

Ad hoc 网络的基于债务关系的合作激励机制

于坤, 单劲松, 朱全银

(淮阴工学院 计算机工程学院, 江苏 淮安 223002)

摘要: 合作的激励机制对拓展 Ad hoc 网络的应用具有决定性作用, 然而在资源有限的网络条件下实施激励机制对协议开销控制的要求很高。依托文件共享应用, 提出了基于债务关系的文件共享激励机制 SDE。由于只涉及直接交互信息, 避免了针对全局声誉方案的欺骗与攻击行为及虚拟货币方案所存在的货币造假问题, 易于分布式实现。通过引入节点间的重复博弈, 节点自发维护债务的有效性。提出了债务网络上的路由算法 M-PGA, 该算法采用局部路由思想, 可以匹配债务网络动态性, 而基于最优路径的路由选择可提高路由的成功率。

关键词: Ad hoc 网络; 激励机制; 重复博弈; 路由算法; 债务网络

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)09-3444-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.065

Debt based mechanism to stimulate cooperation in Ad hoc networks

YU Kun, SHAN Jin-song, ZHU Quan-yin

(School of Computer Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an Jiangsu 223002, China)

Abstract: The incentive mechanism for cooperation is a decisive fact to extend the application of Ad hoc networks. But in networks with insufficient resource the cost of incentive mechanism must be restricted. In the application of file sharing, this paper proposed an incentive mechanism called SDE. Since only concerns direct interaction information, SDE was easy to be implemented in distributed way. SDE could also avoid the cheat behavior and the attack behavior of global reputation schemes and the problem of the fake of money within virtual currency schemes. By constructing repeat games among nodes, the nodes were willing to maintain the availability of debt relationships spontaneously. It proposed a routing algorithm in debt networks called M-PGA which can match the dynamic by adopting the idea of local routing and improve the routing performance by routing selection based on best path.

Key words: Ad hoc network; incentive mechanism; repeat game; routing algorithm; debt network

0 引言

Ad hoc 网络是一种多跳的无线网络, 多跳中继能够以有限的发射能量延展通信的范围, 增强区域频谱效用, 增加网络吞吐量与容量, 且无须通信基础设施就能够快速部署。目前, 面向军事、救灾救援、临时会议等单一管理域的合作型 Ad hoc 网络占主导地位, 但竞争性 Ad hoc 网络的应用和研究也并不鲜见。当 Ad hoc 网络由无组织节点组成时, 合作机制是必不可少的。然而在资源有限的 Ad hoc 网络中实施激励机制, 对协议开销控制的要求是对研究者的一个巨大的技术挑战。

多跳无线网络常用的激励手段包括声誉^[1,2]、虚拟货币^[3-9]等, 这些激励方案常采用集中式的仲裁机构(或称可信第三方)^[5-7], 在自组织环境下扩展性及可应用性差。分布式激励机制则存在两方面的困难:

a) 需要以分布方式维护声誉或虚拟货币的完整性与全局一致性, 除了网络开销问题, 分布式协议还面临虚假声誉推荐或伪造货币的威胁。

b) 由于没有外部机构的支持, 激励机制的执行只能由网络成员自己承担, 网络需要自我激励手段来引导节点完成激励功能。

常见的解决方案是采用防策略的硬件机制, 如看门狗或防篡改的支付硬件^[4], 避免了机制的自我激励问题。但是硬件方案增加了实施的成本, 难以应用于弹性组网环境。

依托文件共享应用, 针对竞争性 Ad hoc 网络中合作激励机制的实用化, 提出了基于债务关系的文件共享激励机制以及债务网络的最优路径路由算法。该激励机制也可以用于 Ad hoc 网络的其他应用领域。该激励机制具有以下特点:

a) 用户决策只考察与直接交互对象的历史信息, 易于分布式实现。

b) 这种交互信息可以看做一种简单的局部声誉或债务关系, 避免了全局声誉在收集、推荐、聚集和存储声誉时可能遇到的欺骗与攻击行为; 同时它也避免了虚拟货币的伪造问题。

c) 这种激励机制是自激励的、内生的。

1 债务网络上的文件交换方案 SDE

1.1 债务关系 SimDebt 及债务网络 DRN

定义 1 SimDebt 是节点间一种连续型债务关系, SimDebt (i, j) 表示 i 对 j 的债权, SimDebt 具有以下性质:

a) 累加性。对任意节点 i , 与同一节点 j 在不同交互过程中产生的债务关系可以累加。

收稿日期: 2011-11-17; 修回日期: 2011-12-29

作者简介: 于坤(1972-), 男, 江苏淮安人, 讲师, 博士, 主要研究方向为计算机网络(vanguard@yeah.net); 单劲松, 男, 江苏徐州人, 讲师, 主要研究方向为人工智能; 朱全银, 男, 江苏淮安人, 教授, 主要研究方向为数据挖掘等。

b)邻接性。SimDebt(i, j) 只能存在于物理邻居节点 i 与 j 之间。

c)对偶性。当 i 获得债权 SimDebt(i, j) 时, j 获得债权 $- \text{SimDebt}(i, j)$, 即 $\text{SimDebt}(i, j) = - \text{SimDebt}(j, i)$ 。

d)有界性。 $-D_{\max} < \text{SimDebt}(i, j) < D_{\max}$, D_{\max} 为全局常数。

定义 2 债务网络 DRN。 Ad hoc 网络的节点集 V 及债务集合 $\{\text{SimDebt}(i, j) \mid i, j \in V\}$ 组成了有向加权网络 DRN, $\text{SimDebt}(i, j) > 0$ 在 DRN 中对应一条 i 指向 j 的权值为 $\text{SimDebt}(i, j)$ 的边。

显然, DRN 是 Ad hoc 网络的一个子网, 节点不能与其他节点随意建立债务关系, 有利于建立长期的重复交互。

1.2 文件交换方案 SDE

SDE 规定节点上传单位文件获得的 SimDebt 为 λ_1 , 节点转发单位文件获得的 SimDebt 为 λ_2 , 请求节点共支出 $\lambda_1 + k\lambda_2$ (k 为转发节点数)。

图 1(a) 示意了文件交换的 SimDebt 支出, 其中实线表示文件的转发路径 P_{forward} , 虚线表示请求节点向 P_{forward} 上的各个节点支付的 SimDebt。

然而, 由于 SimDebt 的邻接性, 非相邻节点不能进行直接的债务转移, 必须通过 DRN 中其他节点的债务中继来实现。债务中继有两类可行的方案: a) 采用由请求节点 v_0 发起的迭代算法, 由 v_0 分别构造到各相关节点的独立的债务链路; b) 采用递归算法, 即转发路径上的任意节点将转发任务分派给上一跳并提供支出相应费用。SDE 采用递归算法, 如图 1(b) 所示, 请求节点 v_0 向中继节点 v_1 发出下载请求并支付总费用 $\lambda_1 + 2\lambda_2$, v_1 提取中继费用 λ_2 并将剩余费用 $\lambda_1 + \lambda_2$ 转发给 v_2 , 以向 v_2 获取文件, 所形成的请求节点到服务节点的债务链路称为 P_{debt} 。

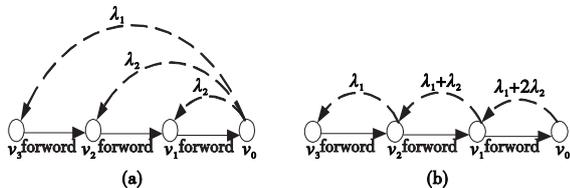


图1 单位文件下载中的债务分配

设文件转发路径为 $\langle v_0, v_1, v_2, \dots, v_n \rangle$, 当下述条件满足时, 仅通过文件转发路径上的节点即可完成递归算法的债务更新, 即 $P_{\text{forward}} = P_{\text{debt}}$

$$|\text{SimDebt}(v_i, v_{i+1})| < D_{\max} - \lambda_1 - (n - i - 1)\lambda_2 \quad (1)$$

图 2 示意了条件式(1)满足时, 文件下载引起的 DRN 的债务更新过程, 其中 $\lambda_1 = 10, \lambda_2 = 5, D_{\max} = 20$ 。图 2 中, 实线表示节点的现有债权, 虚线表示将支付的费用与方向。

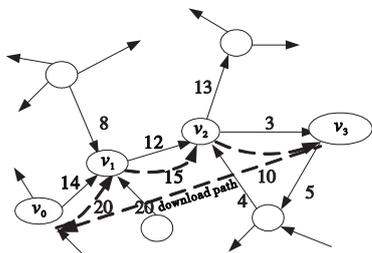


图2 满足条件式(1)的债务更新过程

图 2 的债务更新包含以下三个步骤:

- a) $\text{SimDebt}(v_0, v_1) \leftarrow \text{SimDebt}(v_0, v_1) - 20$ 。
- b) $\text{SimDebt}(v_1, v_2) \leftarrow \text{SimDebt}(v_1, v_2) - 15$ 。
- c) $\text{SimDebt}(v_2, v_3) \leftarrow \text{SimDebt}(v_2, v_3) - 10$ 。

然而条件式(1)并不总能得到满足, 这时节点将发起间接债务链路的构造过程。例如, 若将图 2 中 v_1 的债权改为 $\text{SimDebt}(v_1, v_2) = -12$, 显然 v_1 的债权不再满足条件式(1), 但 v_1 可以通过路径 $\langle v_1, v_4, v_2 \rangle$ 间接地将费用支付给 v_2, v_4 称为债务中继节点。图 3 为债务更新的示例。

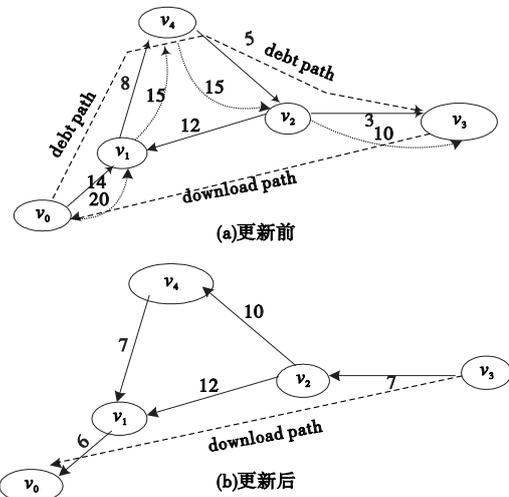


图3 不满足条件1的债务更新过程

综合以上分析, 在 P2P 网络债务更新算法的基础上, 提出了如下的文件交换方案 SDE:

- a) 借助 Ad hoc 网络的路由算法构造请求节点到服务节点的最优文件转发路径 P_{forward} 。
- b) 沿 P_{forward} 逆向构造请求节点到服务节点的债务链路 P_{debt} 。若 P_{forward} 上的当前节点满足约束条件式(1), 继续考察 P_{forward} 的下一节点; 若 P_{forward} 上的节点 v_i 与上一跳 v_{i+1} 之间不满足约束条件式(1), 则启动 DRN 上的路由算法 M-PGA(见第 2 章), 构造 v_i 到 v_{i+1} 的间接债务链路, 并冻结相关债务。
- c) 若债务链路 P_{debt} 构建成功, 开始下载文件, 在文件下载完成后更新被冻结的债务。
- d) 否则解冻被冻结的债务, 并标记 P_{forward} 为关于该请求的不可达链路, 转 a) 重试。
- e) 若重试达到最大次数, 放弃本次文件请求, 将失败文件请求在请求队列中排队, 直到申请成功或队列溢出。

2 DRN 网络的路由算法

激励机制 SDE 涉及在 DRN 网络中搜寻特定条件债务路径的问题, 这实际上是 DRN 网络上的一种约束路由问题。由于该问题在 SDE 执行过程中频繁出现, 因此路由算法对提升 SDE 机制性能、提高其在资源受限的 Ad hoc 网络中的应用面非常关键。

由于每次债务更新都将引起债务网络的拓扑变化, 债务网络通常比 Ad hoc 网络具有更高的网络动态性。DRN 是 Ad hoc 网络的有向子网, 而 Ad hoc 网络的逻辑拓扑与物理拓扑密切相关, 难以形成结构化拓扑。地理路由在寻路时仅需单跳路由信息, 很适合 DRN 等拓扑变化非常剧烈的网络。其中

GPSR^[10]、GFG^[11]实现了UDG图上的有担保的Perimeter路由; BVGF^[12]、PAGER^[13]通过构造原网络拓扑的无凹节点的子图,从而支持有保证的地理路由; PGA^[14]则利用路径信息获得了很高的路由成功率。

在PGA路由的基础上,可实现一种借助地理信息的路由算法M-PGA。M-PGA沿用了其中的路径构造算法D-PGA,用于构造基本路由表并处理底层Ad hoc网络动态性。同时,M-PGA采用了新的寻路算法M-GA,它针对DRN网络的极端动态环境,采用了仅依据单跳债务信息的贪婪路由,但是为了减少路由的盲目性,在路由算法中有机地融合了H-GA算法^[14]来确定DRN路由的方向。其首先在源节点所有邻接节点中筛选出满足债务更新条件的节点集,然后用H-GA从该节点集中选择最佳路径,并沿该路径继续考察债务关系。

M-GA是带有债务约束的H-GA,因此M-GA继承了H-GA的逐步逼近和无环性特性。对于由此造成的路由成功率的降低,可以采用并行或串行搜索方法加以补偿。

M-PGA引入了债务链路构造报文DLC,以及债务构造反馈报文DCF。DLC的格式为 $\langle 1, seq, creditor, debtor, debt \rangle$; DCF的格式为 $\langle 2, seq, debtor, code \rangle$,其中:

$$code = \begin{cases} 0 & \text{构造失败} \\ 1 & \text{构造成功} \end{cases}$$

发起节点为creditor,终节点为debtor。每次调用M-PGA使用不同的报文序列号seq,因此 $\langle seq, debtor \rangle$ 可以唯一地标志此次债务链路构造。

以节点 v_i 到 v_{i+1} 满足债务约束条件式(1)的债务链路构造问题为例(图3),描述M-GA对H-GA的主要修改如下:

a) 债务链路的发起节点 v_i 发起债务链路的构造过程:

(a) 构造DLC报文dlc及候选路径集 W , $dlc = \langle 6, seq, v_i, v_{i+1}, \lambda_1 + (n - i - 1)\lambda_2 \rangle$, $W = \{ \text{满足约束条件} | \text{SimDebt}(v_i, path, next) | < Dmax - dlc.debt \text{ 的路由表项 } path \}$,以 W 为临时路由表调用H-GA算法向 h 转发dlc, h 为 v_i 的后继;

(b) 若转发成功, v_i 更新债务表 $SimDebt(v_i, h) = SimDebt(v_i, h) - dlc.debt$,并将 $\langle seq, v_i, v_i, h, dlc.debt \rangle$ 计入冻结债务表;

(c) 否则,向M-GA的调用者反馈失败消息并返回。

b) 当中继节点 m 从前驱 k 收到dlc后:

(a) 更新债务表 $SimDebt(k, m) = SimDebt(k, m) - dlc.debt$,并将 $\langle seq, dlc.creditor, k, m, dlc.debt \rangle$ 计入冻结债务表;

(b) 构造候选路径集 W , $W = \{ \text{满足约束条件} | \text{SimDebt}(m, path, next) | < Dmax - dlc.debt \text{ 的路由表项 } path \}$,以 W 为临时路由表调用H-GA向 h 转发dlc, h 为 m 的后继;

(c) 若转发成功, m 更新债务表 $SimDebt(m, h) = SimDebt(m, h) - dlc.debt$,并将 $\langle seq, dlc.creditor, m, h, dlc.debt \rangle$ 计入冻结债务表;

(d) 否则,向 k 反馈DCF报文dcf, $dcf = \langle 7, seq, dlc.creditor, 0 \rangle$,并恢复被冻结的债务 $\langle seq, dlc.creditor, k, m, dlc.debt \rangle$ 。

c) 目的节点 v_{i+1} 从前驱 k 收到dlc后:

(a) 更新债务表 $SimDebt(k, v_{i+1}) = SimDebt(k, v_{i+1}) - dlc.debt$,并将 $\langle seq, dlc.creditor, k, v_{i+1}, dlc.debt \rangle$ 计入冻结债务表;

(b) 向 k 反馈DCF报文dcf, $dcf = \langle 7, seq, dlc.creditor, 1 \rangle$ 。

d) 当节点 m 收到报文dcf后:

(a) 若 $dcf.code = 0$,恢复以 $\langle seq, dlc.creditor \rangle$ 标志的冻结债务,并且:

① 若 $m < v_i$,向前驱 k 转发dcf;

② 若 $m = v_i$,向调用者反馈失败消息并返回;

(b) 若 $dcf.code = 1$,向前驱 k 转发dcf;若 $m = v_i$,向调用者反馈成功消息并返回。

为了简化算法描述,以上所述M-GA假设了一种无差错的理想网络,而在真实网络环境中报文丢失或出错,可能造成债务的永久冻结、进程悬挂等不良后果,因此实现时应对相关对象设置超时定时器。

由M-GA可以发现,当 v_i 到 v_{i+1} 的债务链路构造成功时,相应的债务表项处于冻结状态。只有当SDE的文件下载完成时,这些债务表项才能最终获得更新;否则,只要 $P_{forward}$ 上的部分债务链路构造失败,所有已冻结的债务表项都将被重新计入节点的债务表。

3 激励机制的有效性分析

3.1 博弈模型

假设文件呈均匀分布,节点可随机移动和随机加入退出系统。节点分轮交互,每轮间隔为 t_0 。节点每轮发出一次新的文件请求,请求呈随机分布,因此各节点的一次请求满足率(即 P_{debt} 构造成功率)相等。失败请求下一轮重试。

假设节点的单位文件下行代价为 c_1 ,上行代价为 c_2 , $c_2 > c_1$ 。由此可得,单位文件上传和转发的开销分别为 c_2 和 $c_1 + c_2$ 。节点下载单位文件获得收益 d ,即收益为服务量的线性函数;考虑下载产生的下行代价,下载单位文件可获得效用 $d - c_1$ 。该假设简化了对用户需求的满足等主观因素,实际用户收益也可能是服务量的非线性函数。

由于节点常因电池失效或节点移动加入或退出网络,设下一轮节点保持在线的概率为常数 δ ,则节点的债权在下一轮有效的概率为 δ 。从经济学角度来看, δ 即为贴现因子。

3.2 博弈分析

在该博弈问题中,节点可接受或拒绝其他节点依据债务关系提出的正当服务请求,该行为决策构成了节点的策略空间。

定理 1 债务关系平均周转周期为 $1/p$, p 为DRN路由成功率的期望。

证明 由于文件分布和文件请求服从均匀分布,每轮节点将被其他节点请求一次服务,则在前 $n - 1$ 次债务链路构造失败,第 n 次债务链路构造获得成功的概率为 $p(1 - p)^{n-1}$ 。因此,请求成功需要的平均轮数为

$$\sum_{n=1}^{\infty} np(1-p)^{n-1} = p[1 + (1-p) + (1-p)^2 + \dots] = \sum_{i=1}^{\infty} (1-p)^i = 1/p$$

即债务关系转换为服务的平均周期为 $1/p$ 轮。

定理 2 若满足条件 $\delta^{1/p} \frac{(d - c_1 - c_2)\lambda_2}{\lambda_1 + (h - 2)\lambda_2} > c_1$ 以及 $\delta^{1/p}$

$\frac{(d - c_1)\lambda_1}{\lambda_1 + (h - 2)\lambda_2} > c_2$, h 为平均下载路径长度,节点遵从SDE方案所规定的行为规范构成了该博弈问题的一个Nash均衡。

证明 假设节点的所有邻居节点遵从 SDE 方案,而该节点采取背叛策略,这时该节点或者不承认已更新的债务关系,或者拒绝提供文件转发或上传。

根据 SDE 规范,邻居节点在未来的交互中将根据己方认定的债务值为背叛节点提供服务。

若节点 a 是服务节点,其采取合作策略将获得债权 λ_1 ,而单位债权可获得平均文件服务数为 $1/(\lambda_1 + (h - 2)\lambda_2)$,因此合作策略未来可获得的收益为 $\frac{(d - c_1)\lambda_1}{\lambda_1 + (h - 2)\lambda_2}$ 。

由定理 1 可知,债务关系向服务转换的平均周期为 $1/p$ 轮,每轮的贴现因子为 δ 。由此可知,节点收益可折合为当前收益 $\delta^{1/p} \frac{(d - c_1)\lambda_1}{\lambda_1 + (h - 2)\lambda_2}$ 。

服务节点拒绝服务可节约带宽及电池损耗的开销 c_2 ,但因此将失去未来获得服务的机会。

因此,服务节点合作的条件为

$$\delta^{1/p} \frac{(d - c_1)\lambda_1}{\lambda_1 + (h - 2)\lambda_2} > c_2 \tag{2}$$

同理,对于转发节点,节点合作的条件为

$$\delta^{1/p} \frac{(d - c_1 - c_2)\lambda_2}{\lambda_1 + (h - 2)\lambda_2} > c_1 \tag{3}$$

命题得证。

从定理 2 可知,当网络环境满足合作条件时,若博弈对方服从 SDE 行为规范,己方的最优策略也将服从规范。因此,重复博弈结构保证了对于理性节点而言,该机制是可信的和有效的。

4 模拟及性能分析

实验采用 C++ 编程语言,在单机上仿真了特定网络度的 Ad hoc 随机网络,其中网络开销用每节点发送的平均协议报文数来度量。

每轮实验中,每个节点使用指定的路由算法向随机选择的目标节点发送一个报文。实验对网络度分别为 4、5、6、7、8 的 50、100、200、300、400 个节点的网络作了模拟,每种情况产生 100 个随机的场景,取 100 轮实验的平均值作为模拟的结果。

为了进行 M-PGA 的性能实验及 SDE 文件交换机制的有效性实验,在动态 Ad hoc 网络上构造债务网络 M-PGA,实验涉及的主要参数如表 1 所示。

表 1 DRN 网络实验的主要参数

下行代价 c_1	1
上行代价 c_2	5
每文件用户收益 d	100
转发费用 λ_1	5 SimDebt
上传费用 λ_2	10 SimDebt
网络度	8
每轮周期/s	300
路径最大长度	9
路径更新周期 T/s	60

对 DRN 上的 M-PGA 路由算法与底层 Ad hoc 网络上的 D-PGA 进行了对比实验。设节点作平均速度为 0.01 r/s 的随机运动,服务节点有足够能力提供服务并能及时更新债务关系。实验结果如图 4 所示,由于债务网络强动态性,单播路由的路由成功率远低于底层 Ad hoc 网络的 D-PGA 路由,增加 M-PGA

路由的重试次数 \max_times 可以提高路由成功率。网络的规模对 M-PGA 的影响是多方面的:当网络规模增大时,节点间债务链路的存在性有可能增大,这在重试次数 $\max_times = 8$ 时体现得最为明显;另一方面,网络规模的扩大也增加了债务链路长度,从而增加了 DRN 路由失败几率。

实验还考察了节点移动性对 SDE 文件交换机制的合作有效性的影响。在该实验中,节点具有自主决策能力,节点在每轮结束时以概率 0.1 重新选择自己的策略,选择规则为:节点在本轮获得的效用高于上一轮效用保留当前策略,否则选择上轮策略。节点的策略只有两类,即履行债务义务的合作策略和不履行债务义务的背叛策略。节点加入网络时随机选择合作或背叛。实验中设定网络节点数为 400, M-PGA 的 \max_times 取 4,不考虑电池耗尽以及用户主动离开网络导致的网络动态性。

图 5 的实验结果表明,当节点移动性增加时,合作并不一定是用户的最佳选择。当节点移动速度大于 0.014 r/s 时,节点合作率降到 20% 以下。

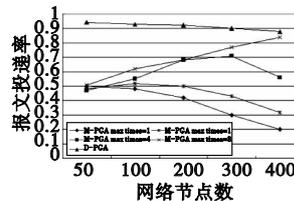


图4 移动环境下的M-PGA 算法性能

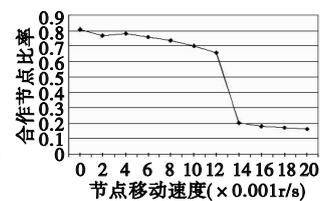


图5 节点移动性对合作机制有效性的影响

节点移动性对 SDE 的影响主要包括两个方面,即移动性降低了贴现因子,同时也降低了路由成功率。条件式(2)(3)说明,贴现因子、路由成功率以及下载路径长度对机制有效性均有影响,其中贴现因子及路由成功率对机制有效性的影响为指数级。为了提高节点轮间的贴现因子,可以将大文件分成若干小文件块,将文件块作为基本的共享单位,从而减小文件下载及债务更新的周期。由于在更小的时间周期内,节点间链路失效的可能性降低,贴现因子相应提高。

5 结束语

SDE 并不需要清算机构的存在,而是通过引入节点间的重复博弈结构,借助节点内在利益最大化的理性特点自发地形成。理论分析与实验表明,采用 SimDebt 的合作激励机制,SDE 是有效的。在路由算法 D-PGA 的基础上,提出了应用于连续型边权网络 DRN 的改进算法 M-PGA。基于邻接节点债务关系的贪婪路由可以匹配 DRN 的网络动态性,而最优路径路由则进一步提高了路由的成功率。

下一步需研究在 DRN 上更为有效的路由算法,克服 SDE 需借助地理路由的问题。同时,如何将该方案应用于路由选择、流媒体、组播等新的应用领域也是期待解决的问题。

参考文献:

[1] BANSAL S, BAKER M. Observation-based cooperation enforcement in Ad hoc networks[R]. [S. l.]:Stanford University,2003.
 [2] BUCHEGGER S, Le BOUDEC JY. Performance analysis of the CONFIDANT protocol[C]//Proc of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. New York:ACM Press, 2002:226-236. (下转第 3451 页)

(上接第 3447 页)

- [3] MAHMOUD M E, XUEMIN S. PIS: a practical incentive system for multihop wireless networks[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2010, 59(8):4012-4025.
- [4] BUTTYAN L, HUBAUX J P. Stimulating cooperation in self-organizing mobile ad hoc networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2003, 8(5):579-592.
- [5] VISHNUMURTHY V, CHANDRAKUMAR S, SIRER E G. KARMA: a secure economic framework for P2P resource sharing[C]//Proc of the 3rd Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems. 2003.
- [6] ZHONG Sheng, CHEN Jiang, YAHG Y R. Sprite: a simple, cheat proof, credit-based system for mobile Ad hoc networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2003:1987-1997.
- [7] MAHMOUD M E, SHEN Xue-min. DSC: cooperation incentive mechanism for multi-hop cellular networks[C]//Proc of IEEE ICC. Piscataway, NJ:IEEE Press, 2009:569-574.
- [8] MAHMOUD M E, SHEN X. Stimulating cooperation in multi-hop wireless networks using cheating detection system[C]//Proc of the 29th Conference on Information Communication. 2010:776-784.
- [9] 汪洋, 林闯, 李泉林, 等. 基于非合作博弈的无线网络路由机制研究[J]. *计算机学报*, 2009, 32(1):54-68.
- [10] KARP B, KUNG H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]//Proc of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2000:243-254.
- [11] BOSE P, MORIN P, STOJMENOVIC I, *et al.* Routing with guaranteed delivery in Ad hoc wireless networks[J]. *Wireless Network*, 2001, 7(6):609-616.
- [12] XING Guo-liang, LU Chen-yang, PLESS R, *et al.* On greedy geographic routing algorithms in sensing-covered networks[C]//Proc of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2004:31-42.
- [13] ZOU Le, LU Mi. PAGER: a distributed algorithm for the dead-end problem of location based routing in sensor networks[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2005, 54(4):1509-1522.
- [14] 于坤, 吴国新, 许立波, 等. 基于最优 Path 的 Ad hoc 网络地理路由算法[J]. *计算机研究与发展*, 2007, 44(12):2007-2011.