

机会网络中基于摆渡节点与簇节点相互协作的路由机制

刘春蕊¹, 张书奎^{1,2}, 贾俊铖¹, 林政宽¹

(1. 苏州大学计算机科学与技术学院, 江苏苏州 215006; 2. 江苏省无线传感网高技术研究重点实验室 江苏南京 210003)

摘要: 机会网络是一种不需要在源节点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网络通信的延迟容忍自组织网络, 它以“存储—携带—处理—转发”的模式进行. 为实现互不相交簇间的信息传输, 本文设计了一种带阈值的簇移动模型 CMMT, 并提出了一种基于摆渡 (Ferry) 节点与簇节点协作的路由算法 (CBSW). 该算法减少了冗余的通信和存储开销, 以及在 Spray 阶段簇节点没有遇到目的节点或摆渡节点, 进入 Wait 阶段携带消息的节点采用直接分发方式只向目的节点传输等问题. 仿真实验表明, CBSW 算法能够增加传输成功率, 减少网络开销和传输延迟.

关键词: 机会网络; 移动模型; 协作; 路由算法

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2016)11-2607-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.11.007

Routing Mechanism Based on the Cooperation of the Ferry Nodes and Cluster Nodes in Opportunistic Networks

LIU Chun-rui¹, ZHANG Shu-kui^{1,2}, JIA Jun-cheng¹, LIN Cheng-kuan¹

(1. School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

2. Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: Opportunistic Networks are delay tolerant self-organized networks with sparse nodes, where the message propagation depends on the cooperation of nodes to fulfill a “store-carry-process-and-forward” fashion by leveraging the mobility of nodes, because there does not exist a complete path from the source to the destination in the most time. To achieve the communication of nodes in mutually disjoint clusters, we propose a Cluster Movement Model with Threshold (CMMT) and routing algorithm (CBSW), which is Cooperative Binary Spray and Wait routing algorithm based on the Ferry nodes and cluster nodes cooperation. This routing algorithm reduces of the redundancy of communication and store the cost, as well as if the destination or Ferry nodes are not found in the spraying phase, nodes carrying a message copy will forward the message only to its destination in the Waiting phase nodes etc. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed CBSW protocol in terms of high delivery ratio, low overhead and small average delay.

Key words: opportunistic networks; movement model; cooperation; routing algorithm

1 引言

机会网络源于延迟容忍网络 (DTN) 和移动自组网络 (MANET), 可视为两者的子类^[1], 它是一种在源节点和目的节点之间不存在连通路径的情况下, 利用节点

移动带来的相遇机会实现网络通信的延迟容忍自组织网络^[2]. 由于环境干扰、应用特点等影响, 在许多情况下无法建立全连通网络, 而机会网络可满足这些应用需求, 广泛应用于野生动物监测、手持设备组网、智能交通等领域. 典型应用: ZebraNet^[3] 是一个追踪肯尼亚草

收稿日期: 2015-04-23; 修回日期: 2015-10-13; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61201212, No. 61572340); 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK2011376); 江苏省“六大人才高峰”项目 (No. 2014-WLW-010); 苏州市融合通信重点实验室 (No. SKLCC2013XX); 江苏省产学研前瞻性项目 (No. BY2012114); 软件新技术与产业化协同创新中心部分资助; 江苏省科技项目 (No. BY2014059-02)

原斑马活动的机会网络系统, SWIM^[4] 是一个监视鲸鱼活动的水下机会网络系统, 基于车辆传感器的网络系统 CarTel^[5], 能够用于监测环境、诊断车辆状态和交通路线导航等, DakNet^[6] 为偏远乡村提供成本较低的数字通信服务. 此外, 文献[7,8]设计了一种社交机会网络系统.

目前, 国内外研究人员提出的机会网络路由机制, 主要有: Direct Delivery、CAR 等^[9] 基于转发策略的路由算法和 Epidemic^[10]、Spray and Wait^[11]、PRoPHET^[12] 等基于复制策略的路由算法. 多副本机制虽然时延较低、可靠性较高, 但其占用了大量的网络带宽和缓存空间, 不适用于资源受限的机会网络. 在节点能量和带宽受限的情况下, 单副本路由机制在网络资源开销方面有较强的优势^[13].

在许多应用中, 有些节点的地位高于其它节点, 这些节点具有较强的存储能力和无线通讯能力, 称之为摆渡 (Ferry) 节点. 自从基于消息摆渡的路由算法被提出以后, 人们对其加以改进和拓展的研究一直在进行, 在 Ferry 节点主动运动路径的设计和优化等方面已经取得了一些进展, 但在消息传输方面存在冗余的通信和存储开销, 这些问题对机会网络的性能产生重要影响. 在节点移动过程中, 由于密度分布不均等形成互不相交的“簇”, 为实现不同簇间的信息快速传输, 本文设计了一种带阈值的簇移动模型 CMMT, 并在此基础上提出了一种协作路由算法 CBSW. 本文的主要贡献如下:

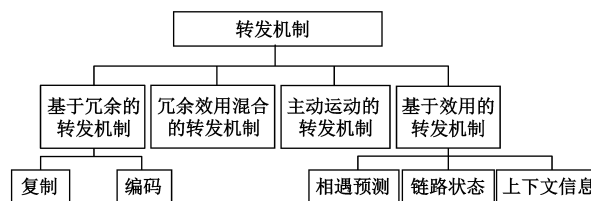
①设计了移动模型 CMMT, 该模型增加了 Ferry 节点与簇节点的相遇机会.

②通过簇节点与 Ferry 节点的协作, 设计了路由算法 CBSW. 该算法减少了冗余的通信和存储开销、解决了在 Wait 阶段采用 Direct Delivery 方式只向目的节点传输等问题, 提高了传输成功率, 减少了路由开销.

2 相关工作

2.1 机会转发

路由和转发是组网技术的两个首要问题. 现有的 Ad-Hoc 网络路由协议都是假设源节点与目的节点之间至少存在一条连通路径, 不适用于机会网络. 机会网络以“存储—携带—处理—转发”的模式工作, 当路由表中不存在下一跳节点时, 消息在当前节点存储, 并随着该节点的移动寻找合适的转发时机, 因而每个消息选择合适的转发节点和时机就成为设计高效机会网络路由协议的关键. 文献[14]根据转发策略的不同, 将现有的转发机制分为: 基于冗余的转发机制、冗余效用混合的转发机制、主动运动的转发机制和基于效用的转发机制, 如图 1 所示.



2.2 移动过程

在机会网络中, 移动模型研究的是以刻划节点的相遇特征为核心. 因为在机会网络中, 数据传输依赖于节点移动带来的相遇机会, 而节点的相遇概率和相遇时间分布是由节点的移动模型决定的. 因此, 与传统的 MANET 相比, 移动模型的研究更加重要.

对于移动模型的研究主要有两种途径, 一种是对模型进行理论或仿真分析, 如 Random Way Point^[15] (RWP)、Random Walk^[16] (RW) 和 Random Direction^[17] (RD) 是 3 个经典的移动模型. 另一种是基于运动轨迹集进行统计分析, 收集运动轨迹集也就成为移动模型的研究基础之一, 如 MIT 的 Reality Mining^[18] 记录了 MIT 校园中 100 个智能手机移动轨迹和相遇数据, UCSD 的 Wireless Topology Discovery^[19] 收集了 300 个 PDA 与 Wi-Fi 接入点的相遇数据, Cambridge 的 Huggle^[20] 记录了若干 iMote 设备在校园内的相遇情况, UMass 的 DieselNet^[21] 收集了公交车上无线节点组成的机会网络实际运行中的相遇规律.

本文设计的移动模型根据节点类型不同而不同. 簇节点采用 CMMT 移动模型, 它们在簇范围内按一定规则移动, Ferry 节点采用基于地图的移动模型, 它们沿着预先设定的路径移动, 为簇节点提供消息转发服务.

2.3 路由算法

在机会网络的路由算法中, Epidemic^[10] 是经典的路由算法之一. 在 Epidemic 算法中, 每个节点维护一个缓存区, 存储源于本节点和以本节点作为中继节点的数据分组, 每个数据分组有一个全局唯一标识符. 同时每个节点维护一个概要向量, 用来记录节点所携带的数据分组. 当两节点相遇时, 首先交换彼此的概要向量, 获知对方存储数据分组情况后, 仅传输对方没有的数据分组. Epidemic 算法本质上是一种洪泛算法, 每个节点都将数据分组转发给所有遇到的节点. 其主要优点是能最大化数据分组传输的成功率, 找到一条最短路径, 减少传输延迟, 其主要缺点是网络中存在大量的数据分组副本, 会消耗大量的网络资源.

Spray and Wait^[11] (SW) 也可视为基于泛洪策略的路由算法, 当两节点相遇时, 向对方传输没有的数据分组, 但通过一定策略限定数据分组副本数量以免泛洪.

Binary Spray and Wait (BSW) 算法是 SW 算法的一种改进。

Ferry 路由算法根据 Ferry 节点的数量可以分为两类:单 Ferry 路由算法和多 Ferry 路由算法。根据 Ferry 节点是否按照同一路径进行路由,多 Ferry 路由算法分为:Ferry 单路径算法和 Ferry 多路径算法。典型的 Ferry 路由算法有:MFS^[22]、NIMF/FIMF^[23]、SIRA/MURA/NRA/FRA^[24] 算法。MFS 算法是一种单 Ferry 节点的路由算法,首次在 DTN 中引入 Ferry 节点,为不存在连通的 DTN 节点提供消息转发服务,该算法主要研究静态 DTN 在节点稀疏分布网络场景下的数据通信问题。

为了减少冗余的通信和存储开销,本文设计了一种 CBSW 路由算法,该算法结合了 Ferry 路由与 BSW 路由算法的优点,并解决了在 Spray 阶段簇节点没有遇到 Ferry 节点造成传输成功率较低等问题。

3 移动模型

3.1 网络环境

被动式 Ferry 路由规划在已有的 DTN 部署应用和实验中得到了更多的应用,这是因为在实际的 DTN 部署应用中,由于受地理环境、交通条件以及 Ferry 节点承载工具的限制,Ferry 节点只能被动地按照预先设定的运动路径运动,独立或辅助完成 DTN 网络的数据传输。例如,图 2 乡村通信网络就是一个典型的被动式 Ferry 路径规划的应用实例。

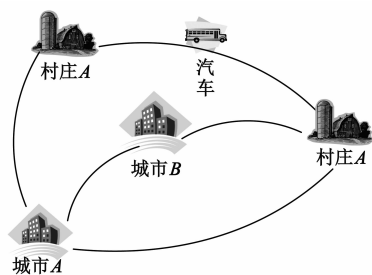


图2 乡村通信网络示意图

网络由多个互不相交的簇和预先设定的路径组成。移动节点分为 Ferry 节点和簇节点,Ferry 节点采用基于地图的移动模型,且按照预先设定的路径移动。簇节点采用 CMMT 移动模型,且只能在其所在的簇范围内按一定规则移动。设簇的个数为 N ,簇的范围是半径为 R 的圆形区域,每个簇内有 n 个簇节点且簇中心位置已知,Ferry 节点的个数为 F ,不同簇内的簇节点进行数据交换时,需通过 Ferry 节点协作转发,并作如下设定:

(1) 同一簇内的簇节点在本簇范围内移动,移动速度较慢,它们之间的相遇概率较高,通过一跳或多跳可完成数据交换。

(2) 不同簇内的簇节点移动范围互不相交,相遇概

率为零。因此,不同簇内的簇节点通过移动速度较快的 Ferry 节点协作完成消息传递。

3.2 移动模型

设节点 A 在半径为 R 的圆形区域 S 内运动, P_i 和 P_{i+1} 分别表示 A 的当前位置和下一时刻移动到的位置,并按以下规则从 P_i 移动到 P_{i+1} :

(1) P_{i+1} 从 S 中按均匀分布随机选择,且其选择与历史及当前位置无关。

(2) A 以速度 V_i 从 P_i 匀速运动到 P_{i+1} ,且 V_i 的选择与历史以及当前速度大小无关。以常用的均匀速度分布为例, V_i 从 $[V_{\min}, V_{\max})$ 按均匀分布随机选择,即 $f(v) = 1/(V_{\max} - V_{\min}) (V_{\min} \leq v < V_{\max})$ 。

对于一个正方形区域 S 内的 RWP 移动模型^[25],其节点位置 (x, y) 的分布与 V_{\min} 和 V_{\max} 无关,节点位置分布的概率密度函数,记 $f(x, y)$ 。其特点如下:

(1) 节点运动方向偏向中心,方向角 θ 的概率密度函数为:

$$f(\theta) = \frac{1}{4\pi |\sin^3 \theta|} (|\sin \theta| (-2\cos^4 \theta - 2\cos^3 \theta |\cos \theta| + \cos^2 \theta + \cos \theta |\cos \theta| + 1)) + \frac{1}{4\pi |\sin^3 \theta|} \arcsin(|\sin \theta|) \cos \theta \quad (1)$$

$f(\theta)$ 的概率分布图如图 3 所示:

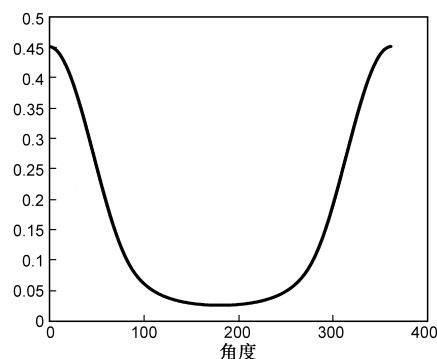


图3 概率分布图

(2) 稳态的概率密度函数 $f(x, y)$ 在正方形区域 $\sqrt{S} \times \sqrt{S}$ 内非均匀分布,如下式所示:

$$f(x, y) \approx \frac{36}{S^2} \left(x^2 - \frac{S}{4} \right) \left(y^2 - \frac{S}{4} \right) \quad (2)$$

$$\text{其中, } x, y \in \left(-\frac{\sqrt{S}}{2}, \frac{\sqrt{S}}{2} \right)$$

对于一个圆形区域 S 内的 Cluster Movement (CM) 移动模型^[25],节点位置分布的概率密度函数,记 $f(r, \theta)$ 。稳态的概率密度函数 $f(r, \theta)$ 在圆形区域 S 内非均匀分布,如下式所示:

$$f(r, \theta) = f(r) \approx -\frac{2\pi r^2}{S^2} + \frac{2}{S} \quad (3)$$

$$\text{其中, } r \in \left(-\sqrt{\frac{S}{\pi}}, \sqrt{\frac{S}{\pi}} \right)$$

为了增加簇节点与 Ferry 节点的相遇机会,通过对 RWP 和 CM 移动模型分析,设计了一种带阈值的移动模型 CMMT,该移动模型增加了 Ferry 节点与簇节点的相遇机会.当节点 A 从当前坐标 (X_t, Y_t) 移动到簇内另一随机坐标 (X_{t+1}, Y_{t+1}) 时,需判断 (X_{t+1}, Y_{t+1}) 到所在簇中心的距离是否大于阈值 (Threshold),如果是,则先经过簇中心,再移动到 (X_{t+1}, Y_{t+1}) ,否则直接移动到 (X_{t+1}, Y_{t+1}) .假设 N 个节点在半径为 R 的圆形区域 S 内运动, N 分别为 3, 5, 7, 9, 10, 15, 20, $R = 100\text{m}$, 阈值分别为 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100. 图 6 为阈值对传输成功率均值的影响.以阈值 = 0 为例,求不同节点个数的传输成功率,取其均值.当阈值 $> R/2$ 时,阈值 = 60 传输成功率均值最大.图 4、5、7 分别为阈值 = 0, 50, 100 时节点运动轨迹. CMMT 包含:在簇内按均匀分布随机选择坐标 (X_{t+1}, Y_{t+1}) 和根据条件判断是否将簇中心加入到路径.分别如算法 1、2 所示.

算法 1 选择 (X_{t+1}, Y_{t+1})

```

1   $x \leftarrow$  簇内一随机  $X$  轴坐标;
2   $y \leftarrow$  簇内一随机  $Y$  轴坐标;
3  while  $((x, y) \notin$  簇内节点坐标) do
4     $x \leftarrow$  簇内一随机  $X$  轴坐标;
5     $y \leftarrow$  簇内一随机  $Y$  轴坐标;
6  repeat
7     $x \leftarrow x +$  簇中心的  $C_X$  坐标;
8     $y \leftarrow y +$  簇中心的  $C_Y$  坐标;
9  return 生成坐标  $(x, y)$ ;

```

算法 2 更新路径

```

1   $c \leftarrow$  路径中最后一个节点;
2  for  $i = 0$  to 路径长度 do
3     $c \leftarrow$  随机产生簇内坐标;
4    if  $(c \neq \varphi \ \&\& \ c.\text{distance}(\text{所在簇中心坐标}) > \text{阈值})$  then
5       $P \leftarrow P \cup \{\text{簇中心坐标}\}$ ;
6    end if
7     $P \leftarrow P \cup \{c\}$ ;
8  repeat
9  路径中最后一个节点  $\leftarrow c$ ;
10 return  $P$ ;

```

4 路由算法

在移动模型 CMMT 基础上,提出了一种基于簇节

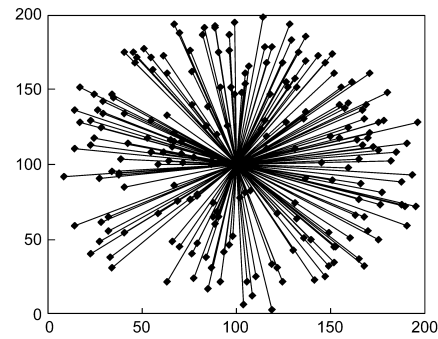


图4 (阈值=0)节点仿真轨迹

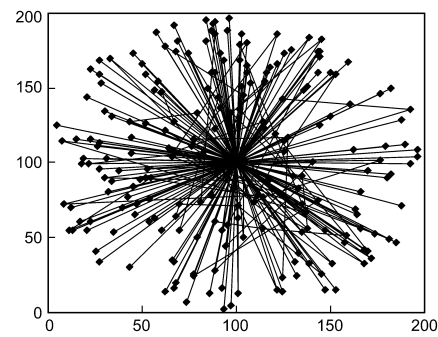


图5 (阈值=50)节点仿真轨迹

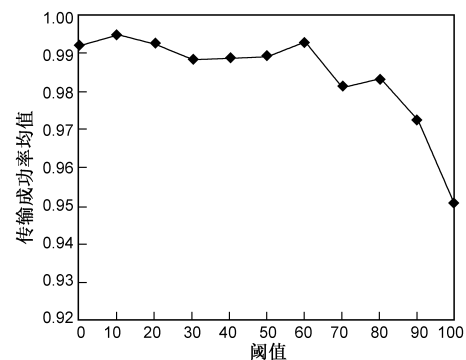


图6 阈值的影响

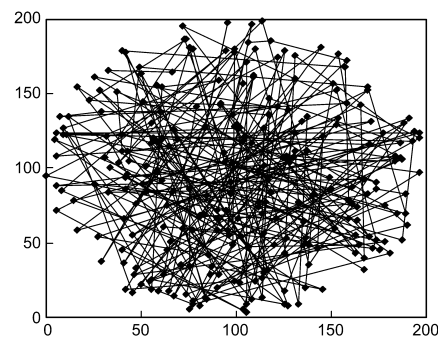


图7 (阈值=100)节点仿真轨迹

点与 Ferry 节点协作的 Binary Spray & Wait 路由算法 CBSW. 基本思想:在网络中引入 Ferry 节点,其沿着预先确定的路径移动,通过控制簇节点的运动路径使其

与 Ferry 节点相遇,从而实现不同簇内的消息传输.该算法分为两个阶段,Spray 阶段和 Wait 阶段.

在 Spray 阶段,源节点将需要传输的消息复制 L 份.若有 A 节点,其中包含 n 个数据分组,在 n 个数据分组中,包括起源于 A 节点和以 A 节点作为中继节点的数据分组. A 节点为簇节点或 Ferry 节点.

①如果 A 节点是簇节点,当 A 节点遇到中继节点 B 时,如果消息 M 的源节点 S 与目的节点 D 属于同一簇,判断 B 节点是否为 Ferry 节点,如果是,则不向 B 节点转发,否则,将 $\lceil \frac{n}{2} \rceil$ 个数据分组转发给 B 节点,自己留下 $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ 个数据分组.如果 S 与 D 不属于同一簇,将 $\lceil \frac{n}{2} \rceil$ 个数据分组转发给 B 节点,自己留下 $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ 个数据

分组,如果 B 节点是 Ferry 节点,则将源节点所在簇内转发 M 的节点内的消息删除.

②如果 A 节点是 Ferry 节点, A 进行消息转发时,只向 D 节点所在簇内的节点进行转发.

如果在该阶段遇到目的节点,则消息传输结束,否则随后源节点和中继节点重复进行上述过程,直到节点中只有一个数据分组为止,然后此节点转入 Wait 阶段.

在 Wait 阶段,如果消息 M 的源节点 S 与目的节点 D 属于同一簇,采用 Direct Delivery 方式转发给目的节点,否则,如果在 Spray 阶段没有遇到 Ferry 节点,采用向 Ferry 节点转发并向重新注入 L 份消息副本重复 Spray 阶段操作.流程图如图 8 所示,算法如算法 3 所示.

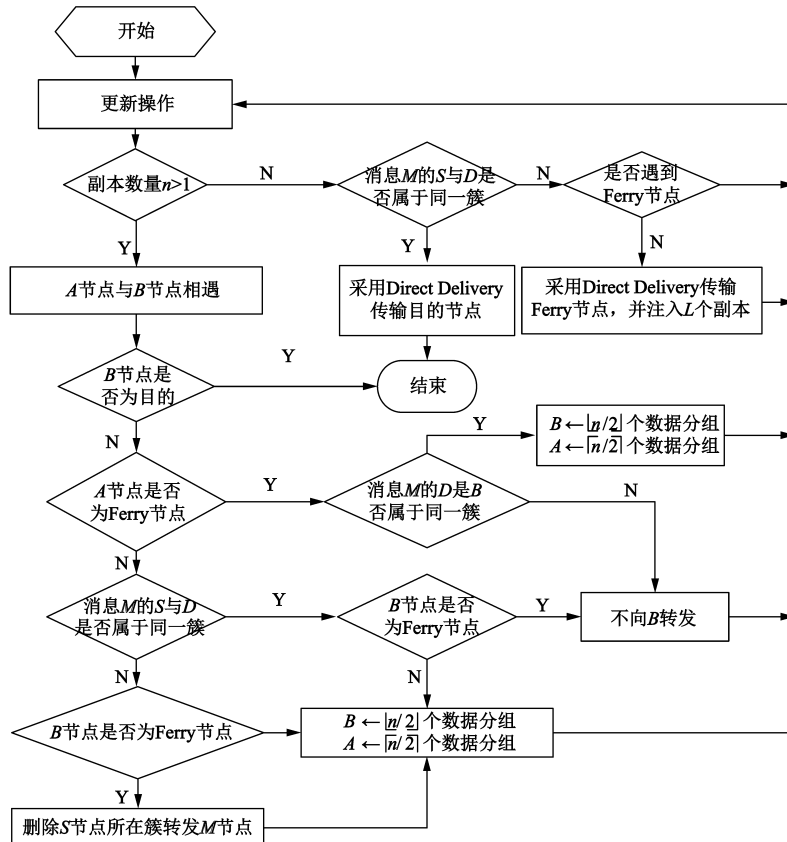


图8 算法流程图

算法 3 CBSW 路由算法

```

1  if (当前节点 ∈ 消息路径) then
2      return 不协作;
3  end if
4  if(当前节点.簇号.equals(源节点.簇号))
5      && 当前节点.equals(Ferry 节点)) then
6      return 不协作;
7  end if
8  if (成功向 Ferry 节点传输
9      && !当前节点.equals(Ferry 节点)
10     && !当前节点.簇号.equals(目的节点.簇号)) then
11     return 不协作;
12 end if
13 if(消息已成功向 Ferry 节点传输) then
14     for 节点 h to 消息 m 经过的节点 do
15         if (h.簇号.equals(源节点.簇号))

```

```

16    && h. 携带消息, contains(m)) then
17        删除节点 h 上的消息 m;
18        更新副本数量 ← 设置文件中数量;
19    end if
20    repeat
21    end if
22    if (消息数量 = 0 || 连接的数量 = 0) then
23        return 空表;
24    end if
25    List mcon ← new ArrayList;
26    for 消息 m to 所有消息 do
27        for 连接 con to 所有连接 do
28            DTNHost d = con. 另一节点
29            if (m. 目的节点 == d || d. equals(Ferry 节点)) then
30                mcon. add((m, con));
31            end if
32        repeat
33    repeat

```

5 性能分析

在网络模型中, 设簇的个数为 N , 每个簇内有 n 个簇节点和 F 个 Ferry 节点, 则节点总数为 $N * n + F$, 数据分组总数为 m , 消息生存时间为 $livebime$ 消息副本个数为 L .

当 $n \leq L$ 时, BSW 算法退化成 Epidemic 算法, 假设在某时间段 Δt 内, 数据分组 m_k 传输成功的概率为 P_d , 目的节点遇到簇节点 i 的概率为 P_i , 节点携有 m_k 的概率为 P_{ik} ; 目的节点遇到 Ferry 节点 f 的概率为 P_f , 节点携有 m_k 的概率为 P_{fk} , 则

$$P_d = \sum_{\Delta t=1}^{livebime} \left(\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left(\sum_{i=(m-1)n+1}^{nm-1} P_i \times P_{ik} \right) + \sum_{f=1}^{F-1} P_f \times P_{fk} \right) \quad (4)$$

当每个簇内有 n' 个新节点加入到网络中, 数据分组 m_k 传输成功的概率为 P'_d , 新节点的加入并不会改变已有节点的移动方式和转发数据分组的方式, 即 P_i 和 P_{ik} 不会改变, 而目的节点和新加入节点相遇的概率为 P'_i , 该节点中携带 m_k 数据分组的概率为 P'_{ik} , 则

$$P'_d = \sum_{\Delta t=1}^{livebime} \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left(\sum_{i=(m-1)n+1}^{nm-1} P_i \times P_{ik} + \sum_{i=(m-1)n'+1}^{n'm-1} P'_i \times P'_{ik} \right) + \sum_{f=1}^{F-1} P_f \times P_{fk} \quad (5)$$

$P'_d \geq P_d$, 即在数据分组总数不变且 $n \leq L$ 的情况下, 数据成功传输的概率会随着簇内节点数量增加而增加。

当 $n \geq L$ 时, T_1 为 Spray 阶段, L 为副本的数量, 则

$$P'_d = \sum_{\Delta t=1}^{T_1} \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left(\sum_{i=(m-1)n+1}^{nm-1} P_i \times P_{ik} \right)$$

$$+ \sum_{\Delta t=1}^{livebime} \left(\sum_{f=1}^F P_f \times P_{fk} \right) + \sum_{\Delta t=T_1+1}^{livebime} \left(\sum_{i=1}^L P_i \times P_{ik} \right) \quad (6)$$

当不同簇内的节点进行数据传输时, 在 BSW 算法中, 如果在 Spray 阶段簇节点没有遇到 Ferry 节点, 在 Wait 阶段, 采用 Direct Delivery 方式传输给目的节点, 会导致这些消息永远不能到达目的节点, 影响传输成功率. CBSW 路由算法解决了这些问题, 数据传输成功率不会随着节点的增加而减少。

6 性能评价

6.1 实验平台及评价指标

ONE (Opportunistic Networking Environment)^[26] 仿真系统是 SINDTN 和 CATDTN 工程项目开发的, 它是一个基于离散事件引擎, 通过使用不同的路由协议来模拟机会网络中消息的收发, 并生成多种报告。

为定量对比分析机会网络各路由算法的性能, 用传输成功率、传输延迟和路由开销^[27] 作为评价路由算法的度量依据。

① 传输成功率

传输成功率 (Delivery Ratio) 是在一定时间内成功到达目的节点数据分组总数和源节点发出的需传输数据分组总数之比, 该度量值刻划了路由算法正确转发数据分组到目的节点的能力。

$$\text{传输成功率} = \frac{\text{成功到达目的节点数据分组总数}}{\text{源节点发出的需传输数据分组总数}} \quad (7)$$

② 传输延迟

传输延迟 (Delivery Delay) 是数据分组从源节点到达目的节点所需要的时间, 通常采用平均传输延迟来评价。尽管机会网络允许较大的延迟, 但传输延迟小意味着路由算法传输能力强、传输效率高, 同时也意味着数据分组在传输过程中占用较少的网络资源。平均消息传输延迟可用公式(8)计算, 其中 N 表示成功传输的消息总数, TR_i 表示消息 i 成功到达目的节点的时间, TS_i 表示消息 i 的发送时间。

$$\text{平均传输时延} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (TR_i - TS_i) \right) \quad (8)$$

③ 路由开销

路由开销 (Overhead) 是指在一定时间内节点转发数据分组的总数, 即源节点产生的数据分组总数和所有节点转发数据分组总数之比。路由开销高, 意味着节点大量地转发数据分组, 这会使网络中充斥着大量的数据分组副本, 增加网络中数据分组发生碰撞的概率, 也会大量地消耗节点能量。

路由开销 =

$$\frac{\text{网络中传输的数据分组数} - \text{成功送达到目的节点的数据分组数}}{\text{成功送达到目的节点的数据分组数}} \quad (9)$$

6.2 仿真场景设计

仿真界面如图 9 所示, Ferry 节点的运动轨迹如图 10 所示, 仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真场景设置

参数	值
仿真时间	43ks (近似 12 小时)
每个簇内节点个数	3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50 个
Ferry 节点个数	1 个
接口传输速率	250k
接口传输范围	10m
簇内节点移动速度	0.5 ~ 1.5m/s
Ferry 节点移动速度	3 ~ 5m/s
簇内节点缓存大小	5M
Ferry 节点缓存大小	50M
簇内节点停留时间	0 ~ 120s
Ferry 节点停留时间	10 ~ 30s
簇内节点的移动模型	ClusterMovement
Ferry 节点的移动模型	MapRouteMovement

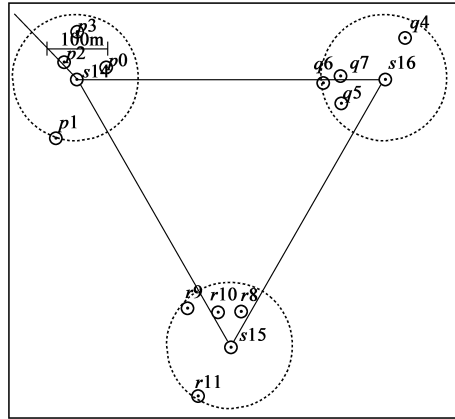


图9 ONE实验仿真界面

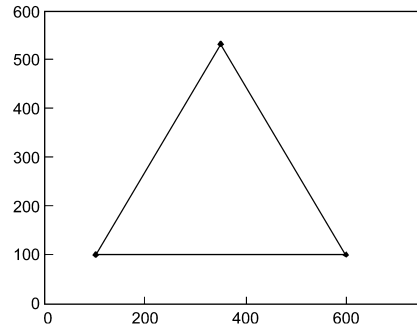


图10 Ferry节点的运动轨迹

6.3 实验结果及分析

6.3.1 簇内不同节点密度下路由算法的表现

在表 1 中, 以不同的簇内节点个数进行仿真. 簇节点与 Ferry 节点采用的路由及仿真结果对应如表 2 所示, 仿真实验结果如图 11 所示:

表 2 簇节点与 Ferry 节点采用路由与仿真结果对应表

簇节点采用路由	Ferry 节点采用路由	仿真结果表示
Epidemic	Epidemic	Epidemic
BSW	Epidemic	BSW&E
BSW	BSW	BSW

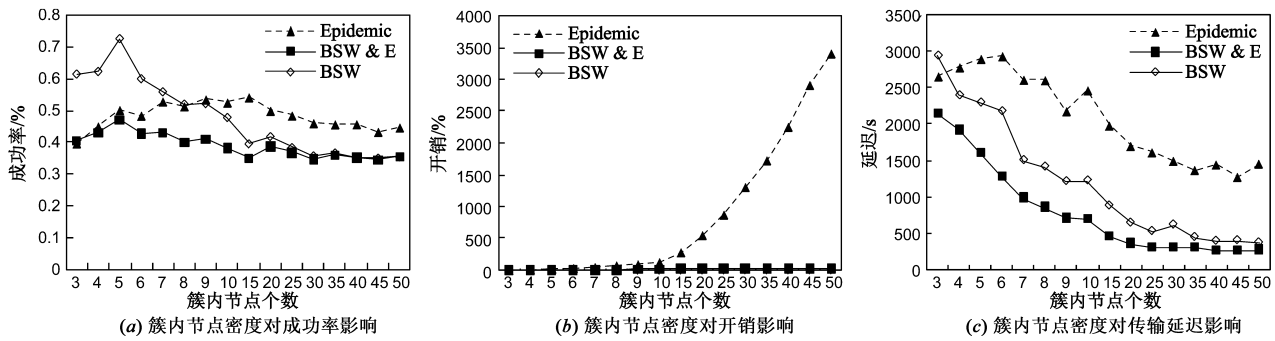


图11

由图 11(a) 可知, Epidemic、BSW&E 传输成功率基本与簇内节点密度无关, BSW 的传输成功率随着簇内节点个数的增加而下降, 当簇内节点较少时, 其传输成功率高于其它两种路由算法, 当簇内节点个数较多时, 其传输成功率与 BSW&E 算法相差较小, 但不及 Epidemic 算法. 由图 11(b) 可知, 当簇内节点密度达到一定程度, Epidemic 的路由开销随其增加近似呈指数增长,

其它两种算法的路由开销基本与簇内节点密度无关, 且两者的路由开销较小. 由图 11(c) 可知, Epidemic 传输延迟较大, BSW&E 次之, BSW 传输延迟最小. 随着簇内节点个数增加, BSW&E 与 BSW 差距变小.

在上实验的基础上, 采用 BSW 路由算法, 簇节点采用 CMMT 移动模型, 以不同的节点数再次进行仿真, 实验结果用 CMMT-BSW 表示, 簇节点采用 CM 移动模型

的实验结果用 BSW 表示. 仿真实验结果如图 12 所示:

由图 12(a)可知,当簇内节点个数较小时,CMMT-BSW 传输成功率比 BSW 有所增加,但随着节点的增加,增加的幅度变小. 原因分析:在增加簇节点与 Ferry 节点相遇机会的同时,促使消息在 Spray 阶段快速扩散,导致 Spray 阶段的时间变短. 倘若在 Spray 阶段簇节点没有遇到 Ferry 节点,进入 Wait 阶段后,用 Direct Delivery 方式传输给目的节点,由于移动模型的约束,携带消息的节点不可能遇到目的节点并传输给目的节点,这样会导致消息传输失败. 由图 12(b)可知,当簇内节点个数较小时,CMMT-BSW 开销比 BSW 小,但随着节点的增加,两者相差较小. 由图 12(c)可知,在传输延迟上,CMMT-BSW 比 BSW 减少,在簇内节点个数少时,两者相差较大,且随着簇内节点个数的增加而变小.

下面的实验,簇节点采用 CMMT 移动模型,并用 CBSW 和 BSW 路由算法进行仿真. 仿真实验结果如图 13 所示:

由图 13(a)可知,CBSW 路由算法与 BSW 路由算法相比,在传输成功率上有明显的增加,且 CBSW 路由算法基本与簇内节点密度无关. 由图 13(b)可知,CBSW 比 BSW 在传输开销上有所减少,且 CBSW 路由算法在簇内节点个数较多时,不会随着簇内节点个数的增加而增加. 由图 13(c)可知,在节点数量少时,CBSW 传输延迟比 BSW 传输延迟有所减少,当簇内节点数量较多时,CBSW 传输延迟比 BSW 传输延迟大.

6.3.2 不同簇内节点速度下路由算法的表现

在表 1 中,采用 CMMT 移动模型,并用 CBSW 和 BSW 路由算法进行仿真,在本实验中簇内节点个数为 6,以不同的速度进行仿真,得到如图 14 所示:

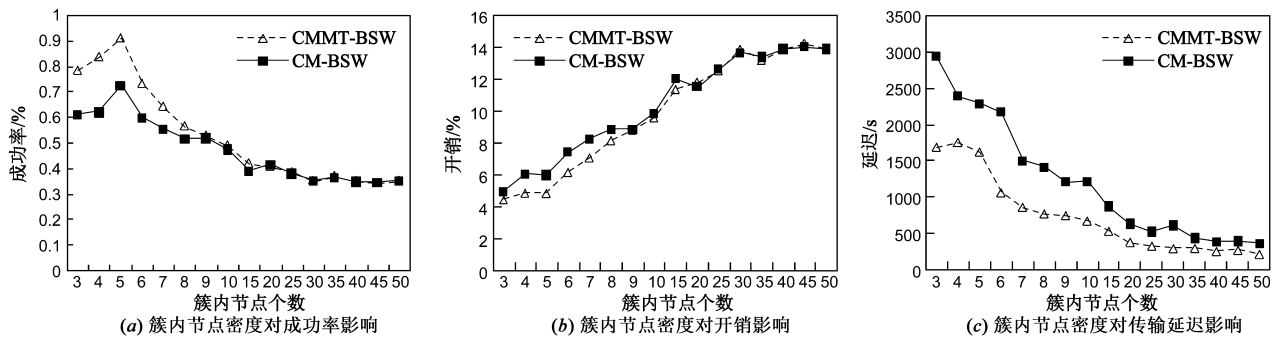


图 12

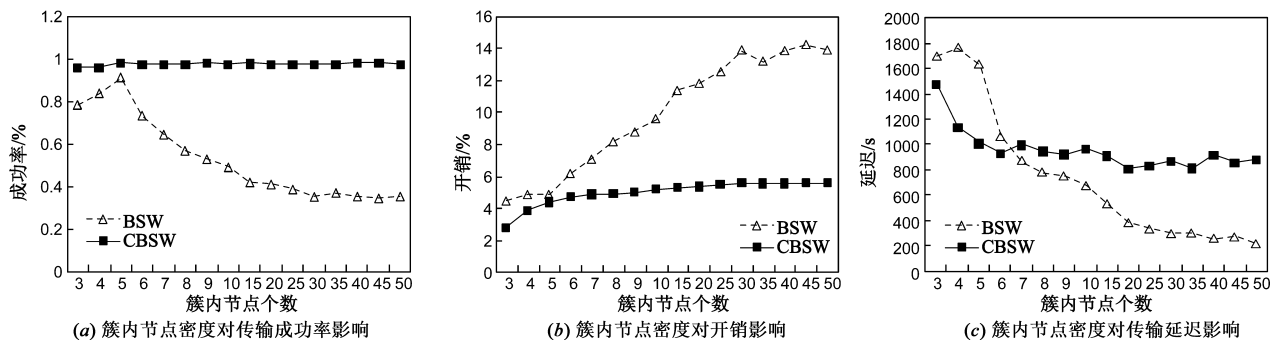


图 13

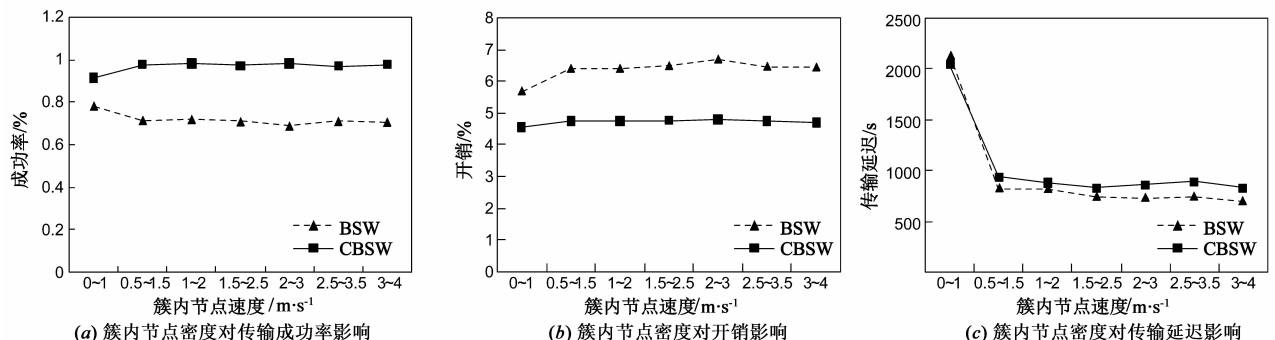
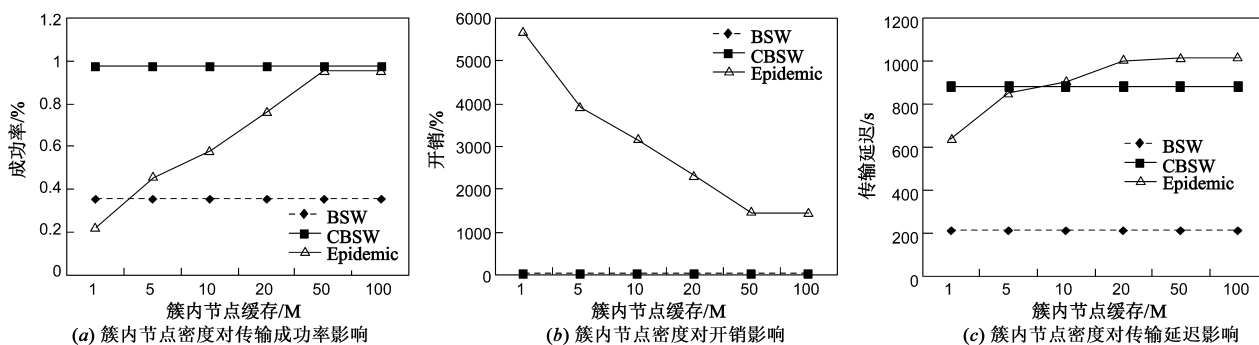


图 14

由图 14(a)可知,传输成功率高: CBSW > BSW 在簇内节点速度为 0 ~ 1m/s 时, BSW 路由算法的传输成功率较高, 而 CBSW 传输成功率较低, 当簇内节点速度大于 0 ~ 1m/s, CBSW 路由算法与 BSW 路由算法的传输成功率基本与簇内节点速度大小无关. 由图 14(b)可知, BSW 在速度为 0 ~ 1m/s 时, 传输开销较小, 当簇内节点速度大于 0 ~ 1m/s 时, BSW 路和 CBSW 路由算法的开销基本与簇内节点速度大小无关. 由图 14(c)可



知,在簇内节点速度为 0 ~ 1m/s 时, CBSW 与 BSW 传输延迟都较大, 当簇内节点速度大于 0 ~ 1m/s 时, 它们的传输延迟基本与簇内节点速度大小无关.

6.3.3 不同簇内节点缓存下路由算法的表现

在表 1 中, 同样地, 采用 CMMT 移动模型, 并用 Epidemic, CBSW 和 BSW 路由算法进行仿真, 在本实验中簇内节点个数为 50, 以不同的缓存进行仿真, 得到如图 15 所示:

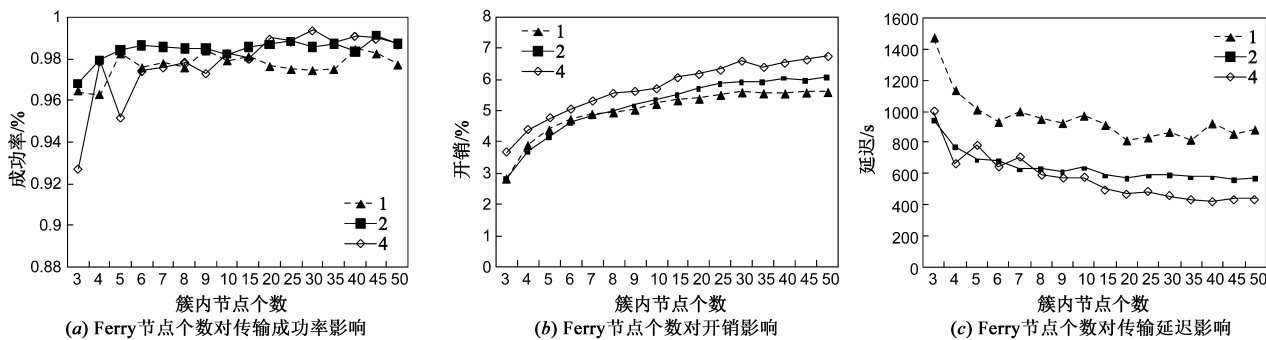
由图 15(a)可知, CBSW 与 BSW 路由算法的传输成功率基本与簇内节点缓存大小无关. Epidemic 路由算法的传输成功率随着簇内节点缓存的增加而增加. 由此可见, CBSW 路由算法的成功率较高, 占用缓存较小. 由图 15(b)可知, CBSW 与 BSW 路由算法的路由开销基本与簇内节点缓存大小无关. Epidemic 路由算法的传输成功率随着簇内节点缓存的增加而减少. 与 Epidemic 相比, CBSW 与 BSW 路由算法的路由开销较小. 由图 15(c)可知, CBSW 路由算法与 BSW 路由算法的传输延迟基本与簇内节点缓存大小无关. Epidemic 路由算法的传输成功率随着簇内节点缓存的增加而

增加.

6.3.4 不同 Ferry 节点密度下路由算法的表现

本实验采用多个 Ferry 节点按照相同路径进行运动, Ferry 节点个数分别取 1, 2, 4, 用 CBSW 算法进行仿真. 仿真结果如图 16 所示:

由图 16(a)可知, 当簇内节点个数较多时, 随着 Ferry 节点个数的增加, 传输成功率有所增加; 图 16(b)可知, 随着 Ferry 节点个数的增加, 传输开销有所增加; 图 16(c)可知, 传输延迟随着 Ferry 节点个数的增加也是有所减少.



7 结论

在本文中, 一方面通过设置阈值经过簇中心的方式, 增加簇节点与 Ferry 节点的相遇概率, 设计了 CMMT 移动模型. 另一方面, 由于相遇概率的增加, 使缓存中的消息增加和消息扩散速度增加, 为减少节点缓存中的消

息的数量, 删除了用不到的消息, 并解决了在 Spray 阶段簇节点没有遇到 Ferry 节点, 引起传输成功率下降的问题, 设计了 CBSW 路由算法. 仿真实验表明, CBSW 算法能够增加传输成功率, 且其传输成功率基本与簇内节点密度无关, 该算法减少路由开销, 并且在簇内节点个数较小时, 减少传输延迟.

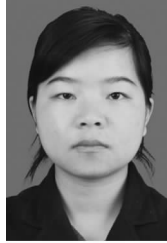
本文中采用的移动模型具有严格的条件约束,这与现实情况还存在一定的差距,需进一步完善。多 Ferry 节点路由算法,本文采用的是同一路径的方法,对于不同路径还需进一步深入研究。

参考文献

- [1] CHAINTREAU A, HUI P, CROWCROFT J, et al. Pocket switched networks: real-world mobility and its consequences for opportunistic forwarding [R]. University of Cambridge, Computer Lab, Tech Rep UCAM-CL-TR-617, 2005.
- [2] PELUSI L, PASSARELLA A, CONTIM. Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks [J]. *Communications Magazine, IEEE*, 2006, 44(11): 134 – 141.
- [3] JUANG P, OKI H, WANG Y, et al. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with ZebraNet [A]. *Proceeding of the 10th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems [C]*. New York: ACM, 2002. 96 – 107.
- [4] SMALL T, HAAS Z J. The shared wireless infestation model: a new ad hoc networking paradigm [A]. *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing [C]*. New York: ACM, 2003. 233 – 244.
- [5] HULL B, BYCHKOVSKY V, ZHANG Y, et al. CarTel: a distributed mobile sensor computing system [A]. *The 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor System [C]*. Colorado: ACM, 2006. 125 – 138.
- [6] PENTLAND A, FLETCHER R, HASSON A. DakNet: rethinking connectivity in developing nations [J]. *Computer*, 2004, 37(1): 78 – 83.
- [7] MOREIRA W, FERREIRA R, CIRQUEIRA D, et al. SocialDTN: a DTN implementation for digital and social inclusion [A]. *ACM MobiCom Workshop on Lowest Cost Denominator Networking for Universal Access [C]*. Miami: ACM, 2013. 25 – 28.
- [8] MOREIRA W, MENDES P, FERREIRA R, et al. Opportunistic routing based on users daily life routine [A]. *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2012 IEEE International Symposium [C]*. Baltimore: IEEE, 2012. 1 – 6.
- [9] NAUMOV V, GROSS T R. Connectivity-aware routing (CAR) in vehicular ad-hoc networks [A]. *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications [C]*. Anchorage: IEEE, 2007. 1919 – 1927.
- [10] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks, CS2200006 [R]. Durham, NC: Duke University, 2000.
- [11] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, PAGHAVENDRA C S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks [A]. *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking [C]*. New York: ACM, 2005. 252 – 259.
- [12] LINDGREN A, DORIA A, SCHENLEN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2003, 7(3): 19 – 20.
- [13] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multiple-copy case [J]. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 2008, 16(1): 77 – 90.
- [14] 熊永平等, 孙利民, 年建伟, 刘燕. 机会网络 [J]. *软件学报*, 2009, 20(1): 124 – 137.
XIONG Yong-Ping, SUN Li-Min, NIU Jian-Wei, LIU Yan. Opportunistic Networks [J]. *Journal of Software*, 2009, 20(1): 124 – 137. (in Chinese)
- [15] BETTSTETTER C, RESTA G, SANETI P. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks [J]. *Mobile Computing, IEEE transactions on*, 2003, 2(3): 257 – 269
- [16] HONG X, GERLA M, PEI G, et al. A group mobility model for ad hoc wireless networks [A]. *Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems [C]*. New York: ACM, 1999. 53 – 60
- [17] ROYER E M, MELLIAR-SMITH P M, MOSER L E. An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks [A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications [C]*. USA: IEEE, 2001. 857 – 861.
- [18] EAGLE N, PENTLAND A. Reality mining: sensing complex social systems [J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2006, 10(4): 255 – 268.
- [19] The University California S D. Wireless Topology Discovery Project [Z]. UCSD, 2004.
- [20] DIO I. An Innovative Paradigm for Autonomic Opportunistic Communication [Z]. 2010.
- [21] ZHANG X, KUROSE J, LEVINE B N, et al. Study of a bus-based disruption-tolerant network: mobility modeling and impact on routing [A]. *The 3th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking [C]*. Montreal: MobiCom, 2007. 195 – 206.
- [22] ZHAO W, AMMAR M, and ZEGURA E. Message ferrying proactive routing in highly-partitioned wireless and ad hoc networks [A]. *The 9th IEEE International Work-*

- shop on Future Trends in Distributed Computing Systems (FTDCS) [C]. Puerto:IEEE,2003. 308 – 314.
- [23] ZHAO W, et al. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile Ad Hoc networks [A]. Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 04) [C]. New York:ACM,2004. 187 – 98.
- [24] Zhao W, AMMAR M, ZEGURA E. Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant network [A]. Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '05) [C]. Miami: IEEE, 2005. 1407 – 1418.
- [25] BETTSTETTER C, WAGNER C. The spatial node distribution of the random waypoint mobility model [A]. Proceedings of German Workshop on Mobile Ad Hoc networks (WMAN) [C]. Germany:IEEE,2002. 41 – 58
- [26] KERANEN A. Opportunistic network environment simulator [R]. Special Assignment report, Helsinki University of Technology, Department of Communications and Networking, 2008.
- [27] JONES E, WARD P. Routing strategies for delay-tolerant networks [A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking [C]. New York: ACM,2006. 1577 – 1580.

作者简介



刘春蕊 女,1987 年出生于河南周口,现为苏州大学计算机科学与技术学院硕士研究生,主要研究方向为:群智感知、网络编码以及隐私保护等.

E-mail:20134227012@suda.edu.cn



张书奎 男,1966 年生于内蒙古,博士,教授、博士生导师,主要研究方向为物联网、无线传感器网络、信息安全、移动计算、智能信息处理等.

E-mail:zhangsk@suda.edu.cn