SON 中基于蚂蚁网络的 QoS 单播路由机制

王兴伟,郭 磊,秦培玉,黄 敏
(东北大学信息科学与工程学院,辽宁沈阳 110004)

摘 要: 本文提出一种基于群体智能的自组织网络 SON (Self-Organizing Network)中的服务质量 QoS (Quality of Service)单播路由机制,通过引入模糊数学相关知识描述不精确路由信息,通过引入微观经济学相关知识兼顾网络提供方和用户利益,基于蚂蚁网络寻找使各方效用达到或接近 Nash 均衡下 Pareto 最优的 QoS 单播路径.基于网络仿真器 NS2 (Network Simulator 2)对该机制进行了仿真实现和性能评价,结果表明,该机制在用户效用、网络提供方效用、路径综合评价值、Nash 均衡下 Pareto 最优比和路由成功率等方面具有良好性能.

关键词: 自组织网络; 蚂蚁网络; QoS; 单播; 路由
中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 10-2329-07

AntNet Based QoS Unicast Routing Scheme in SON

WANG Xing-wei, GUO Lei, QIN Pei-yu, HUANG Min
(*College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning* 110004, *China*)

Abstract: In this paper, a swarm intelligence based QoS (Quality of Service) unicast routing scheme in SON (Self-Organizing Network) is proposed. Inexact routing information is described with fuzzy mathematics at the same time profits of both user and network provider are taken into account with microeconomics. Based on AntNet algorithm, a QoS unicast path is found with Pareto optimum under Nash equilibrium of both user and network provider utilities achieved or approached. The proposed scheme is implemented by simulation over NS2 (Network Simulator 2) and its performance is evaluated. It was shown that the proposed scheme had good performance on user utility, network provider utility, path comprehensive evaluation value, Pareto optimum ratio under Nash equilibrium and routing success ratio.

Key words: SON (Self-Organizing Network); AntNet; QoS (Quality of Service); unicast; routing

1 引言

网络技术的发展与融合使得未来网络将成为地面网与空天网、固定网与移动网等异构子网融合而成的一体化网络[1],网络时空复杂性大大提高,建设、管理、运行与维护大型、异构与动态的未来网络成为迫切需要解决的重大问题[2].自组织(self-organization)现象在自然界和人类社会中非常普遍.自组织是指参加实体之间建立其组织结构而毋需中央控制,实体之间直接交互且对其周围环境变化可持续做出反应[3].自组织系统一般都具备可伸缩、自适应、可生存、可用、简单、自治和小世界等特征[4],这些恰是未来网络应具备的属性[5].群体智能[6]可以满足这些要求,通过人工智能体之间局部交互,在没有集中控制和全局协调的情况下产生复杂的智能行为.基于生物灵感联网(bio-inspired networking)思想,采用自组织形式组网,可以有效降低网络时空复杂性.自组织网络 SON (Self-Organizing Networks)很可能成为未来网络的组织形式[7,8].

SON 中的路由机制不仅需要支持服务质量 QoS (Quality of Service)[1,9],而且需要支持自组织.同时,由于 SON 的大规模、异构与动态,导致路由信息难以精确表达.网络运营渐趋商业化客观上要求在网络资源使用上兼顾网络提供方和用户利益,支持各方效用共赢[10].有两个或两个以上加性或乘性 QoS 参数优化的路由问题是 NP 完全的[11],需要综合考虑上述因素的 SON 中 QoS 路由问题更是非常复杂.

在文献[12]中,提出了一种可在逐跳路由协议中使用的 K 近似算法,用来寻找多加性 QoS 参数约束路径.在文献[13]中,针对不精确信息下带宽与延迟约束路径问题,基于效用函数从非劣解集中选取特定路径作为问题解.在文献[14]中,针对不精确信息下多加性 QoS 约束路径问题,采用模糊逻辑从一组候选路径中选择符合

收稿日期:2009-07-06;修回日期:2009-08-15
基金项目:国家自然科学基金(No.61070162, No.71071028, No.60802023, No.70931001, No.61071124);高等学校博士学科点专项科研基金(No.20070145017);中央高校基本科研业务费专项资金(No.N090504003, No.N090504006)

要求的 QoS 路由.在文献[15]中,提出了一种基于微观经济学的模糊 QoS 单播路由机制,采用启发式选路算法,使得找到的路径不仅满足用户 QoS 需求,而且双方在其上的效用达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优.在文献[16]中,提出了一个受自然启发的 QoS 路由算法,使用人工智能体寻找最佳路由,优化全网资源利用.在文献[17]中,提出了一种基于聚类的分布式 QoS 路由预计算算法.在文献[18]中,提出了一种 SON 路由结构.在文献[19]中,提出了一种移动自组织网络中的生物灵感 QoS 路由算法,通过演化维护路由信息,通过信息素控制流量.在文献[20]中,提出了一种重叠网络中的生物灵感多路径路由方法,基于吸引子选择进行自适应响应.在文献[21]中,提出了一种生物灵感能量感知型路由算法,基于群体演化协作,通过局部通信增强优质路由.在文献[22]中,提出了一种无线传感器网络中基于偏爱路径的自选择生物灵感路由算法.在文献[23]中,给出了受趋药性、反应扩散和定额感测生物过程启发的生存性路由算法,在发生暂态链路故障时重新配置网络资源.

上述工作尚未从生物灵感联网角度出发来考虑基于群体智能解决 SON 路由问题.本文基于生物灵感联网思想建立 SON 模型,设计了一种基于群体智能的 QoS 单播路由机制,通过引入模糊数学知识适应路由信息不精确,通过引入微观经济学知识支持各方效用共赢,基于蚂蚁网络[24]寻找使各方效用达到或接近 Nash 均衡下 Pareto 最优的 QoS 单播路径,基于网络仿真器 NS2 (Network Simulator 2)[25]进行了仿真实现和性能评价.

2 模型设计

SON 表示为图 $G(V,E)$,V 是节点集,代表路由器,E 是边集,代表链路.

2.1 自组织行为

SON 支持如下节点自组织行为:节点诞生即产生并初始化新节点,节点感知周围环境即节点感知相连边和邻居节点,节点关系建立/消除即建立节点之间的邻接关系,负载迁移即在相邻节点之间分担负载,节点克隆即通过复制本节点而产生新节点(新产生的节点可以顶替被克隆节点工作,也可以分担被克隆节点负载),节点繁殖即由两个或多个节点共同产生一个新节点(新产生的节点可以顶替父节点工作,也可以分担父节点负载),节点休眠即节点因长时间无工作负载而进入节能休眠状态,节点昏迷即节点因非致命故障而暂停工作,节点苏醒即休眠节点因自醒或昏迷节点因自愈而恢复正常工作,唤醒节点即休眠节点因外界干预而被叫醒且恢复正常工作,救醒节点即昏迷节点因外界干预而被治愈且恢复正常工作,节点死亡即节点因致命故障而永久不能工作.

2.2 用户 QoS 单播路由请求

用户 QoS 单播路由请求表示为 $< v_s, v_d, [bw_rq_L, bw_rq_H], [dl_rq_L, dl_rq_H], [jt_rq_L, jt_rq_H], [ls_rq_L, ls_rq_H], P_u >$,其元素依次代表源节点、目的节点、带宽约束、延迟约束、延迟抖动约束、出错率约束和用户单位时间愿付费用上限.采用区间表示约束是为了适应用户 QoS 需求的难以准确表达.

2.3 节点和边

$\forall v_i \in V$,考虑延迟、延迟抖动、出错率和稳定度,$i = 1, \cdots, |V|$. $\forall e_l \in E$,考虑总带宽、可用带宽、延迟、出错率和单位带宽单位时间成本,$l = 1, \cdots, |E|$.简单起见,把除节点稳定度之外的参数都归并到在路径上其下游边的参数中.这样,边参数变为总带宽 TB_l、可用带宽 $[AB_l^L, AB_l^H]$、延迟 $[DL_l^L, DL_l^H]$、延迟抖动 $[JT_l^L, JT_l^H]$、出错率 $[LS_l^L, LS_l^H]$、单位带宽单位时间成本 ct_l.采用区间表示参数值是为了适应网络状态的难以精确测量.节点参数变为稳定度 SD_i.

计算节点稳定度时需要考虑节点自身及其邻居负载情况,它们过重或过轻都可能导致节点间负载迁移或节点状态发生变迁.

定义节点 i 的 CPU 可用率 RC_i 和缓冲区可用率 RB_i 分别如下:

$$RC_i = \frac{AC_i}{TC_i} \tag{1}$$

$$RB_i = \frac{AF_i}{TF_i} \tag{2}$$

其中,TC_i、AC_i、TF_i 和 AF_i 分别代表节点 i 的单位时间 CPU 总周期数、可用周期数、缓冲区总量和当前可用量.定义节点 i 负载 LD_i 如下:

$$LD_i = 1 - \frac{1}{\lambda_C \cdot \frac{1}{RC_i} + \lambda_B \cdot \frac{1}{RB_i}} \tag{3}$$

其中,λ_C 和 λ_B 反映 CPU 和缓冲区占用情况对节点负载影响的相对严重程度,$\lambda_C, \lambda_B > 0$,$\lambda_C + \lambda_B = 1$.显然,$0 \leqslant LD_i \leqslant 1$,$LD_i$ 越小,节点负载越轻.

定义节点 i 稳定度 SD_i 如下:

$$SD_i = \alpha \cdot LD_{nb} + \beta \cdot (1 - 2 \cdot |\frac{1}{2} - LD_i|) \tag{4}$$

其中,α 和 β 反映邻居节点负载和节点自身负载对节点稳定度影响的相对严重程度,$\alpha, \beta > 0$,$\alpha + \beta = 1$.若节点有多个邻居,则 LD_{nb} 取负载最重邻居节点的负载.显然,$0 \leqslant SD_i \leqslant 1$.节点负载越接近中间值,节点越稳定,因为它接受邻居节点向其和其向邻居节点迁移负载的可能性都小.

用户在 e_l 上实际使用带宽 bw_l 对 e_l 可用带宽区间

的隶属度 M_l^B 与用户对 bw_l 的满意度 S_l^B、用户在 e_l 上实际经历延迟 dl_l 对 e_l 延迟区间的隶属度 M_l^D 和用户对 dl_l 的满意度 S_l^D、用户在 e_l 上实际经历延迟抖动 jt_l 对 e_l 延迟抖动区间的隶属度 M_l^J 和用户对 jt_l 的满意度 S_l^J、用户在 e_l 上实际经历出错率 ls_l 对 e_l 出错率区间的隶属度 M_l^L 和用户对 ls_l 的满意度 S_l^L 分别定义如下:

$$M_l^B=\begin{cases}1, & bw_l\leqslant AB_l^L\\ \dfrac{1}{2}-\dfrac{1}{2}\sin\dfrac{\pi}{AB_l^H-AB_l^L}\left(bw_l-\dfrac{AB_l^L+AB_l^H}{2}\right), & AB_l^L<bw_l\leqslant AB_l^H\\ 0, & bw_l>AB_l^H\end{cases}\tag{5}$$

$$S_l^B=\begin{cases}0, & bw_l\leqslant bw_rq_L\\ e^{-\left(\frac{bw_rq_H-bw_l}{bw_l-bw_rq_L}\right)^2}, & bw_rq_L<bw_l<bw_rq_H\\ 1, & bw_l\geqslant bw_rq_H\end{cases}\tag{6}$$

$$M_l^D=\begin{cases}0, & dl_l\leqslant DL_l^L\\ \dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\sin\dfrac{\pi}{DL_l^H-DL_l^L}\left(dl_l-\dfrac{DL_l^L+DL_l^H}{2}\right), & DL_l^L<dl_l\leqslant DL_l^H\\ 1, & dl_l>DL_l^H\end{cases}\tag{7}$$

$$S_l^D=\begin{cases}1, & dl_l\leqslant dl_rq_L\\ 1-e^{-\left(\frac{dl_rq_H-dl_l}{dl_l-dl_rq_L}\right)^2}, & dl_rq_L<dl_l<dl_rq_H\\ 0, & dl_l\geqslant dl_rq_H\end{cases}\tag{8}$$

$$M_l^J=\begin{cases}0, & jt_l\leqslant JT_l^L\\ \dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\sin\dfrac{\pi}{JT_l^H-JT_l^L}\left(jt_l-\dfrac{JT_l^L+JT_l^H}{2}\right), & JT_l^L<jt_l\leqslant JT_l^H\\ 1, & jt_l>JT_l^H\end{cases}\tag{9}$$

$$S_l^J=\begin{cases}1, & jt_l\leqslant jt_rq_L\\ 1-e^{-\left(\frac{jt_rq_H-jt_l}{jt_l-jt_rq_L}\right)^2}, & jt_r_L<jt_l<jt_rq_H\\ 0, & jt_l\geqslant jt_rq_H\end{cases}\tag{10}$$

$$M_l^L=\begin{cases}0, & ls_l\leqslant LS_l^L\\ \dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\sin\dfrac{\pi}{LS_l^H-LS_l^L}\left(ls_l-\dfrac{LS_l^L+LS_l^H}{2}\right), & LS_l^L<ls_l\leqslant LS_l^H\\ 1, & ls_l>LS_l^H\end{cases}\tag{11}$$

$$S_l^L=\begin{cases}1, & ls_l\leqslant ls_rq_L\\ 1-e^{-\left(\frac{ls_rq_H-ls_l}{ls_l-ls_rq_L}\right)^2}, & ls_rq_L<ls_l<ls_rq_H\\ 0, & ls_l\geqslant ls_rq_H\end{cases}\tag{12}$$

式(5)服从偏小型岭形分布[26],式(7)、式(9)和式(11)服从偏大型岭形分布[26].

用户对边带宽、延迟、延迟抖动、出错率和边综合质量的评价分别定义如下:

$$E_l^B=M_l^B\cdot S_l^B\tag{13}$$

$$E_l^D=M_l^D\cdot S_l^D\tag{14}$$

$$E_l^J=M_l^J\cdot S_l^J\tag{15}$$

$$E_l^L=M_l^L\cdot S_l^L\tag{16}$$

$$E_l^C=\alpha_B\cdot E_l^B+\alpha_D\cdot E_l^D+\alpha_J\cdot E_l^J+\alpha_L\cdot E_l^L\tag{17}$$

其中,α_B、α_D、α_J 和 α_L 反映带宽、延迟、延迟抖动和出错率对用户 QoS 需求的相对重要程度,$0\leqslant\alpha_B,\alpha_D,\alpha_J,\alpha_L\leqslant 1$,$\alpha_B+\alpha_D+\alpha_J+\alpha_L=1$. 显然,$0\leqslant E_l^C\leqslant 1$,其值越大,用户对边综合质量的评价越高.

2.4　带宽定价

令 η_l 表示 e_l 的负荷率,计算如下:

$$\eta_l=1-\frac{AB_l}{TB_l}\tag{18}$$

其中,AB_l 是 e_l 当前实际可用带宽值.

为促进理性消费带宽,带宽定价由基价和调节价组成,如式(19)[27].

$$pr_l=pb_l+pf_l\tag{19}$$

当 $\eta_l\leqslant\eta_l^0$ 时,e_l 为低负荷,位于低价区,基价按式(20)确定;当 $\eta_l\geqslant\eta_l^1$ 时,e_l 为高负荷,位于高价区,通过拍卖[28]确定;否则,e_l 为中负荷,位于平价区,按式(21)确定. η_l^0 和 η_l^1 是预设经验值,$0<\eta_l^0<\eta_l^1<1$. $pb_l^{\min}$、pb_l^0 和 $pb_l^{\max}$ 是低价区起步价、平价区起步价和平价区最高价,$pb_l^{\min}\leqslant pb_l^0\leqslant pb_l^{\max}$,$\eta_l^{\min}$、$\eta_l^0$ 和 $\eta_l^{\max}$ 与之对应. $\eta_l^{\min}\leqslant\eta_l\leqslant\eta_l^0$ 时,pb_l 类似升半柯西分布[26];$\eta_l^0\leqslant\eta_l\leqslant\eta_l^{\max}$ 时,pb_l 类似升半正态分布[26]. 据此可计算得出 A、α、B 和 δ.

$$pb_l=\begin{cases}{pb_l}^{\min}, & \eta_l<{\eta_l}^{\min}\\ \dfrac{A}{1+\alpha\cdot{\eta_l}^{-\beta}}, & {\eta_l}^{\min}\leqslant\eta_l\leqslant{\eta_l}^0\end{cases}\tag{20}$$

$$pb_l=\begin{cases}pb_l^{\max}, & \eta_l^{\max}<\eta_l<\eta_l^1\\ B\cdot(2-e^{-\delta\cdot(\eta_l-\eta_l^0)^2}), & \eta_l^0\leqslant\eta_l\leqslant\eta_l^{\max}\end{cases}\tag{21}$$

调节价根据边的延迟、延迟抖动和出错率由表 1 确定,以反映除带宽之外的其他质量参数对定价的影响,K 是正整数.

表 1　调节价与延迟、延迟抖动、出错率对照关系

调节价	延迟	延迟抖动	出错率
pf_{l1}	$[DL_{l1}^L,DL_{l1}^H]$	$[JT_{l1}^L,JT_{l1}^H]$	$[LS_{l1}^L,LS_{l1}^H]$
…	…	…	…
pf_{lK}	$[DL_{lK}^L,DL_{lK}^H]$	$[JT_{lK}^L,JT_{lK}^H]$	$[LS_{lK}^L,LS_{lK}^H]$

2.5　效用和 Pareto 优势

用户因使用 e_l 的带宽 bw_l 而单位时间支付的费用

EP_l 和网络因向用户提供带宽 bw_l 而承担的成本 CT_l 分别计算如下：

$$EP_l = (pb_l + pf_l) \cdot bw_l \tag{22}$$

$$CT_l = ct_l \cdot bw_l \tag{23}$$

用户和网络提供方在 e_l 上的效用 uu_l 和 nu_l 以及 $< uu_l, nu_l >$ 的 Pareto 优势定义如下：

$$uu_l = E_l^C \frac{P_u - EP_l}{P_u} \tag{24}$$

$$nu_l = \frac{EP_l - CT_l}{CT_l} \tag{25}$$

$$PD_l = \beta_u \cdot \frac{1}{uu_l} + \beta_n \cdot \frac{1}{nu_l} \tag{26}$$

其中，β_u 和 β_n 分别代表对用户和网络提供方效用的倾斜权值，$0 \leqslant \beta_u, \beta_n \leqslant 1$，$\beta_u + \beta_n = 1$. PD_l 值越小，双方效用越大且越均衡，越 Pareto 最优.

2.6 博弈分析

用户和网络提供方在边上博弈，目的是通过确定最佳策略对使双方效用达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优. 用户有 n 种策略，表示为 $< bw_{l1}, \cdots, bw_{ln} >$，$bw_{lx}$ 表示用户在第 x 种策略下在 e_l 上实际使用的带宽，$x = 1, \cdots, n$. 网络提供方有 m 种策略，表示为 $< pb_l + pf_{l1}, \cdots, pb_l + pf_{lm} >$，对应在 e_l 上不同质量下的 m 套带宽定价. 定义双方在 e_l 上的效用矩阵 $[< uu_{lij}, nu_{lij} >]_{n \times m}$，矩阵的 n 行与 m 列分别对应用户和网络提供方策略，达到 Nash 均衡的策略对满足[29]：

$$\begin{cases} uu_{li^*j^*} \geqslant uu_{li^*j} \\ nu_{li^*j^*} \geqslant nu_{lij^*} \end{cases} \tag{27}$$

若 $< uu_{li^*j^*}, nu_{li^*j^*} >$ 只有一个，则与之对应的是最佳策略对. 若有多个或没有，则需比较 Pareto 优势，其最小值对应的是最佳策略对（若有多个，则任选其一），$i, i^* = 1, \cdots, n, j, j^* = 1, \cdots, m$.

2.7 小世界边

随着路由系统的运行，每个节点都会逐渐积累一些到其它节点的常用路径. 每当有路由请求到达时，若它们能满足要求，则可直接使用之寻路到目的节点，如同一条边，称此类“捷径”为小世界边. 这样做虽找路快，但路径跳数可能较大而非最优，需合理使用. 例如，限制小世界边跳数，仅在最后一跳使用小世界边，周期性更新小世界边，等等. 若有一条小世界边在路由时常被成功使用，则应考虑在其端节点间设置直连链路，从而更加优化路由.

每个节点维护一张从其出发到其他节点的小世界边记录表，如表 2. 开始时该表为空. 随着路由系统的运行，逐渐将符合入选条件（本文仅规定跳数阈值）的路径作为小世界边，把该边的终点和途经的中间节点序列填入表中，“使用次数”初值置 0. 路由节点每隔一段时间扫描一遍表，删除“使用次数”为 0 的小世界边，而后把保留下来的小世界边的“使用次数”置 0.

表 2 小世界边记录表

终点	中间节点序列	使用次数
v_{d1}	$< v_{11}, \cdots, v_{1k1} >$	m_1
…	…	…
v_{dn}	$< v_{n1}, \cdots, v_{nkn} >$	m_n

2.8 路径综合评价

v_s 到 v_d 的路径 P_{sd} 的综合评价值定义如下：

$$E_{P_{sd}} = \lambda_u \cdot \frac{H_{P_{sd}}}{uu_{P_{sd}}} + \lambda_n \cdot \frac{H_{P_{sd}}}{nu_{P_{sd}}} \tag{28}$$

$$uu_{P_{sd}} = \sum_{l \in P_{sd}} uu_l \tag{29}$$

$$nu_{P_{sd}} = \sum_{l \in P_{sd}} nu_l \tag{30}$$

其中，$H_{P_{sd}}$ 是 P_{sd} 的跳数，若在路径上使用了小世界边，则在 $H_{P_{sd}}$ 中记入的是该小世界边的实际跳数而非 1；λ_u 和 λ_n 是对用户效用和网络提供方效用的倾斜权值，$0 \leqslant \lambda_u, \lambda_n \leqslant 1$，$\lambda_u + \lambda_n = 1$. 双方效用越大且越均衡，路径跳数越少，则路径综合评价值越小，路径越优. 这不仅有利于各方效用在找到的路径上达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优从而支持各方共赢，而且有利于减少路径跳数从而降低网络资源占用量.

3 算法设计

本文目标是在满足用户需求的前提下使双方效用在所选路径上达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优同时尽可能降低网络资源占用量，数学描述如下：

$$Minimize\{E_{P_{sd}}\} \tag{31}$$

$$s.t.\ BW_{P_{sd}} \geqslant bw_rq_L \tag{32}$$

$$DL_{P_{sd}} \leqslant dl_rq_H \tag{33}$$

$$JT_{P_{sd}} \leqslant jt_rq_H \tag{34}$$

$$LS_{P_{sd}} \leqslant ls_rq_H \tag{35}$$

$$EP_{P_{sd}} \leqslant P_u \tag{36}$$

$$BW_{P_{sd}} = \min\{bw_l \mid l \in P_{sd}\} \tag{37}$$

$$DL_{P_{sd}} = \sum_{l \in P_{sd}} dl_l \tag{38}$$

$$JT_{P_{sd}} = \sum_{l \in P_{sd}} jt_l \tag{39}$$

$$LS_{P_{sd}} = 1 - \prod_{l \in P_{sd}} (1 - ls_l) \tag{40}$$

$$EP_{P_{sd}} = \sum_{l \in P_{sd}} EP_l \tag{41}$$

其中，$BW_{P_{sd}}$、$DL_{P_{sd}}$、$JT_{P_{sd}}$、$LS_{P_{sd}}$ 和 $EP_{P_{sd}}$ 分别代表 P_{sd} 的可用带宽、延迟、延迟抖动、出错率和用户因使用 P_{sd} 而单位时间支付的费用.

3.1 蚂蚁网络

在蚂蚁网络中,通过前向蚂蚁逐跳寻路,通过后向蚂蚁更新路由表,完成在源和目的节点之间寻路.但是,基本的蚂蚁网络不支持 QoS,需要对其扩充.此外,为提高寻路效率,需限制网络中同时出现的前向蚂蚁数,因此为其引入生命期.路由时,前向蚂蚁若在生命期内未到达目的节点或途经路径不满足 QoS 需求,则其死亡.

3.2 信息素浓度、路由成功率和地址相近度

每个节点 v_c 都维护信息素矩阵$[PH_{dinj}]_{I\times J}$,其中,PH_{dinj}是以v_{di}为目的节点且v_{nj}为v_c下一跳节点的信息素浓度值,$i=1,\cdots,I,j=1,\cdots J$.若 v_{di}和v_{nj}相同,则 PH_{dinj}初值设为SD_{nj},否则设为 0.每次 v_{nj}成功成为 v_s 通往 v_{di}的路径 P_{sdi}上 v_c 的下一跳节点,则增大 PH_{dinj}值,提高以后寻路时 v_{nj}被选为下一跳节点的可能性.随着时间的推移,信息素会逐渐挥发,v_{nj}被选为下一跳节点的可能性降低.此外,节点稳定度对信息素浓度也有影响,节点越稳定,信息素浓度应越高.PH_{dinj}更新公式定义如下:

$$PH_{dinj}=(PH_{dinj}\cdot\rho+\frac{1}{E_{P_{sdi}}})\cdot\zeta_{nj} \tag{42}$$

其中,$0\leqslant\rho\leqslant1$ 是信息素挥发系数,ζ_{nj}是此次和上次 v_{nj}被选为 v_c 下一跳节点时的稳定度之比.节点路由成功率是成功路由次数占节点路由总次数的百分比.地址相近度是两个 IP 地址从高到低相同前缀部分的长度占地址总长度的百分比.节点路由成功率越高,节点地址与目的地址相近度越高,路由时节点越应被优先选择.这样做不仅有利于加快寻路,而且有利于减少路径跳数.

3.3 下一跳节点选择

需综合考虑用户需求、节点信息素浓度、路由成功率和地址相近度等因素,过程如下:

步骤 1:考察所有通过直连边或小世界边与当前节点 v_c 相连且不在路径上的邻居节点 v_n:若 v_n 正常工作且从 v_s 到 v_n 的路径 P_{sn}满足式(32)–式(36),则把 v_n 放入下一跳候选节点集合 CS.

步骤 2:若 CS 不为空,则转步骤 5.

步骤 3:若 v_c 有休眠的 v_n,则唤醒 v_n;若 v_c 有昏迷的 v_n,则要求网络管理员救醒 v_n;若 P_{sn}满足式(32)–式(36),则把 v_n 放入 CS.

步骤 4:若 CS 不为空,则转步骤 5;否则,下一跳节点选择失败,结束.

步骤 5:对每个 $v_n\in CS$,根据式(43)计算选择概率 PR_n,选择 PR_n 最大的 v_n 作为下一跳节点.

$$PR_n=\begin{cases}PH_{dn}\cdot AS_n\cdot SR_n\cdot E_l^C, & PH_{dn}\cdot AS_n\cdot SR_n\cdot E_l^C\leqslant1\\ 1-\dfrac{1}{PH_{dn}\cdot AS_n\cdot SR_n\cdot E_l^C}, & PH_{dn}\cdot AS_n\cdot SR_n\cdot E_l^C>1\end{cases} \tag{43}$$

其中,AS_n、SR_n 和 E_l^C 分别表示 v_n 与 v_d 的地址相近度、v_n 的路由成功率以及用户对 v_c 与 v_n 之间 e_l 综合质量的评价值.

3.4 蚂蚁行为

设从 v_s 发出 AN 个前向蚂蚁 FA_i,$i=1,\cdots,AN$,则 FA_i 寻路行为描述如下:

步骤 1:设 FA_i 的生命期为 TTL,携带路径 $PT_i=\{v_s\}$.

步骤 2:FA_i 根据 3.3 节选择下一跳节点 v_n:若失败,则 FA_i 死亡,结束;否则,$PT_i=PT_i\cup\{v_n\}$,若 $v_n=v_d$,则 FA_i 变成后向蚂蚁 BA_i 且转步骤 5.

步骤 3:$TTL=TTL-1$.

步骤 4:若 $TTL\neq0$,则转步骤 2;否则,FA_i 死亡,结束.

步骤 5:在每个 $v_n\in PT_i$,BA_i 根据式(42)更新信息素浓度,若在 v_n 使用了小世界边,则其使用次数增 1,直到 BA_i 返回 v_s,结束.

3.5 算法流程

步骤 1:设定最大迭代次数 MN、每次迭代发送前向蚂蚁数 AN 和每次迭代时间间隔 RP,最佳路径综合评价值 $E^*=+\infty$,最佳路径集合 $PS^*=\varphi$,已迭代次数 $IN=0$.

步骤 2:从 v_s 发出 AN 个 FA_i,每个 FA_i 均根据 3.4 节寻路.

步骤 3:若 RP 到期时仍无任何 BA_i 返回 v_s,则转步骤 5;否则,对每个返回的 BA_i 计算对应的 PT_i 的综合评价值 E_{PT_i},记最小 E_{PT_i}值为 E_{PT}^*,记与 E_{PT}^*对应的 PT_i 为 PT^*.

步骤 4:若 $E_{PT}^*<E^*$,则以 PT^* 取代 PS^* 中原有元素;若 $E_{PT}^*=E^*$,则把 PT^* 并入 PS^*.

步骤 5:$IN=IN+1$.

步骤 6:若 $IN<MN$,则转步骤 2.

步骤 7:若 E^* 为 $+\infty$,则路由失败结束.

步骤 8:v_s 把 PS^* 中满足小世界边入选条件的路径记入小世界边记录表;若$|PS^*|=1$,则返回其中路径为问题解;若$|PS^*|>1$,则返回其中跳数最少路径为问题解,若有多个,则任选其一;路由成功结束.

4 仿真实现与性能评价

基于 NS2 仿真实现了本文机制(简称 A 机制),在多个实际与虚拟网络拓扑上对用户效用、网络提供方效用、路径综合评价值、Nash 均衡下 Pareto 最优比和路

由成功率等指标进行了评价.图 1 ~ 图 5 分别是在 CERNET2(简称 T1)、CERNET(简称 T2)、NSFNET(简称 T3)和 NTTNET(简称 T4)上该机制与基于 Dijkstra 算法[30]的单播路由机制(简称 D 机制)的比较结果,A 机制明显优于 D 机制.

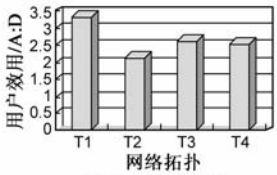


图1 用户效用

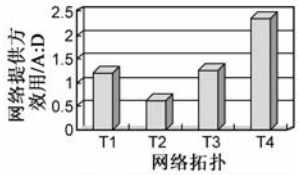


图2 网络提供方效用

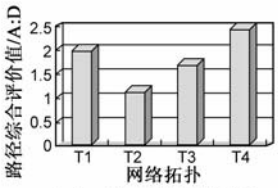


图3 路径综合评价值

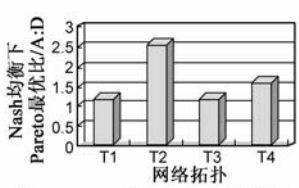


图4 Nash均衡下Pareto最优比

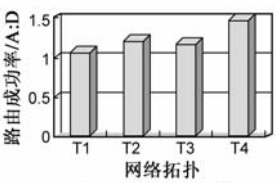


图5 路由成功率

5 结论

针对 SON 路由机制需求,本文提出了一种基于群体智能的 QoS 单播路由机制,面向基于生物灵感联网思想构建的 SON 模型,引入模糊数学相关知识描述不精确路由信息,引入博弈分析等支持各方效用共赢,基于蚂蚁网络寻找使用户和网络提供方效用达到或接近 Nash 均衡下 Pareto 最优的 QoS 单播路径.通过仿真,对该机制就用户效用、网络提供方效用、路径综合评价值、Nash 均衡下 Pareto 最优比和路由成功率等指标进行了评价,结果表明它是有效的.算法与模型的实用化、原型系统的开发及对组播的扩展是本文今后研究工作的重点.

参考文献:

[1] Fodor G, Eriksson A, Tuoriniemi A. Providing quality of service in always best connected networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(7): 154 – 163.

[2] Nakano T, Suda T. Applying biological principles to designs of network services[J]. Applied Soft Computing, 2007, 7(3): 870 – 878.

[3] Prehofer C, Bettstetter C. Self-organization in communication networks: principles and design paradigms[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(7): 78 – 85.

[4] Suzuki J, Suda T. A middleware platform for a biologically inspired network architecture supporting autonomous and adaptive applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2005, 23(2): 249 – 260.

[5] Whitacre J M, Sarker R A, Pharn Q T. The Self-organization of interaction networks for nature-inspired optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(2): 220 – 230.

[6] Kennedy J, Eberhart R C. Swarm Intelligence[M]. Morgan Kaufmann Publishers, 2001.

[7] Dixit S, Sarma A, Self-organization in networks today[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(8): 77 – 77.

[8] Balasubramaniam S, Botvich D, Donnelly W. Bio-inspired framework for autonomic communication systems[J]. Studies in Computational Intelligence, 2009, 69: 3 – 19.

[9] 刘积仁,王兴伟,张应辉.分布式多媒体系统通信平台及若干相关技术的探讨[J].电子学报,1997,25(11):54 – 59.
Liu Ji-ren, Wang Xing-wei, Zhang Ying-hui. Discussions on communication platforms and some related techniques in distributed multimedia systems[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(11): 54 – 59. (in Chinese)

[10] Briscoe B, Darlagiannis V, Heckman O, et al. A market managed multi-service Internet[J]. Computer Communications, 2003, 26(4): 404 – 414.

[11] Kuipers F, Mieghem P V, Korkmaz T, et al. An overview of constraint-based path selection algorithms for QoS routing[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(12): 50 – 55.

[12] Xue G, Sen A, Zhang W, et al. Finding a path subject to many additive qos constraints[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(1): 201 – 211.

[13] Korkmaz T, Krunz M. Bandwidth-delay constrained path selection under inaccurate state information[J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2003, 11(3): 384 – 398.

[14] Cohen A, Korach E, Last M, et al. A Fuzzy-based path ordering algorithm for QoS routing in non-deterministic communication networks[J]. Fuzzy sets and systems, 2005, 150(3): 401 – 417.

[15] Wang X, Hou M, Wang J, et al. A microeconomics-based fuzzy QoS unicast routing scheme in NGI[A]. EUC'05[C]. Heidelberg: Springer Berlin, 2005. 376 – 384.

[16] Lee H, Choi G, Kim H, et al. A nature-inspired QoS routing algorithm for next generation networks[A]. In Proc. ICAS'08 [C]. Piscataway: IEEE Computer Society, 2008. 228 – 232.

[17] 崔勇,吴建平.分布式服务质量路由预计算算法.电子学报[J].2005,33(12):2165 – 2169.
Cui Yong, Wu Jian-ping. Distributed precomputation for QoS routing[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2165 – 2169. (in Chinese)

[18] Amorim M D, Sichitiu M L, Benbadis F. Dissecting the routing architecture of self-organizing networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2006, 13(6): 98 – 104.

[19] Kwiatkowska M Z. Constantinou C. A biologically inspired QoS routing algorithm for mobile ad hoc networks proceedings[A]. AINA'05[C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2005, (1): 426 – 31.

[20] Leibnitz K, Wakamiya N, Murata M. Biologically inspired self-adaptive multi-path routing in overlay networks [J]. Communications of the ACM, 2006, 49(3): 62 – 67.

[21] Liu Z, Gao W, Kwiatkowska M. A biologically inspired energy-aware routing algorithm for communications in cyberworlds [A]. In Proc. CW2008[C]. Piscataway: IEEE Inc., 2008. 772 – 777.

[22] Szymanski B K, Morrell C, Geyik S C, et al. Biologically inspired self selective routing with preferred path selection[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5151: 229 – 240.

[23] Balasubramaniam S, Botvich D, Jennings B, et al. Policy-constrained bio-inspired processes for autonomic route management[J]. Computer Networks, 2009, 53(10): 1666 – 1682.

[24] Caro G D, Dorigo M. AntNet: Distributed stigmergetic control for communication networks[J]. Journal of Artificial Intelligence, 1998, (9): 317 – 365.

[25] 徐雷鸣,庞博,赵耀. NS 与网络模拟. 北京:人民邮电出版社出版,2003:1 – 9

[26] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用(第三版)[M]. 广州:华南理工大学出版社,2001.

[27] Odlyzko A. Paris metro pricing: The minimalist differentiated services solution[A]. In Proc. IEEE/IFIP IWQoS'99[C], Piscataway: IEEE Inc., 1999. 559 – 561.

[28] Maillé P, Tuffin B. Pricing the Internet with multibid auctions [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(5): 992 – 1004.

[29] 施锡铨. 博弈论[M]. 上海:上海财经大学出版社,2000.
Shi Xi-quan. Game Theory[M]. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2000. (in Chinese)

[30] Dijkstra E. W. A note on two problems in connection with graphs. Numerical Mathematics, 1959, 1: 269 – 271.

作者简介:



王兴伟　男,1968 年 1 月出生于内蒙古包头市,博士,东北大学信息科学与工程学院教授,博士生导师,主要研究领域为下一代互联网、自组织网络和移动互联网等.



郭　磊(通信作者)　男,1980 年 4 月生于四川省眉山市,博士,东北大学信息科学与工程学院教授,博士生导师,主要研究方向为新一代互联网和光网络生存性技术等.
E-mail: guolei@ise.neu.edu.cn



秦培玉　男,1985 年 2 月出生于辽宁省沈阳市,东北大学信息科学与工程学院硕士生,主要研究领域为 QoS 管理机制.



黄　敏　女,1968 年 2 月出生于辽宁省沈阳市,博士,东北大学信息科学与工程学院教授,博士生导师,主要研究领域为算法设计与优化等.