoS 组播路由机制,综合考虑了 IP 层和光路层的静态流量需求.Kabat 等人^[13]提出了一种延迟和延迟抖动最小的组播启发式算法,该算法针对多媒体应用提出,但只考虑了两个 QoS 参数.Peng 等人^[14]提出了一种新型的跨层 QoS 感知路由协议,它通过有效地利用多频、多渠道的方式来支持实时多媒体通信.Wang 等人^[15]针对自组织网络,提出了一种以群智能为基础的 QoS 路由协议,在满足用户的 QoS 需求以及实现用户和网络服务提供者纳什均衡的同时,该协议能够搜索到满足帕累托最优的路由路径.

与以上研究不同的是,本文采用认知网络架构,引入人工免疫思想实现网络中节点的认知功能,同时结合可信网络技术,在保证用户 QoS 需求的同时,提供可信的组播路由服务.为了进一步实现 QoS 组播路由,本文提出并设计了基于无性繁殖优化的组播路由算法,根据用户需求与网络 QoS 参数,对组播问题进行建模,实现了认知网络中的可信 QoS 组播路由.

2 基于人工免疫思想的网络模型

2.1 网络模型与QoS参数

在认知网络模型中,每个路由节点都设置一个“免疫器官”以获得“免疫应答能力”,这样,该路由节点就获得了认知的能力.路由节点分为接入路由器与核心路由器,区别在于,接入路由器除了记录所有路由节点都要记录的自身信任值和邻居信任值外,还要记录所有接入到自己的用户的信任值.路由节点体系结构如图 1 所示.

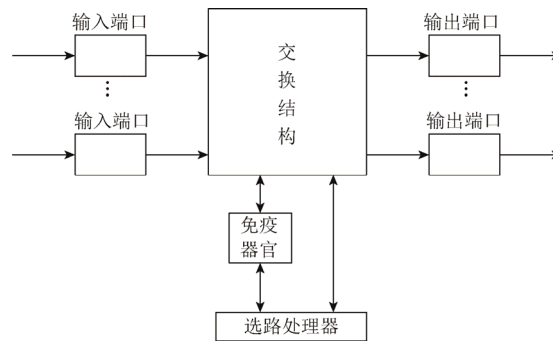


Fig.1 Architecture of router nodes

图 1 路由器节点体系结构

QoS 参数描述节点和边状态:链路可用带宽、延迟、延迟抖动、出错率,节点 CPU 使用率、存储使用率.

对于网络中的链路,考虑如下 QoS 参数:可用带宽 bw ,延迟 dl ,出错率 ls ;对于网络中的节点,考虑如下 QoS 参数:延迟 dl ,延迟抖动 jt ,出错率 ls ,信任值 td ,资源占用率 $resc$.其中,信任值作为一种特殊的 QoS 参数,描述了网络节点的信任程度.

2.2 信任评估机制

2.2.1 直接信任值

本文借鉴文献[16]提出的滑动窗口机制,设定窗口大小为 N ,记录 N 条行为记录,如图 2 所示.

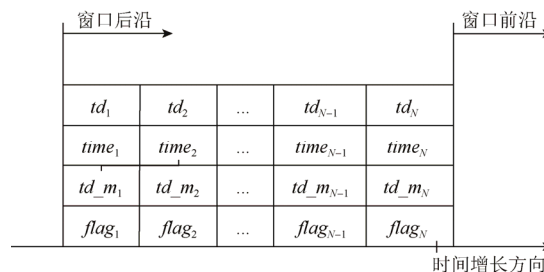


Fig.2 Sliding window

图 2 滑动窗口

图 2 中, $td_i \in [-1,1]$ 表示第 i 条行为记录的初始信任值, $time_i$ 表示插入第 i 条行为记录时的时间, td_{m_i} 表示第 i 条行为记录修改后的信任值, $flag_i$ 表示第 i 条行为记录是否为初始行为记录. D 表示初始信任值 $td_1 \sim td_n$ 的均方差.滑动窗口内的行为记录的数量为

$$n = f(N \cdot (1 - D)) \tag{1}$$

这里,函数 f 为取整函数,通过计算得到整数的行为记录数量.

计算近期信任值:

$$T_rec = \begin{cases} \sum_{i=N-n}^n \frac{time_i - time_{N-n}}{\sum_{i=N-n}^n (time_i - time_{N-n})} \cdot td_i, & n \neq 0 \\ 0, & n = 0 \end{cases} \quad (2)$$

在信任值的计算中,可以将其划分成 5 个信任等级,权重与信任等级相反.

统计出信任等级所对应的历史行为记录的数量,将其平均值作为历史行为记录信任值,并根据相应权重计算出 5 个信任等级的历史信任值的加权平均数,即最终的历史信任值 T_hst .

直接信任值则通过近期信任值与历史信任值加权来获得.其中,权重由信任等级的差异来设置,即给等级较低者更高的权重.

直接信任值可由公式(3)计算.

$$T_dct = a \cdot T_rec + b \cdot T_hst \quad (3)$$

其中, a 是近期信任值的权重, b 是历史信任值的权重.

2.2.2 间接信任值

由可信邻居节点推荐的其邻居的信任值即为间接信任值.节点 i 的间接信任值 t_ind_i 计算如下:

$$t_ind_i = \begin{cases} r_i, & td_i \geq \beta \\ td_i \cdot r_i, & 0 < td_i < \beta \\ 0, & td_i \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, td_i 即邻居 i 的信任值, r_i 是节点 i 的直接信任值, β 即为阈值.间接信任值 T_ind 为其可信邻居节点的所有邻居信任值的平均值.

2.2.3 综合信任值

综合信任值的计算如式(5)所示,其中, $init_n$ 表示滑动窗口中初始化行为记录的个数.

$$T = \left(1 - \frac{init_n}{N}\right) \cdot T_dct + \frac{init_n}{N} \cdot T_ind \quad (5)$$

2.3 组播的用户需求

定义组播组为 M .组播成员 $m \in M$, m 的一对多组播用户需求表示为 $Rm1(v_s, v_d^m, AP_i, \Delta_{id}^{mj})$.其中, $v_s \in V$ 为源节点, $v_d^m \in V$ 为组播成员节点 m , $AP_i \in APT$ 表示应用的类型. Δ_{id}^{mj} 为组播成员 m 请求的信任等级.在可信 QoS 路由的组播树中,根节点是 v_s ,所有 v_d^m 为叶子节点.其中,从 v_s 到各个 v_d^m 的路径的 QoS 参数满足 AP_i 的需求,且信任值符合 Δ_{id}^{mj} .而多对多的组播路由可以由多个一对多的路由来实现.

2.4 用户满意度计算

用户请求的应用类型 AP_i 对应的出错率在 $[ls_r_L^i, ls_r_H^i]$ 中,延迟是 ls_p ,则用户的满意度函数定义为

$$Sat(ls_p) = \begin{cases} 0, & ls_p > ls_r_H^i \\ \varepsilon, & ls_p = ls_r_H^i \\ \frac{1}{2} - \frac{\cos\left(\frac{ls_r_H^i - ls_p}{ls_r_H^i - ls_r_L^i}\right) \cdot \pi}{2}, & ls_r_L^i < ls_p < ls_r_H^i \\ 1, & ls_p \leq ls_r_L^i \end{cases} \quad (6)$$

其中, ε 为一个很小的正数.同理可以定义用户对路径延迟和延迟抖动的满意度函数 $Sa(dl_p)$ 和 $Sa(jt_p)$.

用户请求的应用类型 AP_i 对应的带宽区间为 $[bw_r_L^i, bw_r_H^i]$,实际获得的带宽为 bw_p ,则用户对路径带宽的满意度函数定义如下:

$$Sa(bw_p) = \begin{cases} 0, & bw_p < bw_{-r_L}^i \\ \varepsilon, & bw_p = bw_{-r_L}^i \\ \frac{1}{2} + \frac{\cos \frac{bw_{-r_H}^i - bw_p}{bw_{-r_H}^i - bw_{-r_L}^i} \cdot \pi}{2}, & bw_{-r_L}^i < bw_p < bw_{-r_H}^i \\ 1, & bw_p \geq bw_{-r_H}^i \end{cases} \quad (7)$$

同理,可以定义用户对路径信任值的满意度 $Sa(td_p)$.

用户对整条路径的满意度包括各个 QoS 参数的满意度和信任值满意度.定义用户的综合满意度 $Isat$:

$$Isat = (\alpha_{bw} Sa(bw_p) + \alpha_{dl} Sa(dl_p) + \alpha_{jt} Sa(jt_p) + \alpha_{ls} Sa(ls_p)) \cdot Sa(td) \quad (8)$$

其中, $\alpha_{bw}, \alpha_{dl}, \alpha_{jt}, \alpha_{ls}$ 分别为带宽、延迟、延迟抖动和出错率在 QoS 满意度中的权重.

2.5 组播树评价

在评价一棵组播树时,根据请求的应用类型,在满足可信性的条件下,以 QoS 参数为标准进行综合评价.对组播树评价时,不仅考虑整体组播树的性能,而且侧重于性能较差路径对整体组播树性能的影响.

组播树的评价方法如下:

- (1) 计算出每条路径的综合满意度 $Isat$.
- (2) 将满意度的[0,1]区间分成 i 个小区间,并赋予值较小的区间较大的权值.
- (3) 根据每个路径的满意度值,将其映射到对应的小区间内.

n_j 为第 j 个小区间内的路径个数,每个小区间内的所有路径满意度和为 S_k .组播树的评价 $evaluation$ 如下:

$$evaluation = \frac{\sum_{j=1}^i S_j \cdot w_j}{\sum_{j=1}^i n_j \cdot w_j} \quad (9)$$

其中, w_j 是第 j 个小区间的权值.

2.6 问题描述

本文的目标是通过计算节点信任值与用户满意度,找到最优的组播路由,用一个组播连通图表示.在这个图中,所有的组播成员都被包含,且出度是 0 的只能为组播成员节点.组播树中每条路径带宽、延迟、延迟抖动和出错率的需求必须实现,并使组播树的评价 $evaluation$ 最大化,数学描述如下:

$$evaluation = \frac{\sum_{j=1}^i S_j \cdot w_j}{\sum_{j=1}^i n_j \cdot w_j} \rightarrow \max \{evaluation\} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \min_{lk \in P} \{bw_{lk}\} \geq bw_{-r_L}^i \quad (11)$$

$$\sum_{lk \in P} dl_{lk} \leq dl_{-r_H}^i \quad (12)$$

$$\sum_{lk \in P} jt_{lk} \leq jt_{-r_H}^i \quad (13)$$

$$1 - \prod_{lk \in P} (1 - ls_{lk}) \leq ls_{-r_H}^i \quad (14)$$

3 基于无性繁殖优化的组播路由算法

因为考虑了多个 QoS 参数,所以此组播路由为 NP 完全问题.鉴于认知网络的特点,本文先使用基于概率的随机路由算法进行路由,然后用无性繁殖优化算法,获得近似最优路由.

3.1 基于概率的随机路由算法

初始的组播树由随机算法产生的单播路径组合表示,使用向量来表示解路径.根据节点的被选择概率,通过随机选择节点寻找路径.算法描述如下.

Input: v_s, v_d .

Output: $S[n]$.

- 1: $N_c \leftarrow v_s, N_p \leftarrow \text{NULL}$, create stack $S[0..n]$;
- 2: push N_p onto the stack;
- 3: $S[0] \leftarrow N_p$, sign all the nodes' status in the graph "not visited";
- 4: if $N_c = \text{NULL}$
- 5: then return false;
- 6: else if $N_c \neq v_d$
- 7: then goto 9;
- 8: else goto 18;
- 9: set N_c 's status "visited";
- 10: if adjacent nodes of N_c are all in a state of "visited"
- 11: $N_c \leftarrow N_p$, goto 4;
- 12: uniform a random number p generated in $[0,1]$;
- 13: randomly select adjacent node whose probability is bigger than p ;
- 14: if not exist
- 15: then choose a adjacent node N_n whose probability is nearest to p ;
- 16: push N_c onto the stack;
- 17: $N_c \leftarrow N_n$, goto 4;
- 18: if the path meets the QoS requirements
- 19: then take it as the initial solution;
- 20: else return false;

在上述算法中, v_s 和 v_d 分别为起始节点和终点,栈 $S[n]$ 即为输出的解路径.

3.2 无性繁殖优化算法

在无性繁殖优化 (asexual reproduction optimization, 简称 ARO) 算法^[17]中,每一个父代通过无性繁殖产生后代(称作嫩芽),然后父代和嫩芽之间根据目标函数比较,选择更优的一方.

用长度为 L 的二进制串表示每个个体.头一位是标志,随后的 l_1 位是整数部分,最后面的 l_2 位是小数部分.即 $L=l_1+l_2+1$,如图 3 所示.

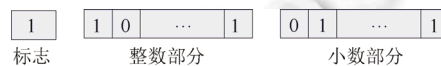


Fig.3 A chromosome sample

图 3 染色体示例

在长度为 L 的二进制串中随机选择 g 个位,把 0 和 1 互换,产生幼体(larva).从父代与幼体之间随机选择一个进行交叉并生成嫩芽,如图 4 所示.

繁殖的过程分为突变和交叉,并通过公式来控制交叉次数.当突变位置多时,交叉机会较小,反之,交叉机会较大.接受率公式如下:

$$p = \frac{1}{1 + \ln(g)} \quad (15)$$

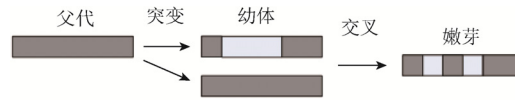


Fig.4 Reproduction mechanism

图 4 繁殖机制

基于无性繁殖的优化算法如下, 适应函数使用公式(15).

Step 1. 初始解作为第 1 代父代.

Step 2. 随机生成突变个数. 随机选择组播树生成路径, 通过基于概率的随机路由算法得到相同源和目的节点的路径, 并用其来替换, 得到幼体.

Step 3. 计算接受率, 如果接受, 则转 Step 6.

Step 4. 将所得的组播树进行去环和去分支, 作为子代.

Step 5. 从父代与幼体中随机选择一个, 将其路径进行交叉操作, 得到子代组播树后去环去分支.

Step 6. 计算每对父代与嫩芽的适宜值, 选择适宜值大的成为新父代.

Step 7. 重复 Step 2~Step 6, 直到达到迭代次数为止. 返回适宜值最高的解. 结束.

3.3 基于无性繁殖优化的组播路由算法

首先引入一个经验组播树的概念. 每个接入路由器维持一组以自身为起始节点的经验路径, 这些经验路径都是曾经通过路由算法得到的最优解或近似最优解. 一般条件下, 搜寻路径时每个节点被找到的概率一样. 而在路由算法找到一条路径之后, 该路径上的所有节点被选择的概率会增加. 多个经验路径组成一棵经验组播树.

可行解用向量来表示, 寻找路径主要是在随机选择的同时优先选择经验路径上的节点. 网络拓扑抽象为一个有向连通图. 组播路由算法如下.

Step 1. 基于组播 QoS 的需求, 在已有的经验组播树中进行搜寻, 若搜寻成功, 则转 Step 7.

Step 2. 经验组播树的频率全部减 1, 若频率减至 0, 则舍弃该组播树, 然后减少其节点被选择的概率.

Step 3. 访问邻居节点, 根据组播请求的 QoS 需求, 在该节点已有的经验组播树中进行查找, 并把从源节点到此节点的经验组播树合并成新的组播树, 若找到满足需求的组播树, 则转 Step 7.

Step 4. 对每个组播成员使用基于概率的随机路由算法, 并合并成一个组播树. 若没有满足需求的组播树, 则转 Step 6. 重复 Step 4 生成组播树, 以达到无性繁殖优化算法初始解的数量.

Step 5. 通过无性繁殖优化算法对 Step 4 得到的组播树进行优化, 转 Step 7.

Step 6. 若路由失败, 则结束.

Step 7. 若路由成功, 则将得到的组播树加入经验组播树中, 提高其节点被选择概率和该组播树的频率. 若容器满了, 则去掉频率最小者, 然后减少其节点被选择的概率. 结束.

4 性能评价

4.1 拓扑用例

本文构建了 4 种拓扑结构来实现算法的仿真测试: CERNET2(简称拓扑 1, 如图 5 所示)、INTERNET2(简称拓扑 2, 如图 6 所示)、CERNET(简称拓扑 3, 如图 7 所示)和使用 WAXMAN2 算法生成的随机拓扑(45 个节点, 54 条边, 如图 8 所示). 其中, CERNET 是中国第一个覆盖全国的, 由国内科技人员自行设计和建设的国家级大型计算机网络, 是为教育、科研和国际学术交流服务的非盈利性网络. 图 7 为 CERNET 的拓扑结构, 是典型的中國教

育网拓扑.第二代中国教育和科研计算机网 CERNET2 是中国下一代互联网示范工程 CNGI 最大的核心网和唯一的全国性学术网,是目前所知世界上规模最大的采用纯 IPv6 技术的下一代互联网主干网,也是中国第一个 IPv6 国家主干网,具有很高的研究价值.图 6 为 INTERNET2 的拓扑结构.INTERNET2 是由美国 120 多所大学、协会、公司和政府机构共同努力建设的网络,其目的是满足高等教育与科研的需要,开发下一代互联网高级网络应用项目,是最具代表性的互联网拓扑结构.WAXMAN2 算法在 Waxman-Salama 算法的基础上改进,作为目前使用最广泛的随机网络拓扑生成算法,用其生成的拓扑结构具有很高的随机性和代表性.

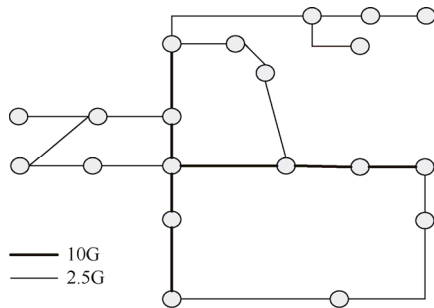


Fig.5 CERNET2 topology
图 5 CERNET2 拓扑

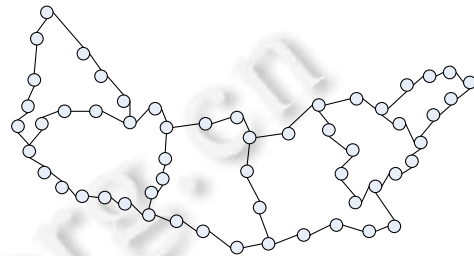


Fig.6 INTERNET2 topology
图 6 INTERNET2 拓扑

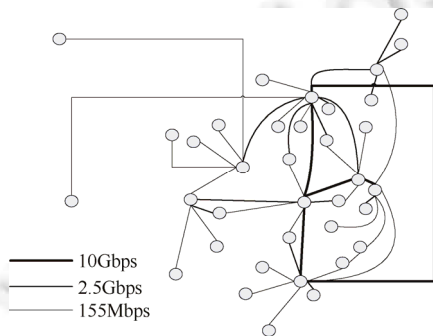


Fig.7 CERNET topology
图 7 CERNET 拓扑

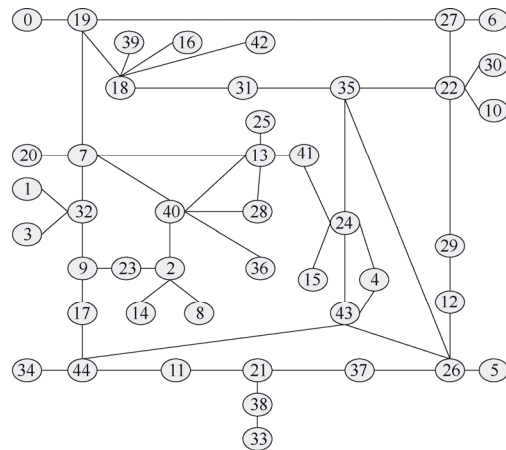


Fig.8 Random topology
图 8 随机拓扑

4.2 组播路由机制性能评价

本文采用 EBP(探索最优路径 QoS 组播路由算法)作为对比算法.从所有节点中随机选取 20%作为组播成员,并随机生成 100 个路由请求.比较分析路由的成功率、用户满意度及路由时间.结果如图 9~图 11 所示.

(1) 路由成功率

如图 9 所示,EBP 的成功率更高.该算法使用简单的策略对整个网络进行搜索,所以,只要有符合的路径就一定找到.基于无性繁殖优化的组播路由算法未必会覆盖所有网络,因此其性能相对较差.

(2) 用户满意度

如图 10 所示,基于无性繁殖的组播路由算法表现优异.这是因为基于无性繁殖的组播路由算法以用户满意度为目标,而 EBP 找到的解一般只是个可行解,而不是最优解.

(3) 路由时间

如图 11 所示,EBP 在时间上要优于基于无性繁殖的组播路由算法.这源于 EBP 采取不会产生环的最短路径算法以及只对 QoS 进行评估.对于多目标 QoS,智能算法过程相对复杂,且每次迭代后还需进行组播路由去环和去分支,因此性能较差.

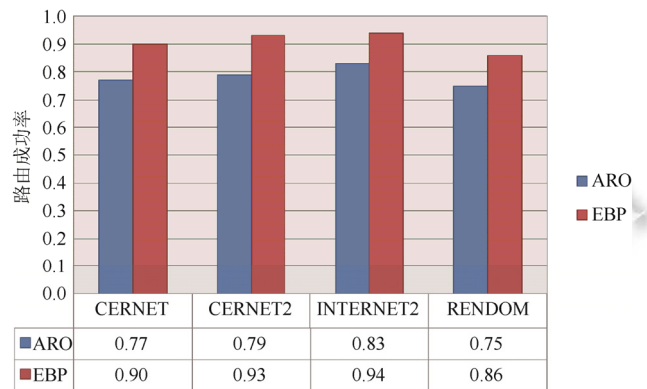


Fig.9 Multicast routing success rate

图 9 组播路由成功率

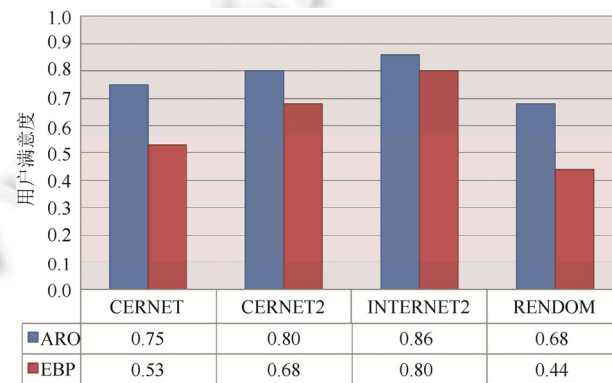


Fig.10 User's satisfaction degree in the 4 topologies

图 10 4 种拓扑的用户满意度

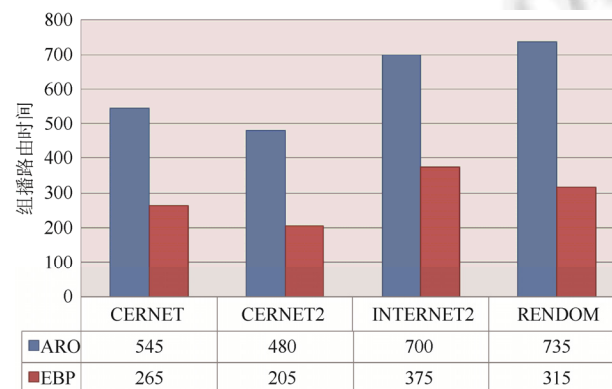


Fig.11 Routing time in the 4 topologies

图 11 4 种拓扑的路由时间

从以上对比分析能够得出,虽然无性繁殖优化的组播路由算法在成功率与运行时间上能够满足的需求比EBP相对逊色,但也能够满足需求.由于其关注于网络可信 QoS 路由,所以在用户满意度方面表现突出.综上所述,基于无性繁殖优化的组播路由算法可以很好地实现组播路由,特别是实现可信的 QoS 路由方面.

5 结束语

本文根据人工免疫系统的特性,设计了具有人工免疫系统功能的认知网络模型,提出了基于无性繁殖优化的可信 QoS 组播路由算法.通过仿真实验验证该组播路由算法在保证路由成功率与低延时的同时,也能在用户满意度方面表现突出,表明本文提出的组播路由机制可以高效地实现认知网络中可信的 QoS 组播路由.本文的路由机制主要关注 QoS 路由的可信性,在未来的工作中会在传输成功率与传输延迟等方面进一步提升 QoS 路由的性能.

References:

- [1] Clark DD, Partridge C, Ramming JC, Wroclawski JT. A knowledge plane for the Internet. In: Proc. of the ACM SIGCOMM. Karlsruhe, 2003. 3–10.
- [2] Lin C, Peng XH. Research on trustworthy networks. Chinese Journal of Computers, 2005,28(5):751–758 (in Chinese with English abstract).
- [3] Lin C, Ren FY. Controllable, trustworthy and scalable new generation Internet. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2004, 15(12):1815–1821 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1815.htm>
- [4] Tian LQ, Lin C. A kind of game-theoretic control mechanism of user behavior trust based on prediction in trustworthy network. Chinese Journal of Computers, 2007,30(11):1930–1938 (in Chinese with English abstract).
- [5] Li J, Wang XW, Jia J, Wang PF, Zhou Y, Zhao ZJ. Location prediction-based data dissemination using swarm intelligence in opportunistic cognitive networks. Mathematical Problems in Engineering, 2014,2014:Article ID 453564.
- [6] Misić J, Misić VB. Recovery in channel-hopping cognitive networks under random primary-user activity. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2014,63(5):2392–2406.
- [7] Wang XW, Cheng H, Huang M. QoS multicast routing protocol oriented to cognitive network using competitive coevolutionary algorithm. Expert Systems with Applications, 2014,41(10):4513–4528.
- [8] Ma Z, Ma JF, Li XH, Jiang Q. Provable security model for trusted network connect protocol. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(9):1669–1678 (in Chinese with English abstract).
- [9] Luo AA, Lin C, Wang YZ, Deng FC, Chen Z. Security quantifying method and enhanced mechanisms of TNC. Chinese Journal of Computers, 2009,32(5):887–898 (in Chinese with English abstract).
- [10] Li J, Wang XW, Yu RY, Liu R. Reputation-Based incentives for data dissemination in mobile participatory sensing networks. Int'l Journal of Distributed Sensor Networks, 2015,2015:Article ID 172130.
- [11] Wang XW, Wang XY, Che H, Li KQ, Huang M, Gao CX. An intelligent economic approach for dynamic resource allocation in cloud services. IEEE Trans. on Cloud Computing, 2015,3(3):275–289.
- [12] Wang XW, Qu DP, Huang M, Li KQ, Sajal KD, Zhang JiH, Yu RY. Multiple many-to-many multicast routing scheme in green multi-granularity transport networks. Computer Networks, 2015,93(1):225–242.
- [13] Kabat MR, Patel MK, Tripathy CR. A heuristic algorithm for delay delay-variation bounded least cost multicast routing. In: Proc. of IEEE the 2nd Int'l Advance Computing Conf. 2010. 261–266.
- [14] Peng YH, Yu Y, Guo L, Jiang DD, Gai QM. An efficient joint channel assignment and QoS routing protocol for IEEE 802.11 multi-radio multi-channel wireless mesh networks. Journal of Network and Computer Applications, 2013,36(2):843–857.
- [15] Wang XW, Cheng H, Huang M. Multi-Robot navigation based QoS routing in self-organizing networks. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013,26(1):262–272.
- [16] Lin C, Tian LQ, Wang YZ. Research on user behavior trust in trustworthy network. Journal of Computer Research and Development, 2008,45(12):2033–2043 (in Chinese with English abstract).

- [17] Farasat A, Menhaj MB, Mansouri T, Moghadam MRS. ARO: A new model-free optimization algorithm inspired from asexual reproduction. *Applied Soft Computing*, 2010,4(10):1284–1292.

附中文参考文献:

- [2] 林闯,彭雪海.可信网络研究. *计算机学报*,2005,28(5):751–758.
 [3] 林闯,任丰源.可控可信可扩展的新一代互联网. *软件学报*,2004,15(12):1815–1821. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1815.htm>
 [4] 田立勤,林闯.可信网络中一种基于用户行为信任预测的博弈控制机制. *计算机学报*,2007,30(11):1930–1938.
 [8] 马卓,马建峰,李兴华,姜奇.可证明安全的可信网络连接协议模型. *计算机学报*,2011,34(9):1669–1678.
 [9] 罗安安,林闯,王元卓,邓法超,陈震.可信网络连接的安全量化分析与协议改进. *计算机学报*,2009,32(5):887–898.
 [16] 林闯,田立勤,王元卓.可信网络中用户行为可信的研究. *计算机研究与发展*,2008,45(12):2033–2043.



黄希文(1993—),男,辽宁沈阳人,硕士生,
主要研究领域为新一代互联网.



李婕(1982—),女,博士,副教授,CCF 专业
会员,主要研究领域为认知网络,移动网
络计算.



王兴伟(1968—),男,博士,教授,博士生导师,
CCF 高级会员,主要研究领域为互联
网,云计算,网络空间安全.



黄敏(1968—),女,博士,教授,博士生导师,
主要研究领域为物流与供应链管理,智
能优化.