

一种面向移动机会网络的能效性路由算法

袁培燕 张 豪

(河南师范大学计算机与信息工程学院 河南 新乡 453007)

摘 要 在数据传输时,间歇性连接的移动机会网络一般不存在从源到目的地的完整路径。为了加快数据在网络中的传输速度,大量的多副本路由协议相继被提出,但是这些路由协议很少考虑能量问题。由于机会网络中移动设备能量受限,过多的消耗能量必将导致设备停止工作。基于上述情况,提出了一种移动机会网络节点不相交的路由方案,尽可能延长节点的存活时长。此外,利用二维连续时间马尔可夫链(CTMC)模型,分析了节点状态之间的变换,最后进行性能仿真与评价。实验结果表明,提出的方案相比于经典的工作,在投递率、平均传输延时、平均网络开销、能量以及平均跳数等方面有较大的改善。

关键词 间歇性,多副本,能量,不相交,马尔可夫链

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Energy Efficient Routing Algorithm in Mobile Opportunistic Networks

YUAN Pei-yan ZHANG Hao

(School of Computer and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China)

Abstract Intermittently connected mobile networks generally do not have a complete path from the source to the destination during data transmission. In order to quicken data transmission, a large number of multi-copy routing protocols proposed, but most of them do not consider the energy issue. Considering the fact that mobile devices are driven by batteries and have limited energy and they will stop work if excessive energy is consumed, an energy efficient routing scheme was proposed, which uses the disjoint path to spray copies to prolong the lifetime of nodes. In addition, a two-dimensional continuous-time Markov chain (CTMC) was used to model the dissemination process of packets. Finally, the performance simulation and evaluation were carried out. The experimental results show that the proposed scheme has a great improvement in delivery rate, average transmission delay, average network overhead, energy and average hop count compared with classical works.

Keywords Intermittent, Multi-copy, Energy, Disjoint path, Markov chain

1 引言

在不具备完整传输路径的情况下,移动机会网络依靠节点的移动性和机会性接触,通过“存储-携带-转发”方式进行数据传输^[1]。为了使数据在机会网络中快速扩散,大量的多备份路由协议相继被提出。文献[2]提出了一种基于社会活动和物理接触的突发灾害应急移动机会网络路由算法;文献[3]提出基于历史信息的机会网络路由协议;文献[4-5]给出了移动社交网络中的数据转发方案;文献[6]提出了改进的移动机会网络(OMNs)数据转发算法。此外,近年来提出了一类基于感知的^[7-8]、社会相似性的^[9-10]社交路由思想。文献[11]提出了 Epidemic Routing 算法,该算法类似传染病在人群中的扩散,其数据传输投递率最大、传输时延最小,但是网络资源开销巨大,网络的负载最大。在文献[12]的基础上,文献[13]提出了 PeopleRank 路由算法,利用节点社交性的高低对节点进行排序,根据节点的中心度进行路由决策。Geo-Social^[14]利用移动节点的社会特性进行转发决策,在具有位置

历史作为社会特征条件下,提出了新的地理社会指标,将消息转发给效用值高的节点。此外也有少量的能量算法。文献[15]提出了移动自组织网中的能量优化路由算法;文献[16]对低功耗传输策略进行了研究;文献[17]在考虑能量限制的基础上分析了资源受限的移动机会网络的最优数据传播问题;文献[18]在自组网环境下提出基于能量均衡的选择性路由算法;文献[19]考虑了能量使用效率问题。在延迟容忍网络中,关注节点的能量剩余,选择能量较高的节点进行数据传输^[20-21],可以避免低能量节点因过度活跃而死亡,保障网络节点的存活率。

在实际应用场景中,网络通信需要能量的支持^[22],每个移动设备具有的能量是有限的。如果不考虑能量因素,会导致数据传输比较频繁的关键节点的能量耗尽而过早死亡。同时,在一些紧急服务场景下,节点无法随时补充能量,当能量耗尽时会停止工作,从而导致所有通过该节点的路径中断,通信无法正常进行。洪泛路由算法假设缓存资源和带宽是无限的,因此可扩展性差。如何在保证数据传输性能的同时降低

本文受国家自然科学基金(U1804164, U1404602)资助。
袁培燕(1978—),男,教授,博士,CCF 高级会员,主要研究方向为计算机网络, E-mail: peiyan@htu. cn。

能量的消耗成为研究的重要内容。

基于上述考虑,本文提出了一种节点不相交的路由算法,从而达到网络中节点能量消耗均衡的目的,延长网络的存活时间。本文第 2 节给出了节点不相交路由策略;第 3 节给出了系统模型以及问题的求解方法,并对模型进行了验证;第 4 节进行了仿真实验,对比了 5 种路由算法的相关性能;最后总结全文。

2 基于节点不相交的路由算法

2.1 问题的提出

洪泛路由算法能够快速地将消息扩散到网络中,因此整个网络环境中存在大量相同的消息副本,这种扩散方式在网络资源以及节点能量等不受限制的情况下,数据投递性能最优。在现实场景下,移动网络被大量应用在军事、野外等条件比较恶劣的环景下,当整个链路中某个设备能量不足时,不可能随时随地进行能量补充,所以这种数据传输方式是不现实的。本文为了延长网络的存活时间,避免关键节点因能量耗尽而死亡,规定除了源节点之外的所有中间节点只有一次转发数据包的机会,当中间节点在进行一次数据传输后,不再向其他非目的节点进行转发,这样任意转发过数据包的中间节点就不会同时出现在两条路径上,称这种思想为节点不相交路由。图 1 为节点不相交多径路由的示意图,其中 S 为源节点, D 为目的节点,从源到目的节点的路径有 3 条,不包含相交的路径与节点。

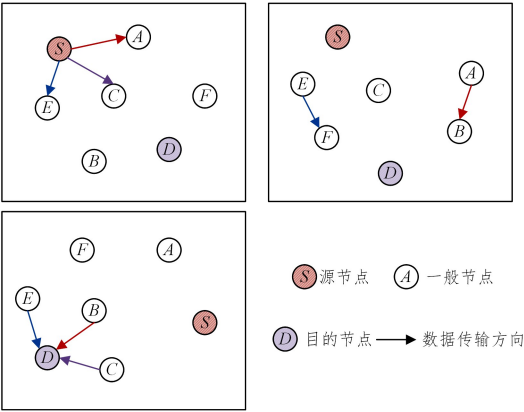


图 1 节点不相交多径路由

通过以上分析,本文给出了基于节点不相交路由算法的设计目标:

- (1)网络中单个消息的副本数要远远小于洪泛路由算法中副本的数量;
- (2)消息的传递延迟要尽可能与洪泛路由算法相近;
- (3)在消息副本数大大减少的情况下,传递率要尽可能高;
- (4)尽可能少地消耗网络中节点的能量。

2.2 路由策略

基于节点不相交的多径路由算法有如下假设:

- (1)网络中的节点位置不固定,随着时间的推移发生变化;
 - (2)每个节点都有一定的能量限制;
 - (3)任意两个节点在通信范围内都可能进行数据传输;
 - (4)数据传输不存在信道争用。
- 为了实现数据传输中的节点不相交,将网络中每一个节

点设置一个标志位 Forwarded,初值为 False。当节点接收到数据并将数据进行转发后,置 Forwarded=True。通过 Forwarded 值,判断节点是否已经转发过数据,避免同一个节点进行两次数据转发。

假设网络中的非源节点 i 携带消息,节点 i 没有对携带的消息进行过复制转发,节点 i 的 Forwarded=False,当移动节点 i 在网络中遇到节点 j ,首先判断节点 j 是否为目的节点,如果 j 是目的节点,那么消息进行直接传输;否则,需要判断节点 j 中是否含有节点 i 携带的消息副本。如果有,就不进行数据的转发;如果没有,节点 i 将消息复制转发给节点 j ,在进行一次数据传输后,节点 i, j 继续随着时间的推移在网络中移动并进行转发;同时,由于节点 i 已经进行过一次消息的转发,为了防止路径相交情况的发生,节点 i 的 Forwarded=True,节点 i 在移动过程中将不再进行数据转发,除非遇到目的节点。也就是说,不管是 Forwarded=False 的节点还是 Forwarded=True 的节点在遇到目的节点时都需要进行数据传输,以完成任务。上述方式避免了同一节点出现在多条路径上,减少了网络中消息副本的数量,同时减少能量的消耗。由于每个节点只具有一次转发同一种消息的机会,因此避免了关键节点因多次传递消息而能量耗尽,从而过早死亡。

综上所述,图 2 给出一个网络中节点数据传输的示意图。源节点 S 产生消息并进行数据传输,目的节点为 D ,初始时设置每个节点的 Forwarded=False。在 T_1 时刻,源节点 S 遇到中间节点 b ,判断节点 b 不是目的节点,同时节点 b 中不具有与节点 S 相同的数据副本,因此节点 S 将数据传输给 b ;随着拓扑的变化,在 T_2 时刻源节点 S 遇到节点 e 时,由于节点 e 不是目的节点并且不具有节点 S 携带的消息副本,因此节点 e 接收从节点 S 发来的消息(源节点不受限制的转发消息),同时,节点 b 遇到不含消息的非目的节点 g ,由于节点 b 的 Forwarded=False,因此节点 b 将含有的消息副本传输给 g ,之后节点 b 的 Forwarded=True;在 T_3 时刻,节点 b 遇到非目的且不含消息副本的节点 c ,由于节点 b 的 Forwarded=True,所以没有任何消息传输发生,避免了同一个节点在多条路径的情况;最后在 T_4 时刻,携带消息副本的节点 b 遇到目的节点 D ,直接进行数据传输。

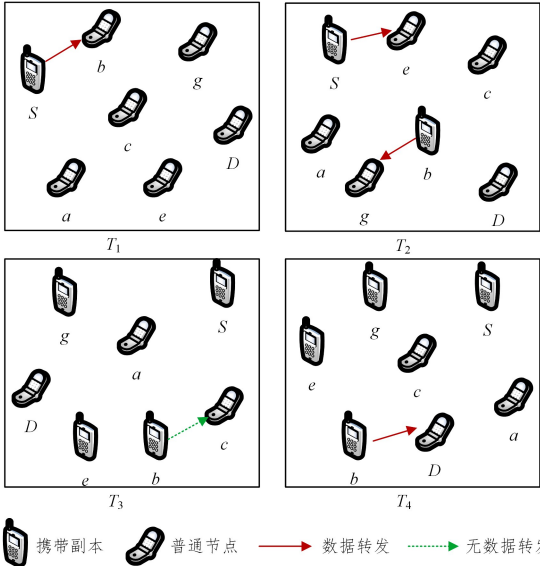


图 2 路由过程

3 模型设计

本文使用到的相关符号说明如表 1 所列。

表 1 相关符号设置	
S	易感节点
A	传染节点
W	等待救治的节点
I_A	传染节点数目
I_W	等待救治的节点数目
N	节点的总数目
β	节点的接触率
I	感染节点数目总和
$S(t)$	t 时刻系统中易受感染的节点数目
$I(t)$	t 时刻感染节点数目
$I_A(t)$	t 时刻传染节点数目
$I_W(t)$	t 时刻等待救治节点数目

由于洪泛路由类似于传染病的感染模式,因此本文将数据传输表示为一个“病毒传染”模型。在此模型中,源节点为病毒感染点,未含消息副本的节点称为易感节点,目的节点就是治疗院。此外,对于同一种病毒,易感节点只能感染一次,并且每个传染节点只有一次感染非目的节点的机会。其中病毒感染点可以感染每一个与之接触的易感节点,第一次被感染的节点称为传染节点,传染节点在感染其他一个易感节点后就会转变为等待救治的节点,等待救治的节点只能等待治疗院的救治而“恢复”,不再具备传染的功能。需要指出的是,对除了病毒感染点的其他节点只有一次传染病毒机会的设定,实现了节点不相交的目的。综上所述,易感节点最终可以转变为两种状态,传染状态和等待救治的状态,传染节点和等待救治的节点统称为感染节点。

3.1 马尔可夫链模型的建立

基于上述情况,受感染节点数目的变化可以被建模为马尔可夫链^[23],文献[24]建立了一种基于传染病的马尔可夫模型,在该模型中每个“受感染”节点在遇到其他节点时进行信息传递。根据文献[24]提出的建模方式以及上述分析,建立了基于洪泛的节点不相交马尔可夫链模型,传染节点由源病毒点感染易感节点以及传染节点感染易感节点转变得来,表示为 $S \rightarrow A$,等待救治节点由传染节点转变,表示为 $A \rightarrow W$,如图 3 所示。

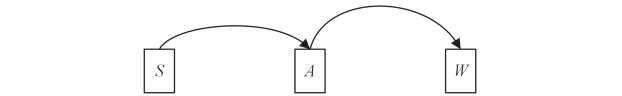


图 3 基于节点不相交的洪泛传染病马尔可夫链模型

图 3 的模型采用 3 层结构。其中 S, A, W 分别表示为易感状态、传染状态和等待救治状态,每个节点只能存在于这 3 种状态中。此外传染状态只能由易感节点被感染后而转变,节点的传染可同时由源病毒点与传染节点感染易感节点实现,等待救治的状态只能由传染状态转变。

3.2 模型分析

由于模型中传染节点由病毒感染点与传染节点感染其他易感节点实现,在某一时刻,如果病毒感染点没有感染其他节点,传染节点经过一次病毒感染后进入等待救治的阶段,同时等待救治节点数目增加,传染节点的数量保持不变。因此,传染节点数目的变化不依赖传染节点,等待救治节点数目的增加是由于传染节点的一次数据转发。

图 4 为网络中节点状态数目变化示意图,其中圈表示具体的时刻,状态 (i, j) 中 i 表示当前时刻传染节点的数目, j 表示当前时刻等待救治的节点数目,图中的边表示数量变化。 I_A 表示传染节点数目的变化, I_W 表示等待救治节点数目的变化。当状态由 (i, j) 转变为 $(i+1, j)$,其中等待救治节点数目 j 保持不变,传染节点数目加 1,在这种情况下病毒感染点感染了一个易感节点,因此 I_A++ ;状态 (i, j) 到状态 $(i, j+1)$ 是由于一个传染节点在进行病毒感染后转变成为一个等待救治的节点,因此 I_W++ ,但同时由于被感染的节点转变为传染节点,因此传染节点的总数目 i 保持不变,这种节点数目的转变是在原感染点不感染其他节点的情况下发生的。

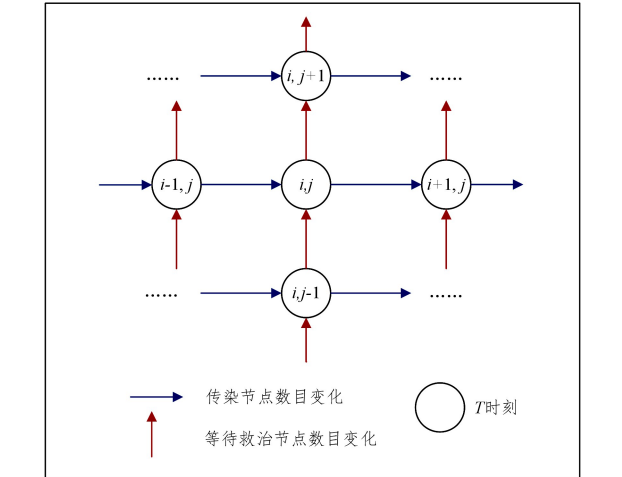


图 4 感染节点数目变化图

基于上述描述,传染节点数目的增加只能依靠病毒感染点,等待救治节点数目的变化由传染节点的转变而来。假设初始时系统模型中一共有 N 个节点,其中有一个病毒感染点(病毒感染点也属于感染节点), S 个易感节点, 0 个等待救治的节点。本文用 $S(t)$ 表示 t 时刻系统中易受感染的节点数目, $I_A(t)$ 表示 t 时刻传染节点数目, $I_W(t)$ 表示 t 时刻等待救治的节点数目, $I(t)$ 表示 t 时刻感染节点数目, β 表示节点的接触率,因此每个节点每单位时间接触的节点数为 $\beta(N-1)$,模型中未感染节点的比例为 $S/(N-1)$ 。由于本文采用二维连续时间马尔可夫链(CTMC)模型追踪每种类型感染节点的数量变化,以下为每种状态节点数目变化率。

状态 $S \rightarrow I_A$ 的转变率为:

新增的传染节点数目

$$\begin{aligned} &= \text{源节点} \times \text{单位时间接触节点数} \times \text{未感染的节点比例} \\ &= 1 \times \beta(N-1) \times \frac{S}{N-1} \\ &= \beta S \end{aligned}$$

状态 $I_A \rightarrow I_W$ 的转变率为:

新增的等待救治的节点数目

$$\begin{aligned} &= \text{传染节点} \times \text{单位时间接触节点数} \times \text{未感染节点的比例} \\ &= (I_A - 1) \times \beta(N-1) \times \frac{S}{N-1} \\ &= \beta S(I_A - 1) \end{aligned}$$

经过以上分析,可以得出某时刻节点数量转变的马尔可夫模型,如图 5 所示。

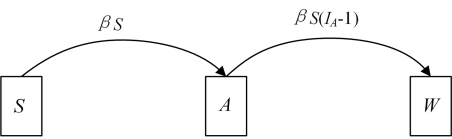


图 5 节点数量变化的马尔可夫链模型

本文的目标之一是找到 I_A 和 I_W 随时间变化的函数。整个模型中节点状态都包含在状态 S 和状态 I 中,假设系统中每种病毒的传染是独立的。在初始阶段,也就是 $t=0$ 时:

$S=N-1, I_A(0)=1, I_W(0)=0$

根据图 5,可以得出节点数目变化的瞬态解:

$\frac{dI_A}{dt}=\beta S$ (1)

$\frac{dI_W}{dt}=\beta S(I_A-1)$ (2)

上述两个微分方程式(1)、式(2)是可分离的,其中 $I=I_A+I_W$,同时利用初始状态可求得两个时间函数 $I_A(t)$, $I_W(t)$:

$$I_A(t)=\frac{\sqrt{2N-1}+\frac{N-\sqrt{2N-1}}{N-1}e^{-\beta\sqrt{2N-1}t}}{1-\frac{N-\sqrt{2N-1}}{N-1}e^{-\beta\sqrt{2N-1}t}}$$
 (3)

$$I_W(t)=\frac{I_A^2}{2}+\frac{1}{2}-I_A$$
 (4)

3.3 模型验证

对上述基于节点不相交模型系统进行评估,首先需要计算 β 的值, β 表示节点间的接触概率,通过记录多个模拟的每个 S 与 I_A , I_A 与 I_W 值感染之间的时间来计算接触率 β 。例如,在时间间隔 Δt ,将系统从状态 $I_A=i$ 到状态 $I_A=i+1$,状态 $I_W=j$ 到 $I_W=j+1$ 记录下来,并在许多模拟中取 β 的平均值。在某一时刻 Δt 内,由于状态 S 到状态 A 节点数目变化的瞬态解为 βS ,所以 $\beta=1/S\Delta t$,状态 A 到状态 W 节点数目变化的瞬态解为 $\beta S(I_A-1)$, $\beta=1/(S(I_A-1)\Delta t)$,然后对这些 β 值在不同的状态上取平均值,以给出模型的 β 。通过参数 β ,对上述的模型进行模拟。

在实验模拟时,节点移动情况采用来自 KAIST^[25] (Korea Advanced Institute of Science and Technology) 的真实数据集,模拟时间设置为 15 000 s,网络中的节点个数为 90。图 6 为受感染节点数量的变化情况。

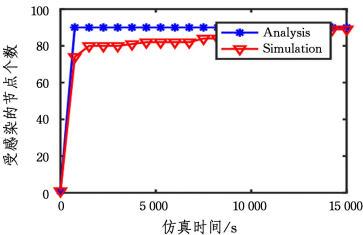


图 6 受感染节点数目变化拟合曲线

从图中可以看到,理论结果与模型曲线十分吻合,因此该模型能够准确地预测到受感染节点数目的变化,该模型的建立是合理的。

4 仿真与分析

4.1 仿真环境与参数设置

本文基于 Visual C++ 6.0 平台,集成了 Epidemic, Page-

Rank^[13], EpidemicDisjointPath, PageRankDisjointPath, GeoSocial^[14] 5 种路由算法,该移动机会网络模拟器平台在文献[26]中有详细的介绍。节点移动采用来自 KAIST 的真实数据集,每个节点最大的通信距离为 250 m,仿真时间设置为 15 000 s,在实验开始的时候,随机挑选 1 000 对节点作为源-目的节点对。采用以下指标对路由算法的性能进行分析。

4.2 仿真结果分析

(1) 投递率

投递率表示网络中被目的节点成功接收的节点总数与源节点生成消息的总数目之比。该参数能够直接反映算法的好坏。在计算时不考虑中间节点转发的消息副本的数目,其计算公式为:

投递率 = $\frac{\text{成功传输到目的节点的消息总数}}{\text{系统产生的消息总数}}$

图 7 为 5 种算法的投递率。

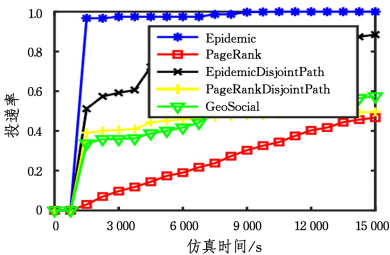


图 7 投递率

图 7 中,基于洪泛的投递率最高;基于洪泛路径不相交的路由算法,投递率相对较高,仅次于洪泛,在 7 500 s 后投递率缓慢增长,趋于 0.9;基于中心度节点不相交的算法在 0—7 000 s 时投递率高于 PageRank 与 GeoSocial,在 7 000 s 之后低于 GeoSocial 算法,渐渐地与 PageRank 的投递率相近。

(2) 能量消耗

在仿真实验中将每个节点的初始能量设置为 10 000 个能量单位,假设数据接收或者转发数据,都需要消耗 1 个能量。图 8 给出总能量消耗。

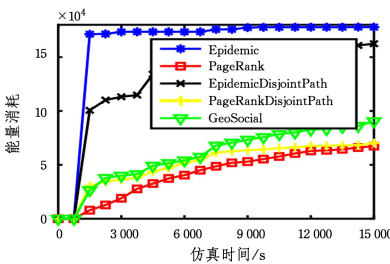


图 8 总能量消耗个数

从图 8 中可以看到,随着时间的延长,每种路由算法能量的消耗逐渐变大。由于洪泛是不计任何代价进行数据传输而达到最高的投递率,所以在数据传输的同时伴随着大量能量的消耗,从图中可以看到能量的消耗在短时间内几乎达到巅峰,剩余少量未投递的消息在网络中继续传输,能量消耗缓慢地增长;基于洪泛路径不相交算法的能量消耗与洪泛的能量消耗差不多是相同的曲线,但是明显少于洪泛算法,因此有效地控制了能量的消耗;另外基于 PageRank 路径不相交的算法的能量消耗少于 GeoSocial,随着时间的变化慢慢趋近于低能消耗 PageRank。可以看到在每种算法的基础上,利用节点

不相交的方式可以有效控制能量的消耗。

图 9 为每间隔 750 s 90 个节点能量消耗的标准差变化曲线：

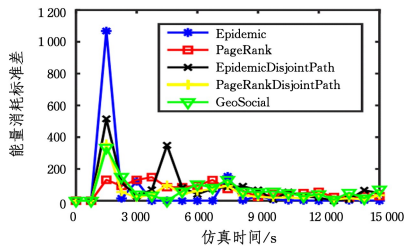


图 9 节点总能量消耗个数标准差

在进行仿真时,每隔 750 s 输出 90 个节点的剩余能量,经过相关计算,得出每 750 s 内节点能量消耗个数的标准差。从图 9 中可以看到,所有的算法在初期(0~2 250 s)标准差的起伏变化比较大,这是因为消息在网络中的分配不均匀,随着时间的增长,节点能量消耗达到均衡,曲线慢慢保持平稳状态,有利于在数据传输时不过度地利用某一个节点进行数据转发,使每个节点能量的消耗达到均衡,避免导致某些节点因能量的耗尽而“死亡”。

(3)跳数

平均跳数 = $\frac{\text{所有被接收的数据包的跳数}}{\text{成功传递的数据包个数}}$

跳数表示为源节点产生的消息,在经过多少个节点才能够到达目的节点。从图 10 中可以看到,基于 PageRank 的路径不相交路由算法的跳数在实验初期(0~3 000 s)和 PageRank、GeoSocial 算法平均跳数的变化曲线大致相同,随着时间的增大,在 6 000 s 时小于 PageRank,在 6 750 s 时小于 GeoSocial,在 5 种方式中跳数最小。

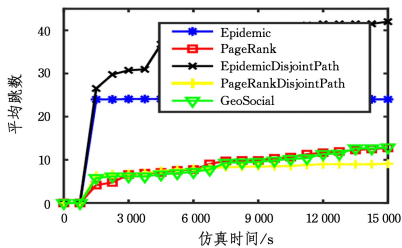


图 10 平均跳数

(4)传输时延

平均传输时延 = $\frac{\text{所有成功递交消息的延时总和}}{\text{成功递交的消息数}}$

从图 11 可以看到,基于洪泛的投递延时最小,基于 PageRank 路径不相交算法的投递延时仅仅大于洪泛,其他路由方案的投递延时随着时间的增大而增大,其中基于洪泛路径不相交的方案,在 7 500 s 时,投递延时开始缓慢增长,逐渐低于 GeoSocial 算法。

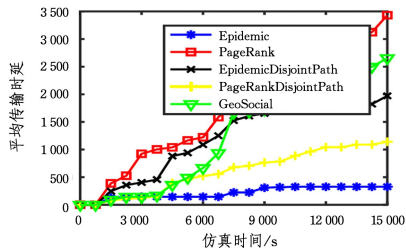


图 11 平均投递延时

(5)网络开销

平均网络开销 = $\frac{\text{网络中所有的消息副本数目}}{\text{系统产生的消息数目}}$

平均网络开销是系统产生的每个消息在网络中平均的副本数。图 12 为平均网络开销的实验结果,由于洪泛是在每个节点相遇的基础上进行数据传输,因此大量的消息副本存在于网络中,初始时(0~1 500 s)网络的开销随着时间的变化急剧增长,从图 7 可以看到,洪泛的投递率在此时已经趋于 1,剩余少量的未投递的消息,因此网络开销几乎产生于初始阶段,所以在网络初期时已经含有大量副本,因此随着时间的变化,只有少量副本的产生,曲线逐渐趋于平稳;由于基于洪泛的节点不相交算法的每个节点只能转发一次消息,因此控制了消息副本在网络中的泛滥,消息副本数明显少于洪泛;PageRank、PageRankDisjointPath、GeoSocial 的网络开销远远的小于洪泛,其中 PageRank 路径不相交算法的网络开销一直小于 GeoSocial,随着时间的变化,网络开销变化不明显,在 15 000 s 时,几乎与 PageRank 的相重合,预计在 15 000 s 后会小于 PageRank。

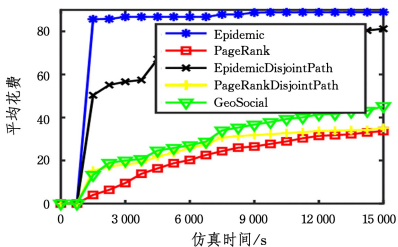


图 12 平均网络开销

通过以上实验结果可以得出,基于路径不相交的算法具有很高的研究价值。在投递率保持高效率的情况下,能够有效控制能量的消耗,同时能够看出,随着时间的变化,节点能量的消耗保持均衡性,这避免了由于某些节点遭受过度的使用,而造成节点“死亡”而链路中断,同时投递延时以及跳数都有改善,网络中节点的平均开销也相应较少。

结束语 由于移动机会网络中没有端到端的数据传输路线,因此大量多径路由传输方案被提出,同时由于移动机会网络中节点的能量是有限的,为了解决网络中数据传递能量消耗的问题,本文提出了一种节点不相交多路径解决方案,并利用二维连续时间马尔可夫链进行建模,分析节点状态之间的变换,最后对其性能进行了仿真。实验结果表明,基于路径不相交的方案具有很大的研究价值,在保证投递率高效的同时有效地控制了能量的消耗,为今后研究能量限制对数据传输的影响提供了参考,对进一步研究移动机会网络有一定的积极意义。

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 & Computer Applications,2016,62(C):163-170.

[2] WANG X,LIN Y,ZHANG S,et al. A social activity and physical contact-based routing algorithm in mobile opportunistic networks for emergency response to sudden disasters[J]. Enterprise Information Systems,2015:1-30.

[3] BOLDRINI C,CONTI M,JACOPINI J,et al. HiBoP:a History

Based Routing Protocol for Opportunistic Networks[C]// IEEE International Symposium on World of Wireless, Mobile & Multimedia Networks, IEEE, 2007.

[4] WU D, ZHANG F, WANG H, et al. Security-oriented opportunistic data forwarding in Mobile Social Networks[J]. Future Generation Computer Systems, 2017; S0167739X17301206.

[5] XU Q, SU Z, GUO S. A Game Theoretical Incentive Scheme for Relay Selection Services in Mobile Social Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6692-6702.

[6] ZHOU H, LEUNG V C M, ZHU C, et al. Predicting Temporal Social Contact Patterns for Data Forwarding in Opportunistic Mobile Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, PP(99): 1-1.

[7] ZAKHARY S, RADENKOVIC M, BENSLIMANE A. Efficient Location Privacy-Aware Forwarding in Opportunistic Mobile Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(2): 893-906.

[8] ZHANG J, HUANG H, YANG C, et al. Wireless Newt (2019) [OL]. <https://doi.org/10.1007/s11276-018-01907-2>.

[9] YUAN P, PANG X, SONG M. SSR: Using the Social Similarity to Improve the Data Forwarding Performance in Mobile Opportunistic Networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 44840-44850.

[10] XU F, XU Q, XIONG Z, et al. Intelligent distributed routing scheme based on social similarity for mobile social networks [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 96: 472-480.

[11] LIANG D. Opportunistic media access control and routing for delay-tolerant mobile ad hoc networks[J]. Wireless Networks, 2012, 18(8): 949-965.

[12] BRIN S, PAGE L. The Anatomy of a Large-Scale Hypertextual Web Search Engine[J]. Computer Networks & Isdn Systems, 1998, 30(1/7): 107-117.

[13] MTIBAA A, MAY M, DIOT C, et al. PeopleRank: Social Opportunistic Forwarding[C]// Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Computer Communications, Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, San Diego, Piscataway; IEEE, 2010: 111-115.

[14] YING Z, ZHANG C, LI F, et al. Geo-social: Routing with location and social metrics in mobile opportunistic networks[C]// IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2015.

[15] 罗玉宏, 王建新, 陈松乔. 移动自组网中能量优化的路由算法研究综述[J]. 计算机科学, 2006, 33(3): 7-10.

[16] 曹洪新, 李光顺, 吴俊华. 基于一种新网络拓扑结构的低功耗研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(S2): 327-330.

[17] LIU Y, WU H, XIA Y, et al. Optimal Online Data Dissemination for Resource Constrained Mobile Opportunistic Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6): 5301-5315.

[18] 周鑫. 自组网中一种基于能量均衡的选择性洪泛路由算法[J]. 计算机应用与软件, 2014(7): 101-104.

[19] ZHANG Y, LI R, ZHANG Y, et al. Data Forwarding Algorithm Based on Energy Efficiency in Multi-Hop Device to Device Network[C]// International Conference on Parallel & Distributed Computing. IEEE Computer Society, 2017.

[20] 聂旭云, 杨炎, 刘梦娟, 等. 基于节点能力模型的容迟网络路由算法[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(6): 905-910.

[21] BISTA B, RAWAT D B. EA-PRoPHET: An Energy Aware PRoPHET-Based Routing Protocol for Delay Tolerant Networks[C]// 2017 IEEE 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). IEEE, 2017.

[22] 朱至天, 湛明, 闫朝星, 等. 延迟中断容忍网络路由技术综述[J]. 遥测遥控, 2018, 39(6): 63-76.

[23] AHN J, SATHIAMOORTHY M, KRISHNAMACHARI B, et al. Optimizing Content Dissemination in Vehicular Networks with Radio Heterogeneity[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(6): 1312-1325.

[24] SMALL T, HAAS Z J. The shared wireless infestation model-a new ad hoc networking paradigm[C]// Proceedings of The Fourth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2003). 2003: 233-244.

[25] RHEE I, SHIN M, HONG S, et al. On the Levy-Walk Nature of Human Mobility[M]. IEEE Press, 2011: 630-643.

[26] YUAN P, SONG M. MONICA One Simulator for Mobile Opportunistic[C]// Proceedings of the 11th EAI International Conference on Mobile Multimedia Communications, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2018: 21-32.