

3-25-2020

Performance Balanced Opportunistic Routing and Simulation Analysis Based on Cooperative Game

Huahong Ma

School of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

Honghai Wu

School of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

Guoqiang Zheng

School of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

Baofeng Ji

School of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Performance Balanced Opportunistic Routing and Simulation Analysis Based on Cooperative Game

Abstract

Abstract: Opportunistic transmission mode of “store-carry-forward” is usually used to make routing in mobile opportunistic network. Currently, there have been many researches in this area. However, the existing opportunistic routing mechanisms pay much attention to the single index of delivery success ratio, but neglect the constraints on other performance indicators, which may lead to the extreme imbalance of network performance. Aiming at this issue, the diffusion of data packets between multiple nodes are modeled as a cooperative game with the goal of maximal performance balancing, and an opportunistic routing protocol based on the cooperative game for performance balancing is proposed. Simulation results based on the real-life mobility traces and the synthetic traces show the scheme can greatly improve the performance balancing index while ensuring certain delivery success ratio.

Keywords

mobile opportunistic network, opportunistic routing, performance balancing, multi-player cooperative game

Recommended Citation

Ma Huahong, Wu Honghai, Zheng Guoqiang, Ji Baofeng. Performance Balanced Opportunistic Routing and Simulation Analysis Based on Cooperative Game[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(3): 404-413.

基于合作博弈的性能均衡机会路由及仿真分析

马华红, 吴红海, 郑国强, 冀保峰

(河南科技大学信息工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 移动机会网络的路由常采用“存储-携带-转发”的机会传输模式。尽管已有很多这方面的研究, 但现有机会路由算法太过关注投递成功率等单一指标, 而忽略对其他性能指标的约束, 从而导致网络性能的极度失衡。为此, 多节点间的数据包扩散过程被建模为一个合作博弈问题, 以性能均衡度的最大化为博弈目标, 提出基于合作博弈的性能均衡机会路由协议。基于真实数据集和合成数据集的仿真结果表明该协议能够在保证数据传输质量同时提高网络的性能均衡水平。

关键词: 移动机会网络; 机会路由; 性能均衡; 多人合作博弈

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 03-0404-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0149

Performance Balanced Opportunistic Routing and Simulation Analysis Based on Cooperative Game

Ma Huahong, Wu Honghai, Zheng Guoqiang, Ji Baofeng

(School of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

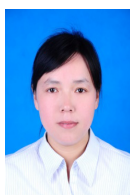
Abstract: Opportunistic transmission mode of “store-carry-forward” is usually used to make routing in mobile opportunistic network. Currently, there have been many researches in this area. However, the existing opportunistic routing mechanisms pay much attention to the single index of delivery success ratio, but neglect the constraints on other performance indicators, which may lead to the extreme imbalance of network performance. Aiming at this issue, the diffusion of data packets between multiple nodes are modeled as a cooperative game with the goal of maximal performance balancing, and an opportunistic routing protocol based on the cooperative game for performance balancing is proposed. Simulation results based on the real-life mobility traces and the synthetic traces show the scheme can greatly improve the performance balancing index while ensuring certain delivery success ratio.

Keywords: mobile opportunistic network; opportunistic routing; performance balancing; multi-player cooperative game

引言

移动机会网络是一种源目的节点对间不存在端到端的路径, 借助于节点间的机会接触来进行数

据传输的网络^[1-2]。由于弱连接、自组织的网络形态突破了传统网络数据传输对全连通性要求的局限性, 因而更适合于自组网的实际需求, 在智慧城市、内容分发和地震救灾现场等方面有着广阔的应用前景, 极大地改善了人们的生产和生活方式, 近年来也受到学术界的密切关注。然而, 由于节点的频繁移动导致拓扑的快速变化和网络的间断连接, 节点之间很难建立一条端到端的路径^[3-4], 因此,



收稿日期: 2018-03-19 修回日期: 2018-07-02;
基金项目: 国家自然科学基金(61772175);
作者简介: 马华红(1979-), 女, 河南浙川, 博士
生, 讲师, 研究方向为群智感知网络路由; 吴红海
(1979-), 男, 河南邓州, 博士, 副教授, 研究方向
为移动机会网络; 郑国强(1965-), 男, 河南洛阳,
博士, 教授, 研究方向为无线传感器网络等。

<http://www.china-simulation.com>

移动机会网络通常采用“存储-携带-转发”的机会传输模式,数据的转发和投递借助于节点间有意识或无意识的接触来进行,每个移动节点必须独立做出自己的路由决策。

目前,机会路由相关的研究已有很多^[5-6],但现有协议的设计目标大多是高的投递成功率,追求感知数据的完整度。由于对单一性能指标如投递率等的过度追求而忽略了对其他性能度量如时延、传输开销等的约束,从而导致投递性能表现为较高的投递成功率伴随着较大的投递代价和较长的投递时延,也即投递性能的极度不均衡。而在很多应用场景中如周期性的标量数据收集和视频流数据投递中,由于可以采用其它措施对丢失数据进行恢复,因此对数据完整性的要求并不是非常严苛,但是对时效性的要求则相对较高。因此上述路由算法显然不太适合这类应用场景,而能够实现性能均衡的路由协议则更具有实际应用价值。但是,到目前为止,协议的性能均衡问题还没有引起足够的关注。

本文针对上述投递性能不均衡问题,对网络中节点的移动规律进行分析,并将任意两节点的相遇模型化为一个泊松过程;进而据此预测数据包在任意节点对之间限定时间内的投递成功概率和投递时延;考虑多节点相遇情况,将数据包扩散过程模型化为多人合作博弈问题,并以性能均衡度的最大化为博弈目标,提出了基于合作博弈的性能均衡机会路由协议。所提协议能够依据纳什均衡理论完成对数据包在相遇节点间的优化配置,在保证投递质量的同时最大化网络的性能均衡度。

1 相关工作

为了提高网络投递成功率,机会网络常采用多备份的方式进行数据投递,其典型协议是 Epidemic,采用洪泛机制在网络中快速扩散消息副本。在设备资源无限时,其会获得最高的成功投递率,最小的投递时延。而实际中, Epidemic 产生的冗余副本会消耗大量的设备资源,从而降低网络性能。为了在

保证投递成功率的同时降低投递代价,通常会精心设计节点的效用函数,效用值更高的节点才会被做为中继节点。SimBet^[7]协议基于节点的相似性和中心性设计效用函数,并以此为度量进行中继节点的选择来追求高的投递成功率和少的副本数。之后的一系列协议,或根据节点间的物理接触,或依据从物理接触情况中提取出的节点社会信息,或根据节点的上下文信息进行路由,由于具有更多信息的支撑,路由协议的性能都有一定的提升^[8]。

对单一性能指标的过度追求导致现有的路由协议在投递性能上极度不均衡。但目前为止有关性能均衡的文献并不多。文献[9]提出了基于效用的多副本机会转发协议 MOUF,通过平衡延迟和转发成本来提高整体效用。文献[10]在保证能源效率的情况下考虑吞吐量和时延的均衡问题,提出先出和先入两种控制机制。文献[11]则提出一种基于社区的自适应喷射算法 CAS,其能够在社区路由的基础上根据数据包的剩余生存时间重新分配数据包备份数,实现投递率和投递代价之间的均衡。

前述这些文献尽管考虑了一些指标之间的均衡,但是其目标仍是追求更高的投递率,并没有真正从性能目标上对投递成功率、投递时延、网络代价等指标进行整体约束,从而导致投递性能的均衡度并没有明显提升;此外,上述路由算法在大多仅考虑两节点间的数据传输而忽略了在城市环境中更为普遍的多节点相遇的场景,从而导致数据包扩散的效率较低。而多节点间的合作则为数据传输提供了更多的优化空间。

2 相关背景知识

2.1 合作博弈

合作博弈指多个参与者为共同目的而一起行动。在该过程中,每个参与者自私而又理性,既相互博弈同时也保持协作,从而在争取自身收益最大化的基础上追求集体效用的最大化^[12]。合作博弈的结果是博弈各方要达到集体效用的最大化,也

即：没有一个参与者可以独自行动而增加增益，即为了自身利益的最大化，没有任何单独的一方愿意改变其策略。此时可以认为博弈达到了一个均衡状态^[13-14]。

理论 1 纳什均衡：在博弈 $G=\{S,F\}$ 中， $S=\{S_1,S_2,\dots,S_n\}$ 来表示多人合作博弈中所有参与者的联合策略集且 $F=\{F_1,F_2,\dots,F_n\}$ 是效用的集合。如果存在一个策略集合 $\{s_1^*,s_2^*,\dots,s_n^*\}$ 使得任一参与者 i 的策略 s_i^* 都是对其他参与者策略的最佳对策，则称 $S^*=\{s_1^*,s_2^*,\dots,s_n^*\}$ 为 G 的一个纳什均衡。

纳什均衡满足 4 个要素：不可变性、对称性、独立性和帕累托最优性^[13-14]，用公式(1)来表示：

$$S^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*) \leftarrow \arg \max_{(F_1, F_2, \dots, F_n) \in F} \prod_{i \in N} (F_i - F_i^0) \quad (1)$$

式中： S^* 是达到均衡时各参与者采取的策略，即最优解，也称为纳什均衡解； F_i 是参与者 i 在纳什均衡解中的增益； F_i^0 是空间 F 的初始点，定义为没有合作时参与者 i 的增益； $\prod(F_i - F_i^0)$ 称为多人合作博弈的纳什积； N 是参与者集合，用 $N=\{1,2,\dots,n\}$ 来表示。

2.2 几何理论的近似博弈

对多人博弈，确定混合策略集中的帕累托最优均衡等于求解一个高阶多元多项式方程组。近似解法通常是最好的计算均衡解集的方法^[15]。从几何角度回答帕累托最优均衡解中的基本问题，获得关于每个参与者以及其他参与者的策略选项和收益的信息，对于求解帕累托最优均衡点是至关重要的。

假设当前参与者集合为 $N=\{1,2,\dots,n\}$ ，所有策略集合为 $M=\{1,2,\dots,m\}$ ，某一策略 k 相对于参与者 i 的效用函数为 $u_{i,k}$ 。则，几何方法求解的步骤如下：

(1) 计算标准化几何距离；

$$d_{i,k} = \frac{1}{u_{i,k}} / \sum_{l=1}^N \frac{1}{u_{l,k}}, k \in M, i \in N \quad (2)$$

(2) 所有策略按距离进行优先排序；

$$DS_i = \{x : d_{i,x} < d_{i,y}, \forall (x,y) \in M, x \neq y\}, i \in N \quad (3)$$

(3) 计算策略的距离-效用积；

$$\phi_{i,k} = d_{i,k} \times u_{i,k} = 1 / (\sum_{l=1}^N \frac{1}{u_{l,k}}) \quad (4)$$

(4) 对距离-效用积重新排序得 Φ_i ，顺序与 DS_i 中策略序号相对应。

$$\Phi_i = \{\phi_{i,k} | x : DS_{i,x}, x \in M\} \quad (5)$$

(5) 计算平衡轴枢点

$$PP_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^m \phi_{i,k}, i \in N, k \in M \quad (6)$$

(6) 帕累托最优解

$$\sigma_i = \{DS_{i,k} | x : \sum_{\lambda=1}^h \phi_{i,\lambda} \leq PP_i, \forall x \in M\} \quad (7)$$

参与者 i 的最优策略集是对 Φ_i 按序累加直至等于轴枢点时参与累加的前 h 个策略组成的集合。

2.3 网络和节点模型

通常将移动机会网络表示为一个对称加权网络图 $G(V,E)$ 。 V 是网络中所有移动节点的集合， $V=\{V_1,V_2,\dots,V_N\}, (N \geq 1)$ 。 E 是网络中所有边的集合， $E=\{e_{11},e_{12},\dots,e_{ij},\dots\}, (i \neq j, 1 \leq i, j \leq N)$ ， e_{ij} 是节点 V_i 和 V_j 之间边的权重。当两节点相互进入对方的通信范围时，两节点可以交换各自缓存中的数据包。

受文献[16]的启示，假设两节点 V_i 的相遇次数服从参数为 λ_{ij} 的泊松分布，其中， λ_{ij} 为二者之间的接触频率。

2.4 相关假设

一个移动用户用它所携带的智能设备来进行存储和转发数据的缓存空间是有限的。为简化该问题，假设所有移动节点有相同的初始缓存空间，所有产生数据包的大小相同，并采用数据包个数来衡量节点缓存大小情况。当节点的缓存区满时，依据相应的缓存区管理策略进行数据包的丢弃。所有产生的数据包具有相同的寿命(Time-To-Live, TTL)，数据包从产生时刻开始，寿命在逐渐减少，当剩余 TTL 减至 0 时，数据包到期被丢弃。

3 协议的实现过程

所提协议的设计目标是：(1) 尽可能均衡的性能目标；(2) 保证一定的投递成功率。均衡的性

能目标指的是: 算法能获得较高的投递成功率和较小的投递时延, 且保持尽可能小的投递代价。

为获得这个目标, 将数据包扩散过程模型化为多人合作博弈问题, 利用博弈的纳什均衡解指导数据包的扩散。

纳什均衡的前提是博弈中所有参与者的合作, 以达到博弈的合作解。也就是说, 必须考虑网络中所有节点的效用来获得纳什均衡解。然而, 移动机会网络的拓扑结构是不断变化的, 节点只能获得网络的局部信息, 而不能获得全局信息。这就要求我们将博弈的范围限制在网络的一个个子集中。因此, 引入博弈簇的概念。

3.1 簇内的局部博弈

定义 1 博弈簇: 设一节点 V_j 的通信范围内所有节点的集合是 $S(j)$, 则以节点 V_j 为中心的博弈簇可以定义为: $GC_j = \{V_j\} \cup S(j)$ 。即: GC_j 是在某一特定时刻节点 V_j 和它的所有一跳邻居节点的集合。

某时刻, 当某节点的通信范围内同时出现多个节点时, 它们会被归为一个博弈簇, 该节点即为簇中心节点。移动机会网络属于动态网络, 通过对网络某一瞬时拓扑图分割可将网络分割成多个不连通的子图即博弈簇, 每个簇内的局部博弈求解是相互独立的。由公式(1)可知, 当某博弈簇内所有节点纳什积达到最大值时, 博弈达到均衡, 此时的策略集即为该博弈簇的纳什均衡解。在同一时刻, 所有博弈簇同时进行纳什均衡求解, 获得各个簇内节点群的最大纳什积, 即: 纳什均衡解。将此瞬时所有博弈簇的节点群的最大纳什积相乘, 即获得整个网络全部节点群的纳什积的最大值, 也为整个网络的瞬时最优解。因此, 某一时刻对整个移动机会网络的纳什均衡求解等价于分别求解该时刻所有博弈簇内的纳什均衡解。

在任一博弈簇 GC_j 内, 节点间的数据包扩散过程被模型化为多人合作博弈问题。将簇内所有节点定义为博弈参与者, 簇内所有节点携带的数据包为博弈对象。簇的中心节点 V_j 负责进行局部博弈求

解, 并依据该最优解对该簇内的所有数据包进行重新指派。

3.2 性能目标的度量

根据前面的假设, 两节点 V_i 和 V_j 的相遇事件近似服从参数为 λ_{ij} 的泊松分布, 则二者的相遇时间间隔则服从参数为 $1/\lambda_{ij}$ 的指数分布。假设数据包 k 由节点 V_i 携带, 它的目的节点是 V_j , 用 $D_{i,k}$ 表示估计的数据包 k 的总的投递时延, $T_{l,k}$ 表示它已在网络存活的时间, $T_{i,k}$ 表示节点 V_i 将数据包 k 投递给 V_j 所需的剩余时间。数据包 k 在 TTL 时间内通过节点 V_i 成功投递至目的节点的概率可以用 $P_{i,k}$ ($T_{i,k} < \text{TTL} - T_{l,k}$) 来表示。则, 通过节点 V_i 投递数据包 k 的成功概率和投递时延分别用公式(8)~(9)表示。

$$P_{i,k}(T_{i,k} < \text{TTL} - T_{l,k}) = 1 - e^{-\lambda_{ij}(\text{TTL} - T_{l,k})} \quad (8)$$

$$D_{i,k} = T_{l,k} + 1/\lambda_{ij} \quad (9)$$

3.3 效用函数设计

在博弈簇内的数据包的扩散过程被模型化为一个多人合作博弈。令: $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 是 V_j 的博弈簇 GC_j 内所有节点的集合, $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 是该簇内所有节点携带的数据包的集合。假设数据包 k 当前的备份数是 C_k , 则该数据包经由节点 V_i 成功投递到它的目的节点对系统整体成功投递率的增益可近似用公式(10)表示, 并且它对系统整体投递时延带来的影响近似用公式(11)表示。因此, 数据包 k 对节点 V_i 的效用可用公式(12)表示。

$$P_{a,i,k} = \frac{P_{i,k}(T_{i,k} < \text{TTL} - T_{l,k})^{C_k}}{N}, i \leq n, k \leq m \quad (10)$$

$$D_{a,i,k} = D_{i,k} / N \quad (11)$$

$$u_{i,k} = \frac{P_{a,i,k}}{D_{a,i,k}} = \frac{P_{i,k}(T_{i,k} < \text{TTL} - T_{l,k})^{C_k}}{D_{a,i,k}} \quad (12)$$

节点 V_i 在 GC_j 内的效用值用公式(13)表示。

$$U_i = \sum_{k=1}^m (P_{a,i,k} / D_{a,i,k} \cdot a_{i,k}) \quad (13)$$

$$a_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{数据包}k\text{在节点}V_i; \\ -1 & \text{数据包}k\text{从节点}V_i\text{转发到其他节点去;} \\ 0 & \text{其它;} \end{cases} \quad (14)$$

由公式(13)~(14)可知,节点的效用等于所有数据包相对于该节点效用的加权累积和。当数据包新进入或仍然在该节点中,权重为 1,当从该节点离开,则权重为-1。否则,权重为 0。

因此,增益函数可以定义为: $G_i=U_i-U_i^0$, U_i^0 是没有合作时节点的效用增益。求解纳什均衡就是寻找一个策略 $S^*=\{s_1^*,s_2^*,\dots,s_n^*\}$,使得获得最大的纳什积,用公式(15)表示。即:

$$S^* \leftarrow \arg \max \prod_{i \in GC_j} (U_i - U_i^0) = \arg \max \prod_{i \in GC_j} \left(\sum_{k=1}^m \left(\frac{P_{a,k,i}}{D_{a,k,i}} a_{k,i} \right) - U_i^0 \right) \quad (15)$$

3.4 协议的实现

当节点 V_j 发现多个节点同时进入它的通信范围时,博弈簇 GC_j 形成。簇内每个节点向 V_j 报告自己缓存中的数据包个数和序号,节点 V_j 负责执行局部博弈算法,并在博弈结束时,依据博弈最优解对簇内所有数据包进行重新分配。该协议伪代码如下:

输入: 博弈簇 GC_1 , $V=\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, $M=\{1, 2, \dots, m\}$;

输出: 簇内每一节点 V_i 的最优解集 σ_i ;
 for $k=1; k \leq m; k++$ do
 计算数据包 k 相对于任一节点 V_i 的效用 $u_{i,k}$;
 end
 for $k=1; k \leq m; k++$ do
 计算数据包 k 相对于任一节点 V_i 的标准化距离 $d_{i,k}$; 计算数据包 k 相对于任一节点 V_i 的距离-效用积 $\phi_{i,k}$;
 end
 for $i=1; i \leq n; i++$ do
 对节点 V_i , 按 d 升序排序, 得 DS_i ; 对节点 V_i , 按 DS_i 顺序更新距离-效用积序列 Φ_i ;
 end
 for $i=1; i \leq n; i++$ do
 计算节点 V_i 的中枢值 PP_i ; 计算节点 V_i 的最佳策略集 σ_i ; 依据 σ_i 对节点 V_i 进行数据包分配(通过 V_1 实现);
 end
 一个该协议实现的实例如图 1 所示, 相应的流程图如图 2 所示。

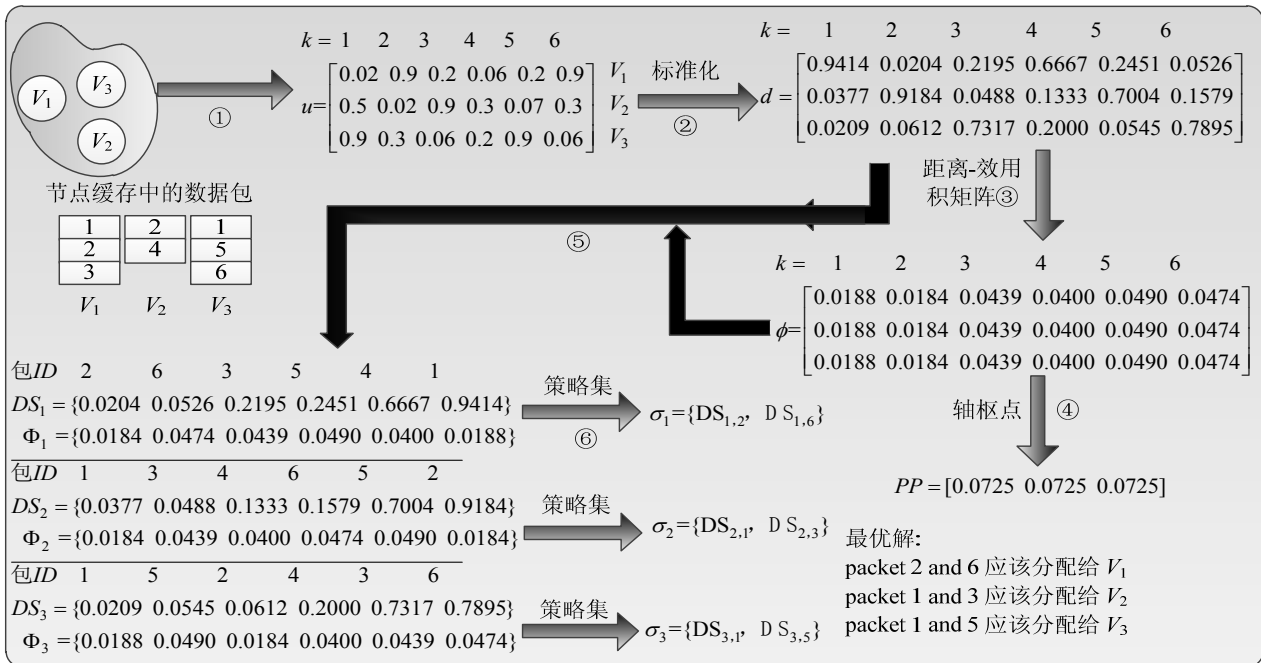


图 1 该协议的一个实例
Fig. 1 Example of our protocol

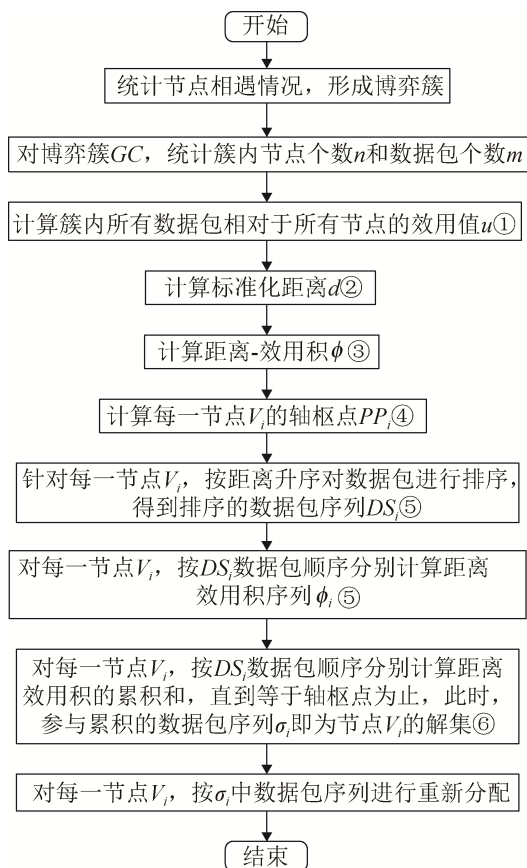


图 2 该协议流程图

Fig. 2 Flowchart of our protocol

在图 1 中, 3 个节点构成一个博弈簇。为进行多人博弈, 需要先统计所有数据包个数和相应的序号, 并计算每个数据包分别相对于每个节点的效用值(图 1 中①)。然后顺序执行②~⑤, 最后按照⑥求博弈的最优策略集, 并依据结果对簇内所有数据包进行重新指派。步骤分别对应图 2 流程图中的①到⑥。从图 1 可知, 博弈结束, 数据包 1 同时被指派给节点 V_2 和 V_3 , 即: 此次博弈使得数据包 1 多产生 1 个副本。数据包 1,3,5,6 分别有一个副本。数据包 4 由于在这 3 个节点上的效用都很小导致距离排序在最后而被丢弃。

从图 2 也可以看出, 一旦博弈簇形成, 簇中心节点 V_1 即可自动启动一个多人合作博弈的执行过程, 直至得到最优策略集, 并按该解集进行数据包的重新分配。本文所提的协议能够避免数据包的盲目复制, 减少网络中数据包的副本数, 同时保证预期的投递性能指标。

3.5 协议的复杂度

本节对该协议的耗时和算法复杂度作简要分析。假设博弈簇 GC_j 内有 N 个节点, M 个数据包。则: 完成一次局部近似博弈需要一系列线性运算和一次升序排序, 排序运算次数与 M 有关, 复杂度为 $O(M \log_2 M)$, 线性运算的复杂度为 $O(MN)$ 。根据对数据集的统计, 博弈簇的平均节点个数 N 大约为 $2 \sim 3^{[8]}$, 因此, 总的近似博弈的复杂度为 $O(M \log_2 M)$ 。本文仿真时, 设置节点缓存中数据包个数最大为 100, 则 M 最大值大约为 200~300。对目前的移动设备来说, 其运算量可以忽略不计。

4 仿真与性能评价

为评价所提协议的性能, 在 Cambridge 和 Infocom05 真实数据集^[17]和基于 TVCM 的合成数据集^[18]上对本协议和 Epidemic, SimBet^[7]及 CAS^[11]进行了对比。

4.1 仿真环境设置

本文在 Visual Studio2010 开发环境下用 C++ 语言开发了一个移动机会网络的网络框架进行仿真及性能评价。在该框架中, 仿真器可以逐行地读取移动轨迹, 并自动识别博弈簇的存在。在仿真过程中, 仿真器每读取一条轨迹记录产生一个数据包, 总产生数据包个数为 1 000, 包的源节点和目的节点是从移动轨迹节点中随机选择的两个不同节点, 产生时间是该行移动轨迹产生的真实时间。当所有的数据包的剩余 TTL 减到零时, 仿真结束。先进先出(FIFO)策略用来进行缓冲区管理。

4.2 性能度量

(1) 投递成功率

该指标用仿真结束时成功投递数据包与所有产生数据包个数的比率来表示, 指标越大, 性能越优。

(2) 投递代价

该指标表示仿真时每个数据包的平均副本数, 副本数越多, 网络的投递代价越大。该指标越小越好。

(3) 平均投递时延

该指标表示成功投递数据包所需要的平均时间，投递时延越小越好。

(4) 整体性能指标^[19]

这个性能度量用来评价一个特定协议的整体性能均衡度，用公式(16)表示。

$$\text{Overall_Perform index} = R_{\text{rate}} \times (1 / (A_{\text{delay}} \times D_{\text{cost}})) \quad (16)$$

式中： R_{rate} 、 A_{delay} 和 D_{cost} 分别表示某协议所获得的投递成功率、投递时延和投递代价。该指标越高，协议的性能均衡度越高。

4.3 性能比较与讨论

图 3 显示了 4 种协议在 Cambridge 数据集上的仿真结果。投递成功率、投递代价和投递时延分别如图 3(a)~(c)所示，图 3(d)显示了整体性能指标。图中横坐标中 m 代表分钟。

由此可知：

- (1) 所有协议的投递成功率和投递时延随着 TTL 的增加而单调递增。
- (2) Epidemic 有最高的投递代价和最小的投递时延。与其他协议相比，我们的协议获得了相对较

高的投递成功率，较小的投递代价和投递时延。

(3) 最后一点也是最重要的一点是与其他协议相比，我们的协议获得了最高的性能均衡指标。

第 1 点原因在于，越大的 TTL 意味着越长的数据包生存时间，由于数据包寿命到期而被丢弃的数据包个数就会随着 TTL 的增加而减少，使得数据包有更多的机会被成功投递，导致成功投递率的增加和投递时延的增加。第 2 点原因在于，Epidemic 协议的盲目副本复制可能会导致较小的数据投递时延但同时带来较大的投递代价。SimBet 协议选择有较高中心度和相似度的节点做中继，结果可能会有较高的投递成功率，但是随之而来的是不确定的投递代价和投递时延。CAS 协议按照数据包的剩余 TTL 来对数据包允许备份数进行分配，主要目的是尽可能的平衡投递时延和投递代价。它很容易获得较小的投递代价，但是投递性能却是不确定的。而我们的协议设计时，多人合作博弈被引入来设计路由，并以性能的最大均衡化为博弈目标。参与博弈的所有节点的效用增益积达到最大值时博弈达到均衡，意味着最大的整体性能。这就不难解释第 3 个现象：为什么我们的协议获得了最高的性能均衡指标。

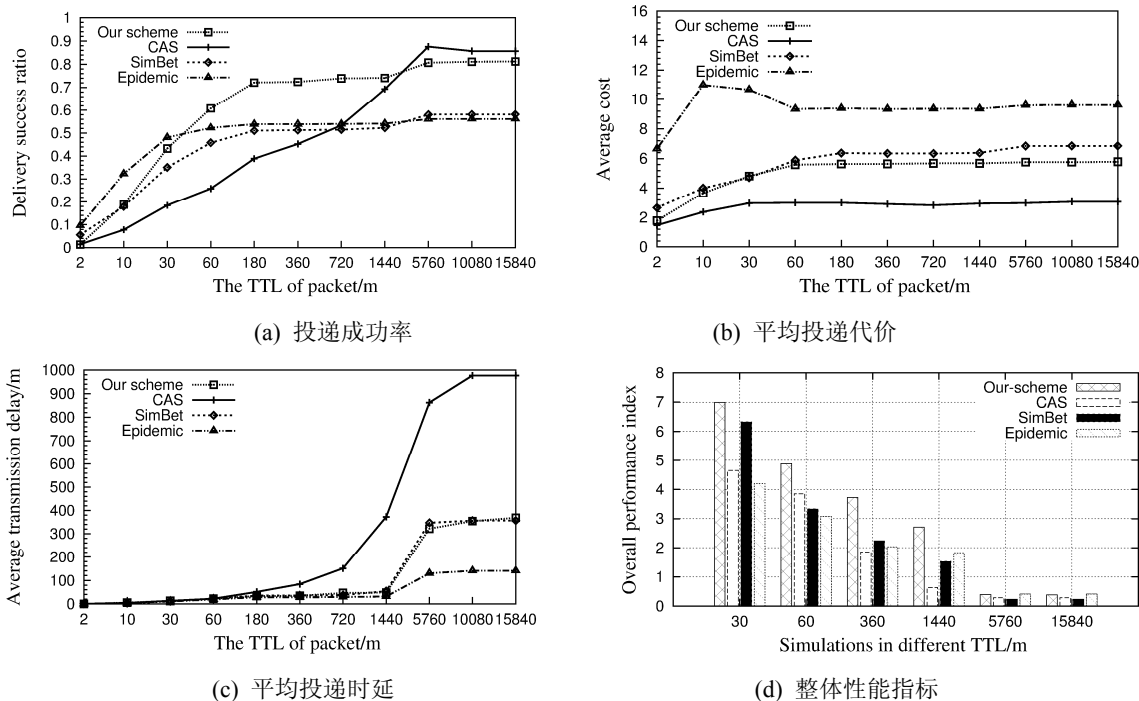


图 3 基于 Cambridge 的仿真结果
Fig. 3 Simulation results based on Cambridge

图 4~5 分别显示了 4 种协议在 Infocom05 和 TVCM 轨迹上仿真的结果对比。从这 2 个图也能得到与图 2 类似的结论。与其他 3 个协议相比, 我们的协议的性能如投递时延、投递代价可能并不是

最好的。但是, 它获得了最高的性能均衡度。也就是说, 它获得了相对较高的投递成功率、相对较小的投递时延和较轻的投递代价。这些不难从我们协议的设计原理看出来。

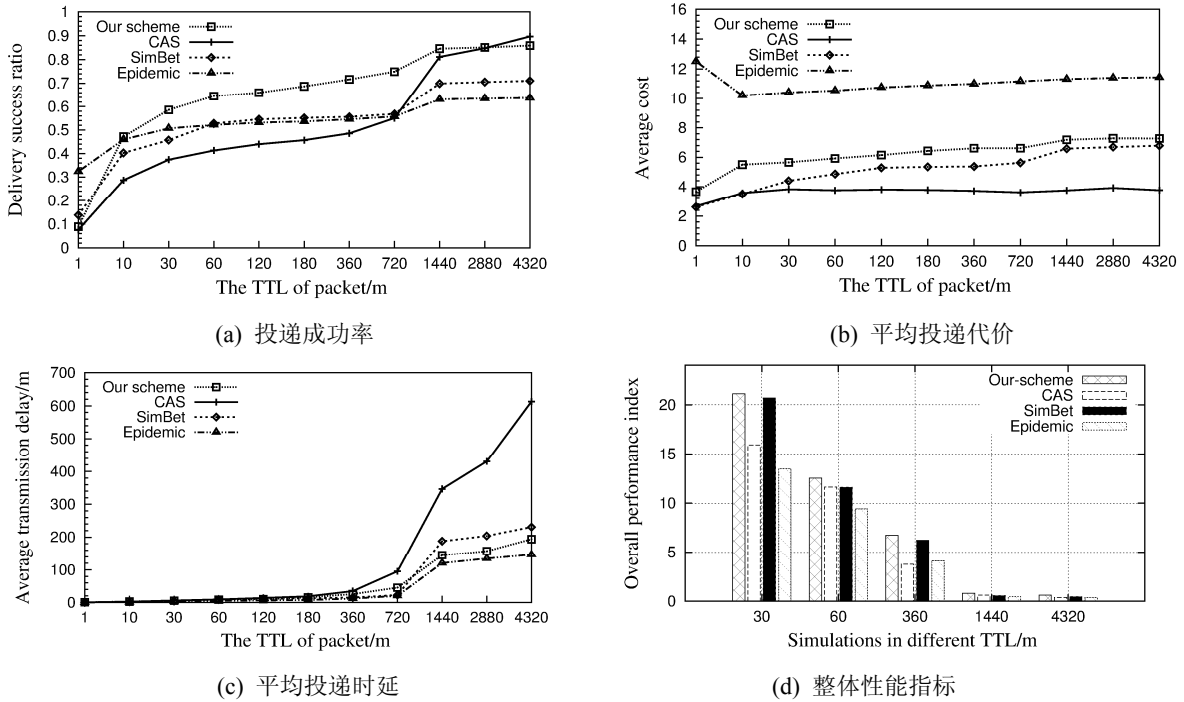


图 4 基于 Infocom05 的仿真结果
Fig. 4 Simulation results based on Infocom05

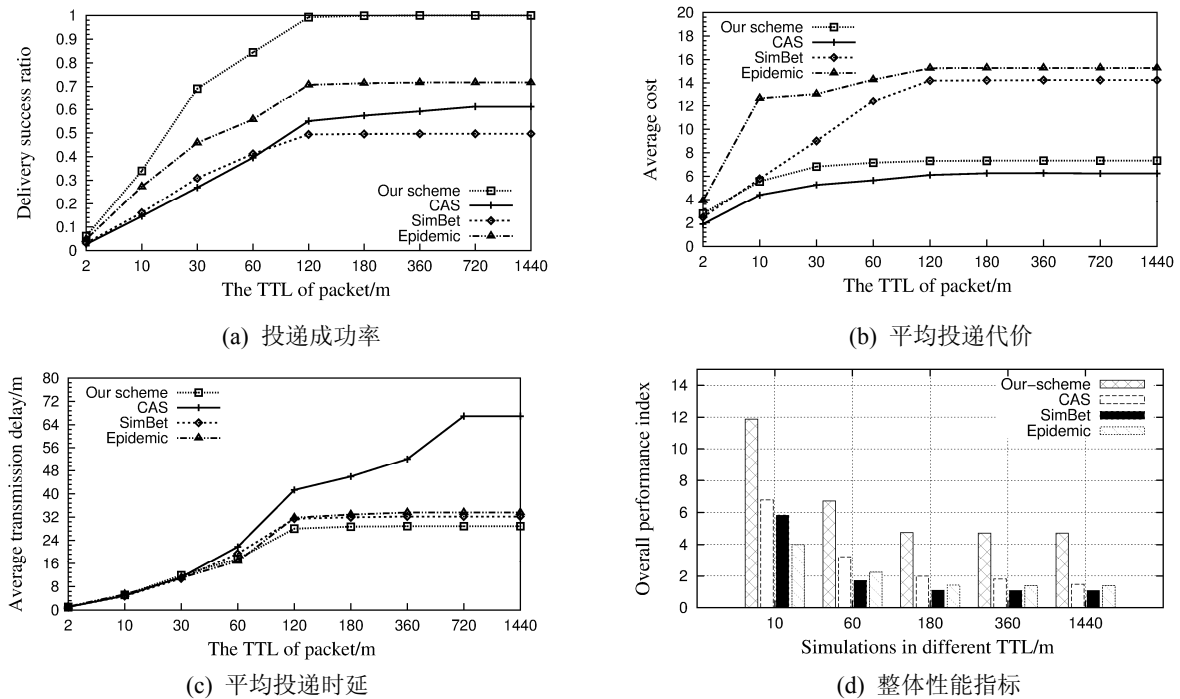


图 5 基于 TVCM 的仿真结果
Fig. 5 Simulation results based on TVCM

5 结论

本文将数据包在多节点间的扩散过程模型化为多人合作博弈问题,以最大的性能均衡作为博弈目标,提出了基于合作博弈的性能均衡机会路由协议,并基于真实数据集和合成数据集对本文所提协议和其他 3 个协议做了仿真和性能评估。仿真结果表明,无论在真实数据集还是合成数据集上,本文所提协议与其他 3 个协议相比,在保证一定投递成功率的同时,都获得了最高的性能均衡度。该算法主要解决对数据完整性要求不高而对整体的性能均衡性要求较高的场景下的数据路由问题。但是,在移动机会网络中,某些节点是专门作为数据收集器来进行数据收集、预处理并上传服务器的功能,本文并没考虑这种情况。在下一步工作中,我们应该考虑到节点可能会遇到数据收集器的这种情况下的路由,并进一步降低算法的复杂度。

参考文献:

- [1] Yuan P, Fan L, Liu P, et al. Recent progress in routing protocols of mobile opportunistic networks: a clear taxonomy, analysis and evaluation[J]. *Journal of Network and Computer Applications (S1084-8045)*, 2016, 62: 163-170.
- [2] 马华东, 袁培燕, 赵东. 移动机会网络路由问题研究进展[J]. *软件学报*, 2015, 26(3): 600-616.
Ma Huadong, Yuan Peiyan, Zhao Dong. Research progress on routing problem in mobile opportunistic networks[J]. *Journal of Software*, 2015, 26(3): 600-616.
- [3] 任智, 索建伟, 陈红, 等. 基于相遇节点跨层感知的机会网络高效低时延路由算法[J]. *通信学报*, 2013, 34(10): 1-8.
Ren Zhi, Suo Jianwei, Chen Hong, et al. Efficient low-delay routing algorithm for opportunistic networks based on cross-layer sensing of encountered nodes[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(10): 1-8.
- [4] Batabyal S, Bhaumik P. Mobility models, traces and impact of mobility on opportunistic routing algorithms: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials (S1553-877X)*, 2015, 17(3): 1679-1707.
- [5] 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 Yongping, Sun Limin, Niu Jianwei, et al. Opportunistic Networks[J]. *Journal of Software*, 2009, 20(1): 124-137.
- [6] 李懿雯, 白光伟, 沈航, 等. 无线网络视频感知机会网络编码协议及其仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(2): 345-352.
Li Yiwen, Bai Guangwei, Shen Hang, et al. Simulation study of video-aware opportunistic network coding protocol over wireless networks[J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(2): 345-352.
- [7] Daly E M, Haahr M. Social network analysis for information flow in disconnected delay-tolerant MANETs[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing (S1536-1233)*, 2009, 8(5): 606-621.
- [8] Ma H H, Zheng G Q, Wu H H, et al. A multi attribute decision routing for load-balancing in crowd sensing network[J]. *Wireless Networks (S1022-0038)*, 2017, 2017(10): 1-16.
- [9] Liu C, Pan Y, Zhang J, et al. A Utility-based Multi-copy Forwarding Algorithm in Delay Tolerant Networks[C]// 12th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking, SECON 2015. USA: IEEE, 2014: 301-309.
- [10] Li Y, Sheng M, Wang C X, et al. Throughput-delay tradeoff in interference-free wireless networks with guaranteed energy efficiency[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications (S1536-1276)*, 2015, 14(3): 1608-1621.
- [11] Miao J, Hasan O, Mokhtar S B, et al. A delay and cost balancing protocol for message routing in mobile delay tolerant networks[J]. *Ad Hoc Networks (S1570-8705)*, 2015(25): 430-443.
- [12] 马忠贵. 博弈论及其在无线通信网络中的应用[M]. 1 版. 北京: 国防工业出版社, 2015: 152-176.
Ma Zhonggui. *Game Theory and Its Application on Wireless Communication Networks*[M]. 1st edition. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2015: 152-176.
- [13] Nash J. Two-person cooperative games[J]. *Econometrica (S0012-9682)*, 1953, 21(1): 128-140.
- [14] Wu H, Liu L, Zhang X, et al. Quality of video oriented pricing incentive for mobile video offloading[C]// 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, IEEE INFOCOM 2016. USA: IEEE, 2016: 1-9.
- [15] Li L, Qin Y, Zhong X. A novel routing scheme for resource-constraint opportunistic networks: A cooperative multiplayer bargaining game approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*

- (S0018-9545), 2016, 65(8): 6547-6561.
- [16] Chen K, Shen H, Yan L. Multicent: A multifunctional incentive scheme adaptive to diverse performance objectives for DTN routing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (S1045-9219), 2015, 26(6): 1643-1653.
- [17] Pirozmand P, Wu G, Li X. Centrality Prediction in Mobile Social Networks[J]. International Journal of Engineering Research and Applications(S2248-9622), 2015, 5(5): 15-22.
- [18] Spyropoulos T, Sermpezis P. Soft cache hits and the impact of alternative content recommendations on mobile edge caching[C]// Proceedings of the eleventh ACM workshop on challenged networks. USA: ACM, 2016: 51-66.
- [19] Nelson S C, Bakht M, Kravets R. Encounter-based routing in DTNs[C]// 28th Conference on Computer Communications, IEEE INFOCOM 2009. USA: IEEE, 2009: 846-854.