

# 基于多方议价博弈的机会网络高吞吐量低开销概率路由算法

任智, 索建伟, 刘文朋, 雷宏江, 陈前斌

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

**摘 要:** 针对含自私节点的机会网络中现有基于议价博弈的概率路由算法存在的消息单向传递影响转发概率提高、依赖虚拟货币进行交易削弱节点购买力以及消息交易过程有冗余交互的问题, 提出一种基于多方议价博弈的高吞吐量低开销概率路由算法—HLPR-MG。HLPR-MG 算法通过将节点两两博弈扩展为多方博弈以加快消息转发概率的提升, 引入“以物易物”方式增强节点购买力, 并且改进现有交互机制以减少博弈次数, 从而达到提高网络吞吐量的和减小控制开销的效果。理论分析验证了 HLPR-MG 算法设计的有效性。仿真结果表明: 与基于议价博弈的现有典型路由算法 GSCP 和 BG 相比, HLPR-MG 算法的吞吐量和消息传送成功率至少提高了 3.63%, 而控制开销和平均端到端消息时延则分别降低了 17.76%和 4.03%以上。

**关键词:** 机会网络; 概率路由; 博弈; 吞吐量; 开销

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

## High-throughput and low-overhead probabilistic routing based on multi-player bargaining game for opportunistic networks

REN Zhi, SUO Jian-wei, LIU Wen-peng, LEI Hong-jiang, CHEN Qian-bin

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065)

**Abstract:** To address the problems existing in the present probabilistic routing based on bargaining games, including unidirectional transmission of messages degrades the success ratio, depending on the virtual money decreases the purchasing power of nodes, and redundancy exists in the interaction process of messages, an routing algorithm based on multi-player bargaining game for opportunistic networks, HLPR-MG is proposed. Through extending the two-player game to a multi-player bargaining game, introducing the barter trade to enhance purchasing power of nodes, and improving the existing interaction mechanism to reduce the times of game, our proposed algorithm achieves the effect of increasing network throughput and decreasing control overhead. Theoretical analysis verifies the effectiveness of HLPR-MG, and simulation results show that HLPR-MG improves the network throughput and success ratio at least 3.63%, and reduces the control overhead and average end-to-end delay by more than 17.76% and 4.03%, respectively, as compared to the classical GSCP and BG algorithms.

**Key words:** opportunistic networks; probabilistic routing; game; throughput; overhead

### 1 引言

机会网络是一种不需要在源和目的节点之间存在完整路径, 利用节点移动带来的相遇机会实现通信的移动自组织网络<sup>[1]</sup>, 由于能够在较为苛刻的

环境下进行通信, 因此在军事、救灾和野外地区有广泛的应用, 机会网络已成为未来普适计算的重要组成部分和移动 ad hoc 网络 (MANET, mobile ad-hoc networks) 的重要发展方向。

在实际环境中, 由于机会网络中节点有可能归

收稿日期:

; 修回日期:

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (61379159); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目 (IRT1299); 重庆市自然科学基金资助项目 (cstc2012jjA40051); 重庆市教委基金资助项目 (Kjzh11206)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61379159); The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1299); The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2012jjA40051); The Special Fund of Chongqing Municipal Education Commission (Kjzh11206)

属于不同的管理方，而且资源（如能量、存储空间等）有限，为了节约资源，节点存在拒绝无偿为其它节点转发消息的可能，这种自私行为使得现有的路由机制难以正常工作，导致网络性能退化<sup>[2-5]</sup>，使得传统的机会网络转发策略的网络性能受到挑战。

针对机会网络中节点自私行为，人们引入经济学中博弈论的方法<sup>[6-12]</sup>，通过设计合理的机制，使节点的自私行为带来的短期收益小于节点转发带来的长远收益，因此理性节点在进行转发决策时，为保证其收益最大化，将积极参与网络中消息的携带与转发，从而在整体上有利于提高网络吞吐量等性能。但将博弈论运用到机会网络路由中还存在一些没有解决的问题，一种具有代表性的基于议价博弈的概率路由算法 GSCP (Game-theoretic approach to Stimulate Cooperation for Probabilistic Routing)<sup>[12]</sup>便存在着对消息传递方向限制过严格和对虚拟货币的依赖性过强等问题，影响了吞吐量等性能。为了解决上述问题，本文在前期研究<sup>[13]</sup>的基础上提出一种基于多方博弈的高吞吐量低时延概率路由算法并进行了仿真验证。本文的主要贡献有：①通过增强对网络连通性的运用，对消息单向性传递导致消息转发概率提升偏慢问题的求解进行了改善；②引入“以物易物”机制，降低交易对虚拟货币的依赖；③在不影响交易效果的前提下，改进现有交互流程，精简操作。

## 2 相关工作

关于机会网络中基于博弈机制的路由算法，目前已有一些研究<sup>[6]</sup>。唐等<sup>[6]</sup>提出基于两跳 ACK 确认机制，节点各自维护一个信誉值表，并进行信息共享，令  $D_{ij}$  表示节点  $i$  对节点  $j$  的信誉评价，则节点  $i$  对节点  $j$  的综合信誉评价  $T_{ij} = (\sum D_{ik} \cdot D_{kj}) / \sum D_{ik}$ ，若节点的综合信誉评价低于阈值  $T$ ，则对自私节点做出惩罚，从而迫使节点保持理性，促进网络性能提升，但其两跳范围内的 ACK 消息采取泛洪的方式在网络中传播势必会造成较大的网络开销。Bigwood 等<sup>[8]</sup>提出的基于喷雾式路由的自私节点自主检测机制可以减少节点间 ACK 确认带来的开销，但由于机会网络中节点的移动性，使得自私节点的检测很难满足实时性要求。虚拟货币<sup>[9,10]</sup>机制通过在每个节点中一个计数器设备来对节点的财富进行统计计算，当节点发送自己的数据分组时，计数器数值 count 减少；在节点转发数据分组时，数值

增加，所有的节点必须维持计数器的值大于零，激励自私节点为其他节点提供服务来赚取一定的报酬，可以有效促进自私节点参与消息转发，但这种计数设备由于不受本节点控制，难以在实际中得到应用。Barter<sup>[11]</sup>是一种基于互惠机制的路由算法，博弈双方互相交换彼此感兴趣的消息从而促进网络吞吐量性能的提升，但该算法适用于流量完全对称的网络，对于非对称流量的网络性能提升不明显。GSCP<sup>[12]</sup>是一种具有代表性的基于议价博弈的概率路由算法，该算法认为消息对到达目的地概率高的节点具有价值，消息从价值量低的节点向价值量高的节点卖出，从而促进网络性能，令发送消息的源节点为消息  $m$  赋予一定的价值  $w$ ，若中间转发节点  $i$  到达目的地的概率为  $P_{id}$ ，则消息价值  $V = wP_{id}$ 。GSCP 通过引入第三方裁判节点 CCC (credit clearance center) 对自私节点进行惩罚，避免了议价博弈过程中可能导致的多轮议价，有效提高了网络吞吐量；但它对消息传递的方向限制过于严格，对虚拟货币的依赖性较强且在博弈过程中存在一定的交互冗余。在下文中我们将通过设计新的机制和路由算法来解决上述问题。

## 3 网络模型与问题描述

### 3.1 网络模型

**定义 1** (移动模型) 实际生活中，节点的移动并非纯随机移动，而是具有一定的可预测性。如果一对节点在过去的一段时期内相遇过多次，则其在未来再次相遇的可能性则较高，本文采用此类更符合节点实际移动规律的移动模型。

**定义 2** (消息价值量) 节点移动过程中，根据现有的概率路由算法<sup>[14]</sup>计算出到其他节点的相遇概率  $P_{i,d}$  (表示节点  $i$  与节点  $d$  的相遇概率)。设消息  $m$  的目的地址为  $d$ ，若消息成功送达目的地，源节点  $s$  愿意为其成功传送支付的总价为  $V$ ，则消息  $m$  对于节点  $i$  的价值量为： $V_m = V \cdot P_{i,d}$ 。

**定义 3** (议价博弈模型) 若节点  $B$  想要获得节点  $S$  中的消息  $m$ ，会向发送购买  $S$  请求，节点  $S$  制定出交易价格，若  $B$  同意  $S$  的定价，则  $S$  将  $m$  发送给  $B$  并获取一定的报酬，否则  $S$  和  $B$  继续进行议价博弈，直至达成协议或通信中断。

**定义 4** (收益结算) 节点交易完成后，卖方节点获得买方节点向其发送的支付“支票”，当遇到结算中心时，进行收益结算，并向 CCC 支付一

定的交易费用。

### 3.2 问题描述

由于含自私节点的机会网络不同于传统的机会网络，为了便于研究，做出如下假设。

**假设 1** 机会网络中的节点是自私而有理性的，节点会按照设定的能够最大化自私利益机制进行，这样可以保证设定的机制得到有效的实行。

**假设 2** 机会网络中的节点具有足够的数据处理、存储和转发能力。本文假设系统性能的瓶颈主要存在于传输链路。这样可以将研究焦点集中于完成数据传输功能的机会网络路由算法上。

基于上述假设，在研究中发现以 GSCP 为代表的基于议价博弈的路由算法存在以下问题。

1) 消息传递具有单向性。在交易过程中，价值量高的节点从价值量低的节点买入消息，因此，消息总是从转发概率低的节点向转发概率高的节点转发；这种转发概率严格单调上升的转发方式可能会影响消息转发概率提高的速度。

2) 交易中过于依赖虚拟货币，削弱了节点的购买力。

3) 消息交易过程存在冗余交互操作。GSCP 算法的消息交易过程如 0 所示。本文在研究中发现：如果买方节点在求购消息中直接报告其愿出的价钱，卖方节点接受就直接发送消息，则卖方节点的报价消息和买方节点接受报价的消息其实可以省略；这个发现表明现有的消息交易过程存在冗余交互操作，上述 2 条消息是不必要的。

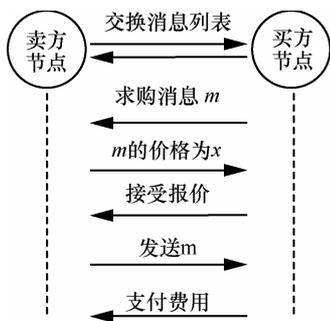


图 1 GSCP 算法的消息交易过程

## 4 HLPR-MG 算法

为了解决 GSCP 存在的上述问题，本文提出了一种基于多方议价博弈的机会网络高吞吐量低开销概率路由算法—HLPR-MG (high-throughput and low-overhead probability routing based on multi-player

bargaining game)，采用多方博弈模型、融合“以物易物”的支付机制、减少交互等新机制，从而达到加快转发概率提升，增强购买力，降低开销的效果。

### 4.1 HLPR-MG 算法新机制

#### 4.1.1 多方博弈

GSCP 路由算法只考虑了 2 个节点间的议价博弈，但在节点移动过程中，尽管节点  $S$  携带的消息  $m$  对于中转节点  $R$  价值量低，但对于节点  $R$  的邻居  $B$  具有较高的价值量，因此， $R$  节点可以首先从  $S$  买进，然后向  $B$  卖出，经过一系列操作，从中赚取一定的中转费用，而对于整个网络来说，消息  $m$  的传送成功率提高。



图 2 多方博弈模型

在多方博弈场景中，博弈的发起者始终为中间节点  $R$ ，如 0 所示。因此在算法设计过程中，只需要对中间节点  $R$  进行约束，设节点  $R$  从  $S$  买进消息  $m$  的价格为  $x_1$ ，将消息  $m$  向节点  $B$  出售的价格为  $x_2$ ，则 CCC 节点可以针对此类多方博弈场景，收取如下的交易费：

$$X(m, x_1, x_2) = \begin{cases} \gamma, & \text{if } (x_2 - x_1) \leq \frac{V_B - V_S + T + P + 2\sigma}{3} \\ k(x + x_2 - x_1 - \frac{V_B - V_S + T + P + 2\sigma}{3}), & O.W. \end{cases} \quad (1)$$

其中， $V_S$ 、 $V_B$  为消息  $m$  对于卖方节点  $S$ 、买方节点  $B$  的价值， $T$  为发送消息能耗， $P$  为接收消息能耗， $\gamma \ll x$ ，为一固定值， $k$  为常数， $1 < k < 2$ 。

通过中间节点同时与买方节点、卖方节点进行博弈，扩展了可博弈场景，亦即增加了消息转发的场景，加快了节点传送成功率的提升，有利于增加网络吞吐量。

#### 4.1.2 融合“以物易物”的支付机制

在原 GSCP 算法中，买方节点  $B$  从卖方节点  $S$  处获得消息  $m$  后，须向  $S$  支付一定的费用。但是在实际运行过程中，节点移动过程中遇到 CCC 节点的时间具有不确定性，可能造成清帐不及时的现象，不仅带来存储开销，也可能导致买方节点的虚拟财富不足，出现购买力不足的问题，此时消息不能从转发概率低的节点向转发概率高的节点转

移, 降低了节点成功率的提升。

本算法提出了融合“以物易物”的支付机制, 允许先交换消息后补差价, 如图 3 所示。设 2 个节点相遇时, 节点  $S$  和节点  $B$  中均携带有对方希望购买的消息,  $S$  从  $B$  中购买消息  $m_2$  需要向  $B$  支付价值  $V_2$ , 而  $B$  从  $S$  中购买消息  $m_1$ , 需要向  $S$  支付  $V_1$ , 假设其中  $V_2 > V_1$ , 则  $S$  和  $B$  可以先交换各自的消息, 然后携带消息价值量低的节点向携带消息价值量高者支付额度为差价的支票。

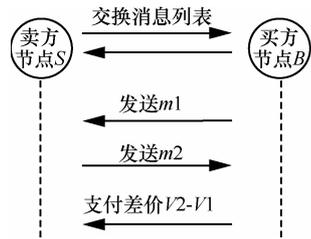


图 3 融合“以物易物”的支付机制

理想情况下, 若  $V_1 = V_2$ , 则 2 个节点充分交换完各自想要的消息后, 不需要向任何一方发送支付信息, 减少了付费方的发送能耗, 同时, 两个节点均不需要存储支付信息, 减少了携带此消息带来的开销。

融合“以物易物”的支付机制降低了节点对于虚拟财富的依赖性, 减少因虚拟货币不足引起的博弈失败, 增加了网络吞吐量和成功率, 降低了时延。

#### 4.1.3 改进的交互机制

在 GSCP 中, 议价博弈的发起者是卖方节点, 因此即使卖方节点根据交易费用函数制定出的价格是博弈双方的最优价格, 买方节点仍需要回复确认消息告知卖方节点自己同意本次交易。这个过程存在冗余操作, 本文提出当 2 个节点相遇并交互各自的信息表后, 若买方节点确认自己想要交易到某个消息时, 不再是告知卖方节点并等待卖方节点定价, 而是率先制定出交易价格, 发送给卖方节点, 卖方节点若同意本次交易就进行, 就将消息发送到买方节点。整个过程如图 4 所示。

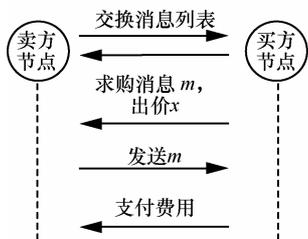


图 4 改进后节点交易流程

减少交互能够降低冗余操作, 能够使得节点在相遇时间段内尽可能多地进行有效数据交互, 避免因相遇时间不足带来的节点不能充分交易的情况, 有利于降低时延, 提升网络吞吐量和成功率。

#### 4.2 算法操作

HLPR-MG 算法的主要操作步骤如下。

- 1) 节点 A、B 相遇后, 进行交互;
- 2) 节点 A、B 分析彼此的信息, 判断是否可以交换消息, 若是进入步骤 3), 否则进入步骤 4);
- 3) 节点 A、B 确认需要交换的消息后分别发送给对方, 期间接收消息节点不需要向发送节点支付报酬, 交换结束后进入步骤 4);
- 4) 进行两两议价博弈;
- 5) 节点通过分析其邻居的信息表, 判断是否可进行多方博弈, 若是, 则进入步骤 6), 否则, 进入步骤 7);
- 6) 进行多方博弈;
- 7) 交易完成后, 节点计算各自发送和接收的消息价值, 接收多的节点向发送多的节点支付差价。

#### 4.3 理论分析

##### 4.3.1 性能分析

**引理 1** 相比于两两博弈, 多方博弈可以使节点具有更高的收益。

由于节点  $R$  在多方博弈过程中的综合的收益为  $(x_2 - x_1) - T - P - 2\sigma$ , 因为  $(T + P + 2\sigma)$  为固定值, 故求节点  $R$  的定价策略等价于求  $(x_2 - x_1)$  的最大值。

由式 (11) 知, 此交易费函数的约束条件为  $(x_2 - x_1) \leq \frac{V_B - V_S + T + P + 2\sigma}{3}$ , 因此在本轮交易中, 节点  $R$  的收益最大为:

$$u = x_2 - x_1 - T - P - 2\sigma = \frac{V_B - V_S - 2T - 2P - 4\sigma}{3} \quad (2)$$

此时剩余的价值量不再属于  $R$ ,  $R$  没有动机破坏交易的公平性, 故  $R$  将制定对节点  $S$  和  $B$  均公平的策略, 使剩余价值量分别被  $S$  和  $B$  平分。

$$\begin{cases} u_S(m) = x_1 - V_S(m) - T(m) - \sigma \\ u_B(m) = V_B(m) - x_2 - P(m) - \sigma \\ u_S = u_B \end{cases}$$

又  $(x_2 - x_1) = \frac{V_B - V_S + T + P + 2\sigma}{3}$ , 综合得

$$u_S = u_B = u_R = \frac{V_B - V_S - 2T - 2P - 4\sigma}{3} \quad (3)$$

经过推算知, 其  $x_1$  和  $x_2$  分别为

$$\begin{cases} x_1 = \frac{V_B + 2V_S + T - 2P - \sigma}{3} \\ x_2 = \frac{2V_B + V_S + 2T - P + \sigma}{3} \end{cases} \quad (4)$$

此时, 参与中间转发节点保持理性报价, 博弈的三方节点收益均获得提升, 而两两博弈不能使收益增加, 得证。

**引理 2** HLPR-MG 算法的控制开销小于 GSCP 算法。

假设节点相遇时节点 A 中存有 B 希望购买的消息, 节点发送消息的能耗为  $\sigma$ , 传输时间为  $\tau$ , 消息到达目的节点平均跳数为  $ETX$ , 携带消息的平均能耗为  $\varepsilon$ , 网络中总共产生的消息总量为  $m$ 。

则原算法中消息完成传送需要的总能耗为

$$E_{orig} = m[(7\sigma + \varepsilon) \cdot (ETX - 1) + 3\sigma] \quad (5)$$

而由于减少交互, 新算法的总能耗为

$$E_{new} = m[(5\sigma + \varepsilon) \cdot (ETX - 1) + 3\sigma] \quad (6)$$

同理知原算法与新算法时延分别为

$$\begin{cases} T_{orig} = m[(7\tau + \varepsilon)(ETX - 1) + 3\tau] \\ T_{new} = m[(5\tau + \varepsilon)(ETX - 1) + 3\tau] \end{cases} \quad (7)$$

可知,  $E_{new} < E_{orig}$ ,  $T_{new} < T_{orig}$ , 得证。

**引理 3** 融合“以物易物”的支付机制的开销小于纯支付机制。

假设节点 A、B 分别携带有对象需要的消息个数为  $n_1$  和  $n_2$ , 不失一般性, 假设  $n_1 \geq n_2$ , 存储一个支付信息需要的开销为  $\varepsilon$ 。

原算法中节点 A 和节点 B 充分交易完成后, 节点 A、B 以及总能量开销分别为

$$\begin{cases} E_A = n_2 \varepsilon \\ E_B = n_1 \varepsilon \\ E_{all} = (n_1 + n_2) \varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

新算法中节点 A、B 以及总能量开销分别为

$$\begin{cases} E'_A = 0 \\ E'_B = (n_1 - n_2) \varepsilon \\ E'_{all} = (n_1 - n_2) \varepsilon \end{cases} \quad (9)$$

可知  $E'_A < E_A$ ,  $E'_B < E_B$ ,  $E'_{all} < E_{all}$ , 得证。

**引理 4** 融合“以物易物”的支付机制能够使节点的购买力大于完全依赖支付机制。

在原 GSCP 算法中, 设节点 A 为获得节点 B

的消息  $m_j$ , 只能通过购买获得, 设其需要支付的价格为  $V_i$ , 则获得 N 个消息后节点 A 需要支付的总价为

$$Sum_{orig} = \sum_{i=1}^n m_i \quad (10)$$

融合“以物易物”的支付机制后, 若节点 A 与节点 B 相遇后, 先进行消息交换, 则节点 A 若想获得消息  $i$  需要支付的价格  $V_i = \max(m_i - m_A, 0)$ , 故 A 获得 N 个消息需要支付的总价为

$$Sum_{new} = \sum_{j=1}^n \max(m_i - m_A, 0) \quad (11)$$

可知  $Sum_{new} < Sum_{orig}$ , 即新机制中节点剩余财富较多, 得证。

#### 4.3.2 计算复杂度

设机会网络的覆盖面积为  $S$ , 节点数为  $N$ , 节点产生消息的速度为  $m$ , 平均运动速度为  $v$ , 网络运行时间为  $T$ 。以下从时间、存储和通信 3 个方面推导 HLPR-MG 算法的计算复杂度。

##### 1) 时间复杂度

设携带消息节点转发消息的概率为  $p$ , 与其他节点相遇后消息的传送服从几何分布, 从而得出时间复杂度  $C_t$  为

$$\begin{aligned} C_t &= o\left(\sum_{i=1}^n (it) p (1-p)^{i-1}\right) \\ &= o\left(pt \sum_{i=1}^n i (1-p)^{i-1}\right) \\ &= o\left(\frac{n(1-p)^{n+1} - (n+1)(1-p)^n + 1}{p} t\right) \end{aligned} \quad (12)$$

##### 2) 存储复杂度

节点在网络运行  $t$  之后存储的数据消息与  $m$ 、 $T$ 、 $N$  等正相关, 在极端情况下, 存储的消息始终未寻到目的节点, 存储复杂度  $C_s$  为

$$C_s = o(mTN) \quad (13)$$

##### 3) 通信复杂度

由于一个数据消息在最极端的情况下需要经过  $N-1$  次转发才能到达目的节点, 因此通信复杂度  $C_c$  为

$$C_c = o(N-1) \quad (14)$$

## 6 仿真

选取 BG 算法和 GSCP 算法作为比较对象, 在

相同的仿真条件下分析比较它们的网络吞吐量、归一化控制开销、消息端到端时延、消息传送成功率等性能。

### 6.1 仿真统计量

1) 网络吞吐量: 网络吞吐量指在单位时间内成功到达目的节点消息的比特数。吞吐量受网络的带宽与网络的额定速率的限制, 计算公式为

$$\pi = P_D / T_i \quad (15)$$

其中,  $P_D$  表示成功到达目的节点消息的比特数;  $T_i$  表示网络运行时间。

2) 平均端到端时延: 平均端到端时延是指所有消息到达目的节点时的平均时延, 计算公式为

$$\bar{T} = \sum_{i=1} T_i / D \quad (16)$$

其中,  $T_i$  表示第  $i$  个到达目的节点的消息的时延;  $D$  表示已到达目的节点的消息个数。

3) 归一化控制开销: 归一化控制开销是累加所有节点发出的控制消息的比特数与到达目的节点消息的比特数的比值, 计算公式为

$$C = P_C / (P_C + P_D) \quad (17)$$

其中,  $P_C$  表示全网发出的控制消息包含的比特数;  $P_D$  表示所有到达目的节点消息的比特数。

4) 消息传送成功率: 传送成功率是指消息成功到达目的节点的个数占网络中源节点发送总数的比例, 计算公式为

$$D_{\text{rate}} = D / S \quad (18)$$

其中,  $D$  表示已到达目的节点的消息个数,  $S$  表示源节点发送的消息个数。

### 6.2 仿真设置

使用 OPNET 作为仿真软件平台, 主要仿真参数设置如表 1 所示

表 1 主要仿真参数设置	
参数	数值
仿真场景/m <sup>2</sup>	1500×300
节点运动速度/m.s <sup>-1</sup>	1~19
传输速率/Mbit.s <sup>-1</sup>	54
节点个数	50
自私节点所占比例/%	{0,25,50,75,100}
随机种子值	{64, 128, 256, 512, 1024}
仿真时间/s	6000
仿真次数	5

### 6.3 仿真结果及分析

#### 1) 网络吞吐量

图 5 显示, HLPR-MG 算法在网络吞吐量上提高了 3.63% 以上。HLPR-MG 算法提高网络吞吐量的主要原因是: ①引入第三方的多方博弈模型提高了网络中消息的转发概率, 有利于消息到达目的节点; ②改进节点相遇后的议价过程, 使节点消息传输时间在整个相遇时间中所占的比重增加, 增加了消息传输数量; ③节点通过“以物易物”机制, 有效解决了节点过度依赖支付引起的购买力不足问题, 使节点拥有更多的交易机会, 从而促进了网络中消息的转发, 提升了网络吞吐量。

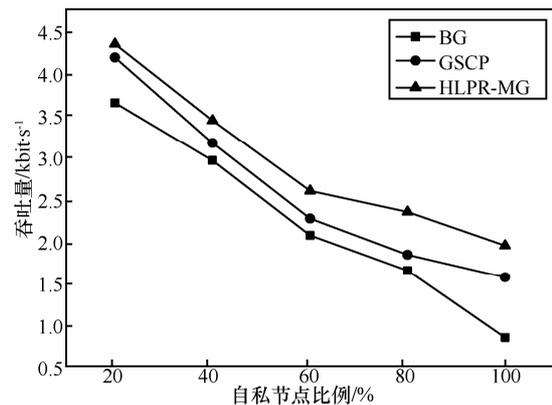


图 5 网络吞吐量比较

#### 2) 归一化控制开销

从图 6 可看出, 与 BG 算法和 GSCP 算法相比, HLPR-MG 算法能够减少归一化控制开销 17.76% 以上, 因而具有更高的效率。开销减少的

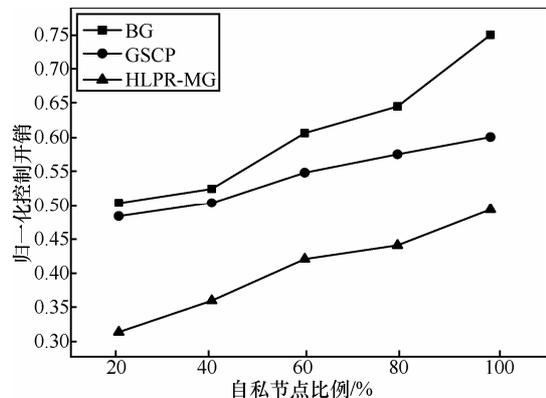


图 6 归一化控制开销比较

原因主要是: ①HLPR-MG 减少了节点相遇后的交互次数, 降低了开销; ②HLPR-MG 算法中节点相遇后, 消息先交换后补差价的交易机制降低了

节点存储支票的开销。

### 3) 消息平均端到端时延

图 7 显示, HLPR-MG 算法消息平均端到端时延至少减少了 4.03%, HLPR-MG 算法能够减少时延的原因主要是: ①引入多方博弈, 使得节点能及时发现在两跳范围内的目的节点并进行传输, 加快节点转发概率的提升; ②优化议价博弈过程, 减少交互, 加快消息的交易, 缩短处理时延; ③有效解决节点购买力不足引起的博弈失败, 降低了网络中节点的转发时延。

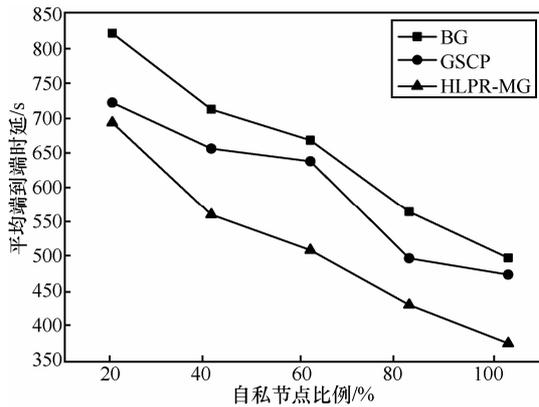


图 7 消息平均端到端时延比较

### 4) 消息传送成功率

从图 8 可看出, 与 GSCP 算法相比, HLPR-MG 算法至少提高了消息传送成功率 3.63%。成功率提高的原因主要是: ①通过引入三方的多方博弈, 增加了可参与博弈场景, 有效改善了节点转发概率提高偏慢的问题; ②通过引入“以物易物”机制解决交易过程中节点购买力不足问题, 促使网络中节点的转发, 提升了消息传送的成功率; ③减少冗余交互可以使节点充分利用相遇时间进行有效数据的交易, 增加传送成功率。

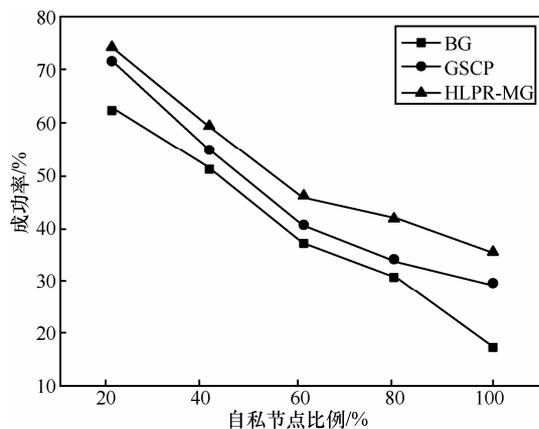


图 8 消息传送成功率比较

## 7 结束语

为解决现有算法 GSCP 在消息传递方向限制、对虚拟货币的依赖和消息交互冗余方面的问题, 本文中提出了一种基于议价博弈的概率路由算法, 通过增强对网络连通性的运用、引入“以物易物”机制并精简消息交互流程, 达到了提高吞吐量和降低控制开销的效果, 从而有助于提高基于议价博弈机制的机会网络路由算法的可用性和用户体验。考虑到人类社会的生物繁衍特点, 在未来研究中, 将以本文算法为基础, 将博弈机制的研究拓展到演化博弈<sup>[15]</sup>领域, 构建更加有效和健壮的路由算法。

### 参考文献:

- [1] 熊永平, 孙利民, 牛建伟等. 机会网络[J]. 软件学报, 2009, 20(1): 124-137.  
XIONG Y P, SUN L M, NIU J W, *et al.* Opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(1):124-137.
- [2] 任智, 黄勇, 陈前斌. 机会网络路由协议[J]. 计算机应用, 2010, 30(3):723-728.  
REN Z, HUANG Y, CHEN Q B. Routing protocols for opportunistic networks[J]. Journal of Computer Applications, 2010,30(3):723-728.
- [3] 叶晖, 陈志刚, 赵明. ON-CRP:机会网络缓存替换策略研究[J]. 通信学报, 2010, 31(5):98-107.  
YE H, CHEN Z G, ZHAO M. ON-CRP: cache replacement policy for opportunistic networks[J]. Journal on Communications, 2010, 31(5): 98-107.
- [4] 刘乔寿, 周建二, 张普宁. 机会网络中基于消息副本数量的自适应缓存管理策略[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2012, 23(4): 394-399.  
LIU Q S, ZHOU J E, ZHANG P N. Adaptive cache management method for opportunistic network based on number of message copies[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2012, 23(4):394-399.
- [5] RESTA G, SANTI G. A framework for routing performance analysis in delay tolerant networks with application to non-cooperative networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 23(1):2-10.
- [6] FRIEDMAN D. On economic applications of evolutionary game theory[J]. Journal of Evolutionary Economics, 1998, 8(1): 15-43.
- [7] 唐作用, 袁艺嘉, 董永强等. 基于信誉值维护的机会网络自私节点检测机制[J]. 通信学报, 2012, (z2):217-221.  
TANG Z Y, YUAN Y J, DONG Y Q, *et al.* Detection of selfish nodes based on credit mechanism in opportunistic networks[J]. Journal on Communications, 2012, (z2):217-221.
- [8] BIGWOOD G, TRISTAN H. IRONMAN: Using social networks to add incentives and reputation to opportunistic networks[A]. 2011 IEEE International Conference on Privacy, Security, Risk, and Trust, and IEEE International Conference on Social Computing, IEEE[C]. 2011. 65-72.
- [9] BIGWOOD G, TRISTAN H. Incentive-aware opportunistic network

- routing [J]. Routing in Opportunistic Networks, 2013, 14(383-401).
- [10] 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.  
WANG Y, LIN C, LI Q L, *et al.* Non-cooperative game based research on routing schemes for wireless networks[J]. Journal of Computers, 2009, 32(1): 54-68.
- [11] BUTTYAN L, DORA L, FELEGYHAZI M, *et al.* Barter trade improves message delivery in opportunistic networks[J]. Ad Hoc Networks, 2010, 8(1): 1-14.
- [12] WU F, CHEN T, ZHONG S, *et al.* A game-theoretic approach to stimulate cooperation for probabilistic routing in opportunistic networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(4), 1573-1583.
- [13] 任智, 黄勇, 曹建玲等. 基于邻居信息交换的机会网络低时延路由算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 94-97.  
REN Z, HUANG Y, CAO J L, *et al.* Low-delay routing algorithm for opportunistic networks by exchanging the neighborhood information[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(2):94-97.
- [14] LINDGREN A, DORIA A, SCHELEN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2003, 7(3): 19-20.
- [15] ZUO F, WEI Z. An evolutionary game-based mechanism for routing p2p network flow among selfish peers[J]. Journal of Networks, 2014, 9(1): 10-17.

## 作者简介:



任智 (1971-), 男, 四川内江人, 博士, 重庆邮电大学教授, 会员, 主要研究方向为宽带无线移动通信网络原理及技术。

索建伟 [通信作者] (1987-), 男, 河南林州人, 重庆邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为含自私节点的机会网络路由算法设计, E-mail: sjw1357@126.com。

刘文朋 (1987-), 男, 山东聊城人, 重庆邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为超高速无线网络通信协议。

雷宏江 (1975-), 男, 陕西合阳人, 重庆邮电大学通信与信息工程学院副教授, 主要研究方向为机会网路路由协议。

陈前斌 (1967-), 男, 博士, 重庆邮电大学教授/博导, 重庆邮电大学通信与信息工程学院院长, 移动通信技术重庆市重点实验室主任, 主要研究方向为无线通信与网络。