

# 机会型网络研究综述

胡四泉<sup>1</sup> 汪红兵<sup>1</sup> 王俊峰<sup>2</sup>

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)<sup>1</sup> (四川大学计算机学院 成都 610065)<sup>2</sup>

**摘要** 机会型网络是继移动自组网和无线传感器网络之后在无线网络领域中兴起的又一最新研究热点。机会型网络是移动自组网的演化,但机会型网络并不假设消息源和目标节点之间存在完整路径,而是通过节点的移动、相遇(Contact)和转发来实现在不连通的网络环境中通信,这种全新的组网模式引起了研究者极大的兴趣。介绍了机会型网络的概念、特点和典型应用,总结并详细阐述了机会型网络的路由机制、机会型网络的移动模型等主要研究热点问题,并对机会型网络的其他方向的研究作了简要介绍,对研究前景进行了展望。

**关键词** 机会型网络,路由算法,移动模型

**中图分类号** TP301 **文献标识码** A

## Survey on Opportunistic Networks

HU Si-quan<sup>1</sup> WANG Hong-bing<sup>1</sup> WANG Jun-feng<sup>2</sup>

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)<sup>1</sup>

(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Opportunistic networks is one of the newest hot research spots in wireless networks after mobile ad hoc networks(MANET) and wireless sensor networks(WSN). As an exciting evolution of the legacy MANET paradigm, opportunistic networks have released the basic assumption of complete paths between data senders and receivers. With the support from devices movement and message forwarding, opportunistic networks enable users' communication in disconnected environments, in which island of connected devices appears, disappears and reconfigures dynamically. In this paper, the concept, characteristics and typical applications of opportunistic networks were introduced. The hot spots including routing strategy and mobility models were discussed and presented in detail. Other directions and foreground were also briefly presented.

**Keywords** Opportunistic networks, Routing, Mobility model

## 1 引言

机会型网络(Opportunistic Networks)是移动自组网(MANET)令人激动的演化之一,是在 MANET 和无线传感器网络(WSN)之后在无线网络领域中兴起的又一最新研究热点。起源于战场上的士兵数字化系统组网的 MANET,经过多年的发展,目前已经深入应用到民用领域,各种各样的新应用层出不穷,如手持设备交换网<sup>[1]</sup>、传感器网络<sup>[2]</sup>、用于高速公路上车辆之间以及车辆与高速路固定设备自组交换信息的信息智能高速公路<sup>[3]</sup>等等。不断涌现的新应用改变了传统 MANET 的组网模式,提出了新的研究问题。

在野生动物跟踪研究<sup>[4,5]</sup>中,需要对在大面积野外区域内的动物活动收集数据。为了减少对环境的干预,不能架设有线网络。考虑到研究区域的巨大和研究对象的分布不均匀,传统的 Mesh 结构的无线网络也不适合。机会型网络非常适合这种应用,可以在每个动物身上装佩一个无线设备,收

集所需信息,而在两个动物相遇的时候就进行数据交换。这样,每个设备上的数据包含了自身曾经相遇过的动物的数据。这些数据可以通过运动节点传输给基站,最终提供给使用者。

又如,在山区、沙漠等人烟稀少的地区,出于成本问题 and 经济效益的考虑,互联网或者通信网络服务提供商不愿意部署传统网络。在这些地方的居民仍然可以利用机会型网络<sup>[6,7]</sup>使用部分实时要求不高的应用,如电子邮件和部分电子商务。用户的 WIFI 终端只要有机会就互换消息,并与驶经附近的车辆上的 WIFI 节点交换数据,可以将消息路由到部署有传统网络的较发达地区,实现间断的互联网连接。

在这类应用中,节点间不存在一个完全连通的路径,网络时断时连,节点需要转发的数据存储在本地,等待与其他节点运动到邻近的机会来交换数据,达到网络通讯的目的。这种全新的通讯网络,即为机会型网络,它与传统 MANET 有很大不同。在传统的 MANET 中,一般假设整个网络是连通的,节点通过中间节点的转发进行通信。这样,传统的 MA-

到稿日期:2008-11-11 返修日期:2009-01-18 本文受国家 973 计划(2007CB310801),国家 863 计划(2006AA701417)资助。

胡四泉(1973-),男,讲师,主要研究领域为无线传感器网络、嵌入式操作系统、并行和分布式系统, E-mail: husiquan@gmail.com;汪红兵(1978-),男,讲师,主要研究领域为无线传感器网络和分布式计算;王俊峰(1976-),男,教授,主要研究领域为无线传感器网络、空间信息网络、航空电信网络。

NET 原有的路由协议在机会型网络中已经不适用,要求提出新的通讯协议和设计方法。这种时断时连的机会型网络引起了研究者巨大的兴趣<sup>[8-11]</sup>,应用范围也越来越广:传感器网络<sup>[2,4,5]</sup>、手持设备交换网(Pocket Switched Net)<sup>[1]</sup>、水下网络(Underwater nets)<sup>[12,13]</sup>、运输网络<sup>[3]</sup>以及 People nets<sup>[14,15]</sup>等等。研究者从不同方面出发提出了一些新颖的方法,通过利用可用的连接或者资源尽可能实现数据传输。

## 2 机会型网络的概念、特点和体系结构

机会型网络的许多概念来源于容迟网络(Delay Tolerant Network, DTN)。DTN 最早是在 2003 年由 Kevin Fall<sup>[16]</sup>提出的一种新型的网络体系结构。这种网络作为传统互联网的扩展为各种特殊网络(如深空网络、传感器网络、陆地移动网络等)提供互操作性。DTN 一般由多个传统 Internet 类型的子网组成,不过子网之间的连接不是一直存在的,它们之间的连接有时是按照时间进行调度的,有时完全是随机的。DTN 的特点是网络时断时连、网络延迟通常比较大、网络拓扑经常发生变化。在某些 DTN 中,如深空网络,延迟比较大是因为节点间距离遥远。网络时断时连是因为节点运动超出通讯范围、环境变化、其他运动物体的干扰、射频关闭或者节点失效等。一般的 DTN 不一定是无线网络,也不一定是自组网络,因此机会型网络可以划分为 DTN 和 MANET 的子类。机会型网络与 DTN 要面对的主要问题是类似的,也即网络时断时连,它们都是采用存储转发的模式进行路由。因此,本文的机会型网络特指那些稀疏部署的 DTN,其中经常由于射频关闭和节点运动而发生网络断连。这包括了在文献中出现的移动传感器网络<sup>[17]</sup>、野生动物跟踪网络<sup>[4]</sup>、手持设备交换网<sup>[1]</sup>、交通网络<sup>[18]</sup>。

目前对于机会型网络还没有统一的定义,但通过分析机会型网络的特点以及它与 DTN 和 MANET 的关系,我们给出如下描述性定义。

机会型网络是一种特殊的移动自组网络,其中的移动节点通讯距离有限,而在整个部署区域中节点是稀疏分布的(在局部可以是密集的),网络中由于节点运动而经常发生网络断连。

与 MANET 一样,机会型网络中的节点是通讯距离有限的移动节点,节点与节点之间的直接通讯只有在彼此靠近、距离小于通讯距离时才能发生,如图 1 所示。在机会型网络中,典型节点是移动设备,如个人数字助理(PDA)、移动电话、无线传感器网络的移动节点(motes),也可以包含辅助的固定设施,如基站、无线接入点(AP)或者静态部署的无线传感节点。

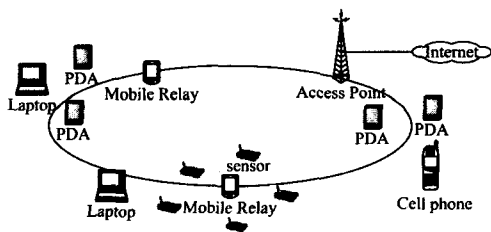


图 1 机会型网络体系结构(包含静止节点、移动中继节点、外网接入点)

传统的 MANET 的研究对象是 Mesh 网,其基本假设是消息源和目标节点之间存在至少一条完整的连通路程。如果

消息发送节点和接收节点是不连通的,那么某一时刻消息包会被抛弃。与传统的 MANET 不同的是,在机会型网络中,不存在“消息源和目标节点之间存在至少一条完整的连通路程”这一假设,甚至在任何时间点都不存在这样一条路径。但这并不意味着通讯无法完成。事实上,通过节点的运动,当两个节点“相遇”(Contact)即两者运动到彼此可以直接通讯的射频距离以内时,数据交换仍然可以发生,即转发(Forwarding)。通过节点转发,消息可以到达目的节点,即完成了一次成功的传输。机会型网络类似于人群中通过“口耳相传”进行消息传递的网络。在机会型网络中,移动节点互相依赖完成通信任务,即使连接它们的路由可能从来就不存在。与传统的移动自组网络路由协议不同的是,在机会型网络中节点并不拥有网络拓扑的任何知识。路由是动态建立的,消息在发送节点和目的节点之间路由,任何可能的节点都可能有机会选择为下一跳,只要它可能将消息路由到离目的节点更近。尽管从整体上来看,机会型网络是稀疏部署的,但在局部可以是密集的,从而在局部可以形成传统的连通的自组网,成为连通岛(islands)或者云(clouds)。由于节点运动经常发生断连,这种连通岛在不断动态地形成、变化或者消失。这种结构是急剧动态演化的,移动设备之间的“相遇”也是不断变化的。按照这种观点,传统的互联网连接恰恰是一种特殊的“机会连接”情形。

总体来说,在机会型网络中的通信是机会主义的,消息发送端与接收端的通信链路有可能从来就不存在,这导致整个网络不是完全连通的。同时,由于节点运动,网络结构不断变化,节点之间的连接、断连和重连在网络中普遍存在。这种苛刻的网络环境使得传统的路由算法和设计方法不适用于机会型网络,很多方面还是未知的,因而引起了研究者的巨大兴趣。特别是随着众多机会型网络应用的出现,客观上越来越需要提出适用于机会型网络的有效数据通信策略,这使得机会型网络成为非常有挑战性和有前途的新兴研究领域。

## 3 机会型网络的研究热点

由于机会型网络本身的特性,机会型网络中的路由策略理论上不可以直接采用传统的路由方法,而机会型网络中实现数据的有效转发是最关键的问题,因而使得机会型网络的路由成为机会型网络研究的第一热点。另外,目前对于机会型网络的研究刚刚起步,缺乏完整的和统一的理论支撑。前所未有的网络组网模式使得对该网络的性质特别是移动模型成为另一个研究热点。

### 3.1 路由和转发

传统的 MANET 一般假设网络节点有很好的连通性。然而,在机会型网络中,网络大部分时间可能划分为不连通多个子网,较大的传输延迟也很常见,消息的传递是利用节点的移动性达到的。移动节点携带消息,它不是马上按照某个路径传递消息,而是等待连接机会将消息传输给下一个中继节点或者目的节点。传统的 MANET 路由算法在这里就会失效,因为启发式算法不收敛,而反应式算法又找不到从消息源到消息目的地的连通路程。

机会型网络中的节点时断时连,没有完全的连通,这种苛刻的网络环境使得保证高性能数据转发工作成为首先需要解决的问题,因此其中大量的研究工作针对其路由和转发算法。

按照是否利用网络状况、规律、基础设施等知识来增进路由效率,可以将机会型网络路由算法分为两大类:不基于知识的路由(non-knowledge based routing)和基于知识的路由(knowledge based routing),如图2所示。不基于知识的路由在设计消息传递策略时不包含对网络知识的提取和对传递的预测。基于知识的路由算法需要提取网络某些方面的特征对路由进行优化。

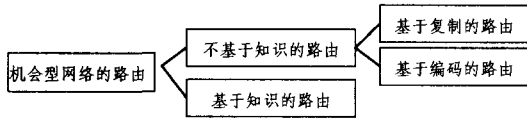


图2 机会型网络路由协议的分类

### 3.1.1 不基于知识的路由

不基于知识的路由可以分为基于复制的路由(Replication based routing)和基于编码的路由(Coding based Routing)以及两者的混合。

#### 3.1.1.1 基于复制的路由

将相同的数据的多个副本复制到网络中,通过节点的运动和节点相遇时的数据复制实现数据到目的节点的传输。基于复制的路由包括直接递交、两跳中继、扩散路由等。

直接递交是最简单的路由协议<sup>[19]</sup>,仅在消息源节点与消息目的节点相遇时才发生消息传输。很显然,在机会型网络中,源节点与目的节点相遇的概率可能很低,甚至为零。当然,该协议的资源消耗极小,每个消息只需要一次传输。

两跳中继路由算法<sup>[20]</sup>是指当一个节点要发送消息时,给最初相遇的 $n$ 个节点(中继)各复制一份消息,这 $n+1$ 个节点保留这份消息直到与目的节点相遇才把消息发送给目的节点。消息中继路径最长2跳,所以称为“两跳”协议。很显然,该协议比直接递交协议消耗更多的带宽和存储空间,但是更有可能将消息传输到目的节点,能有效增加移动自组网的容量。

扩散路由协议<sup>[21]</sup>中,消息以洪泛方式复制传播。消息源节点给相遇的每一个节点发送一个消息副本,收到该消息的节点进一步给每个相遇节点发送消息副本,最后该消息的副本到达目的节点。该协议很简单,但可能极耗资源,过度的通讯开销可能极快地耗尽电池能量。另外,由于每个节点都要为每个消息保存副本,对存储空间的使用也是极为低效的。

#### 3.1.1.2 基于编码的路由

基于编码的路由协议的设计理念是在发送前将要发送的消息进行编码,变化为另一种形式——多个数据块,并将其他信息嵌入到被编码后的数据块中,使得接收者可以从一定数目的编码块中重构原始消息。网络编码路由<sup>[22]</sup>和擦除编码路由<sup>[23]</sup>都属于这一类。编码的目的是减少洪泛的发生。

网络编码<sup>[22]</sup>是在编码块中嵌入解码方法。举例如下,如图3所示,A,B,C是一个小型网络中仅有的3个节点,令节点A产生信息 $a$ ,节点C产生消息 $c$ ,假设产生的消息需要在所有的节点上都传输到。因此,节点A和C发送他们的消息给B,那么节点B不是为 $a$ 和 $c$ 分别发送两份不同的消息,而是只广播一份消息 $a \oplus c$ 。一旦节点A或者C收到 $a \oplus c$ ,它们都可以推断出缺少的消息,即A推导出 $c$ ,而C推导出 $a$ 。基于网络编码的路由性能优于“洪泛”模式,因为它能够用少量的数据包传输同样的信息。

擦除编码路由算法则是在编码块中嵌入冗余信息。源节点将消息复制 $m$ 份,然后采用一种编码算法将它们编码为一个长消息,再把长消息分割为长度相等的 $k$ 个块,然后给最早相遇的 $k$ 个节点分别传输其中一块。图4是 $k=4$ 的一个例子。如果目的节点接收到其中的 $m$ 个块,就可以还原出原始消息( $m < k$ )。在节点移动服从均匀分布的环境中,提高了传输成功概率,因为当 $m < k$ 时目的节点与 $m$ 个中继节点相遇的概率比与 $k$ 个中继节点“相遇”的概率要高。文献[24]进一步优化用来动态改变编码强度。

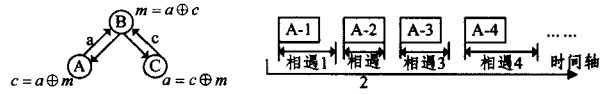


图3 网络编码示例 图4 擦除编码路由示例(经擦除编码后的编码块A平均分配给4个中继节点)

不基于知识的路由协议还包含了一些混合协议,既使用了基于编码的方法又使用了基于复制的方法,来提高单一方法的性能。例如文献[25]中的混合擦除编码路由(H-EC)的优点既具有基于擦除编码协议的稳定性,同时保持了基于复制的协议的性能优点。

### 3.1.2 基于知识的路由

基于知识的路由算法中,根据路由策略的制定提取网络信息,根据网络条件预测和选择中继节点,从而在最佳路径上转发消息。具体来说,不同类型的网络知识导致不同类型的路由算法。一个协议可能使用不同类型的网络参数中的一种或者多种。典型的网络参数有连接状态、传输成功率、节点相遇频率、控制节点运动规律。甚至基于网络踪迹抽象出来的网络模型也可以作为网络知识来辅助路由决策。

文献[26]是在基于复制的协议的基础上,为了提高送达率,提出了对消息传输和消息丢弃的优先级调度策略,这些优先级是根据历史数据、消息确认、新消息的早起步以及相遇的记录来确定的。

文献[27]提出基于消息传输倾向、消息最大转发次数和消息有效期以及传输成功后的抑制多余消息转发概率来较小地延迟开销,大幅度降低资源消耗。

PRoPHET<sup>[28]</sup>是扩散路由算法的扩展,基于相遇和变迁的历史来估计每个节点相对于任意其他节点的传输成功率。当节点 $i$ 与节点 $j$ 相遇,更新从 $i$ 到 $j$ 的传输成功率

$$p'_{ij} = (1 - p_{ij}) p_0 + p_{ij}$$

其中, $p_0$ 是为给定网络设定的初始概率。如果节点 $i$ 在某一段时间内与节点 $j$ 没有相遇过,则更新为

$$p'_{ij} = a^k p_{ij}$$

其中, $a$ 是消解指数( $a < 1$ ), $k$ 是自上次更新以来的时间。PRoPHET协议中,节点互相交换彼此的索引信息和传输成功率。当节点 $i$ 得到节点 $j$ 的传输成功率,节点 $i$ 可以计算出从节点 $j$ 到节点 $z$ 的变迁率

$$p'_{iz} = p_{iz} + (1 - p_{iz}) p_{ij} p_{iz} b$$

其中, $b$ 是另一个参数——变迁因子。

基于历史数据和传输上下文条件,文献[29]提出了比PRoPHET和扩散路由更优化的路由算法。仿真实验表明,这种基于对历史数据分析的辅助路由减少了资源消耗,降低了传输失败率,保持了消息延迟性能。

分级扩散 PREP(PRIoritized EPidemic)<sup>[30]</sup> 基于递送到目的地的开销、源和失效时间将 bundles 划分为多个级别。这种开销按照每个链路的“平均可用性”信息计算,并且通过扩散的方式在网络中分发。PREP 维护复制密度的梯度参数,该参数在节点离目的地越远其值越小。仿真结果表明,PREP 的性能高出 AODV 算法 4 倍,高出扩散路由算法 1.4 倍。并且在部署密度减小和存储减少的条件下,超出的性能更多,特别适用于连接特别松散的移动网络,其中不存在调度信息或者规律性的模式。

文献[31]在选择路径时使用 Kalman 滤波,根据历史数据预测选出最有可能到达目的地的节点,而不是给所有邻居复制消息。仿真表明,在缓存较小时,CAR 的传输成功率高于扩散路由。

文献[32]使用根据链路状态来估计源到目的节点的路径的开销,能够通信的节点之间共享它们的链路状态信息,而在路由选择上总是选择具有最小链路开销的节点来进行消息转发。其中有两种开销计算方式可供选择:一是平均相遇时间间隔,一是指数衰减的相遇时间间隔。节点  $i$  和节点  $j$  之间的指数衰减的相遇时间间隔,即开销  $w_{ij}$  由以下公式计算

$$w'_{ij} = aw_{ij} + (1-a)I$$

其中,  $I$  是新的相遇时间间隔,  $a$  是衰减因子。

文献[33-36]都是利用节点运动规律来提高路由性能。其中文献[33]考虑了不同节点组之间利用节点移动性进行数据传递的可能性。文献[34-36]则通过考察网络中节点的运动模型,就可以利用这些模型中的规律性知识为节点选择具有较高传输成功率的中继节点。文献[37]通过使用控制节点的移动性来改进延迟等系统性能。

### 3.2 移动模型(Mobility models for opportunistic networks)- 机会型网络性质研究

深刻理解机会型网络的基本性质,是正确、有效地设计机会型网络路由策略和广泛应用的关键。理解机会型网络的移动模型,不仅可以将实验结果与分析模型对照起来,而且还可以在仿真研究中选用合适的移动模型。

在机会型网络中,消息传递是通过节点运动和消息转发来实现的。静止状态下,由于网络可能不连通,数据成功传输有时是不可能的,因此节点运动对于机会型网络至关重要。理解机会型网络的移动模型,对于机会型网络路由算法的设计和分析具有重要意义。研究表明,传统网络的随机路点(way-point)运动模型<sup>[38]</sup>并不适合机会型网络性质的描述和性能分析,而当前还缺乏对机会型网络适用的一般模型。探索适用于机会型网络的运动模型并用于优化机会型网络的设计,是目前机会型网络的另一大研究热点。一方面,部署了大量的实验网络,采集了很多网络踪迹<sup>[39,40]</sup>并用于公开研究使用。另一方面,从采集的网络踪迹数据提炼移动模型或者其他有益的性质的工作,是很有价值的。

当前无线网络研究者大多基于解析模型或者仿真模型。由于无线信号在实际空间中传播的复杂性以及缺乏对无线应用及用户行为的理解,这些模型往往具有极大的局限性,因此无线网络和移动计算的研究者很需要实际数据。这些数据有助于了解在真实环境中,真实用户、应用和设备是如何使用网络的,移动用户在实际环境中的移动有些什么样的规律。这些数据有助于研究者分析和理解实际问题,评估各种解决方

案,考察新的应用和服务。目前很多研究者在搜集移动网络中的数据,形成可供研究者共享的踪迹数据集,UCSD 踪迹<sup>[39]</sup>和 Dartmouth 踪迹<sup>[40]</sup>就是最著名的两个公开的数据集。

加州大学圣迭戈分校的 Wireless Topology Discovery (WTD)项目中,在 11 周里对校园中的研究参与者使用的大约 300 个手持无线 PDA 搜集数据,用来研究用户移动的模式和相应的路由协议。这些数据对学术界是公开的。另外,通过 CRAWAD 项目的支持,Dartmouth 学院的校园无线网络配备了大量的数据采集机制,用来采集无线用户的移动轨迹和行为模式,同时开发了许多有用的工具提取、过滤和分析这些踪迹数据。这些数据提供给研究界,在学术界和工业界得到广泛使用。这些数据十分丰富,数据集按照元数据描述进行结构化组织。用户既可以查询移动踪迹,也可以查询通讯踪迹。网络可以是蓝牙网络、MANET 和 DTN 网络。

不论是使用公开的踪迹数据集,还是采用研究者自己采集的私有踪迹数据集,目的都是为了理解网络特点和用户移动模式,为设计和优化算法提供支持。例如,文献[39]对 PDA 用户的运动和访问模式进行了特征提取,并且与便携机网络的情况进行了比较。其中,运动模型考虑了两个指标,用户检测和关联的无线 AP 数目的分布密度;与某无线 AP 关联的用户数目的分布密度。前者体现了用户在网络部署区域的漫游广度,后者反映了漫游对特定 AP 的访问集中度。研究发现,PDA 用户的漫游广度是便携机用户<sup>[40]</sup>的 2 倍以上,这一有趣的发现对于具体网络设计很有启发意义。文献[39]还在踪迹数据集的基础上提出了 2 个拓扑模型,用于仿真评估自组路由算法。

机会型网络中,运动节点相遇对于消息传递有着特殊意义,目前很多研究工作致力于揭示在不同网络环境中的移动设备相遇时间间隔(inter-contact time)的规律。相遇时间间隔是指同一对移动设备在两次相遇之间的时间间隔。通过对基于人群移动的 4 组实验数据进行分析,文献[41,42]表明相遇时间间隔在实验时间区间为中等尺度以下时满足幂率分布,这与许多传统移动模型中广泛使用的指数分布假设是不一致的。该文还表明按照指数分布假设的移动模型设计的转发策略在实际的幂率分布条件下性能很差,尽管使用有限冗余传输可以较好改进。文献[43]也证实了相遇时间间隔分布在特定时间以内服从幂率分布,但此后表现出指数衰减。有趣的是,文献[44]用解析方法表明传统随机路点模型(Random Waypoint)和随机方向模型(Random Direction)在机会型网络中相遇时间间隔近似地服从指数分布,这进一步证实传统的移动模型并不适用于机会型网络。到底应该采用指数分布还是幂率分布的相遇时间间隔,这一争论应该还会持续,甚至在不同的应用中会表现出不同的分布规律,总体来说,运动模型和相应的路由可能必须结合具体网络应用才会产生有价值的结果。传统的性能分析假设和移动模型中的数值验证中相遇时间间隔服从指数分布,对与最新的试验证明相遇实际上是满足幂率分布的,文献[45]试图建立两者之间的联系。该文的研究表明,正如在大部分已有的移动模型中假设的那样,部署空间有限,是相遇时间间隔分布产生指数尾巴的重要因素。另外,该文还证明了,在一个二维散步模型中,简单地去掉有限边界这个条件,就能够得到实际经验结果显示的幂率衰减。

除了相遇时间间隔之外,对机会型网络的其他性质的研

究也很有意义。例如文献[46]使用 UCSD 踪迹和 Dartmouth 踪迹,实例表明机会型网络表现出强烈的自相似性。这种自相似性对于研究机会型网络的设计、评估和部署有一定的指导意义。

从实际部署的机会型网络中提取的数据不仅可以用来产生运动模型,也可以用来直接进行机会型网络中的路由算法的性能评价。例如文献[47]使用 Dartmouth 踪迹数据中的相遇踪迹对 5 种路由协议进行了比较。该文表明,在机会型网络中,扩散型路由的缺点是资源消耗大,直接递送路由的缺点是传输成功率低,而随机路由、PRoPHET 路由和基于链路状态的路由是在两者之间的折衷。

我们相信,研究机会型网络的性质是揭示这种新型网络结构的关键,其中的有些规律可能与传统网络中的假设不一致,这提供了很重要的研究机会。目前国内这方面的研究还比较薄弱,已经发表的文章<sup>[48]</sup>特别少。国内移动计算用户基数特别大,具有其他国家无法比拟的研究优势。如果能抓住这方面的机会,相信会产生一批较好的研究成果,甚至可能产生更多的机会型网络应用。

### 3.3 机会型网络研究的其他重要问题

机会型网络作为一种全新的网络体系结构,其研究目前还在起步阶段,在成熟应用之前还有许多问题值得研究。其中,下面要介绍的机会型网络中的信任和安全问题、机会型无线传感器网络,是比较重要的问题。机会型网络的体系结构和性能建模、针对机会型网络的无线链路设计和优化、机会型网络的中间件和可靠传输、机会型网络的设计和测试工具、机会型网络的新应用等,都是值得研究的新领域,限于篇幅不赘述。

#### 3.3.1 机会型网络中的信任和安全问题

在机会型网络中,节点尝试检测附近的其他节点,决定是否加入网络,是否交换数据。节点间的信任问题<sup>[49]</sup>、数据分发过程中信息的私密性问题和数据完整性<sup>[50]</sup>、路由的安全性以及网络对恶意节点的识别和安全措施<sup>[51]</sup>等等,都是对机会型网络提出的新挑战。

机会型网络是一种新型的计算机网络,意料将来会产生相应的新应用,其中手持设备交换网有可能在将来成为现实。手持设备交换网是指在城市或者社区中的手机用户或者 PDA 用户不通过骨干网络彼此互换数据达到数据分发或者共享的目的,其中数据交换遵循的法则严重依赖于采用的信任模型。手持设备交换网<sup>[41]</sup>中利用连接机会和用户移动性按照扩散方式分发数据,而文献[1]分析了手持设备交换网的结构性法则。

#### 3.3.2 机会型无线传感器网络

传统的无线传感器网络假设节点部署稠密,形成 MESH 结构。但实际的部署中,经常出现稀疏部署的情况。这样的网络由于区域过大或者节点移动造成网络连接是不确定的,如水下无线传感器网络<sup>[12,13]</sup>、野生动物监控网络<sup>[4,5]</sup>和移动无线传感器网络<sup>[2,17]</sup>等等。此时,通过中继节点的移动仍然能够实现延迟比较大的数据收集,从而形成无线传感器网络的一种特殊类型——机会型移动传感器网络。在这样的网络中,传感器收集到的数据不是马上提交给下一跳中继节点,而是存储在本地,等待临近节点射频开机的机会才转发数据。

**结束语** 当前网络计算已经发展到普适计算的时代,其

一般场景是大量的由用户携带移动设备与环境中嵌入的节点之间通过无线方式进行通讯,不需要预先铺设的基础通讯设施。由于现实环境中移动计算用户设备彼此连接的不确定性,机会型网络计算模式更适用于普适计算,将提供更多有趣的应用。普适计算网络的节点间无需完全的路由路径也能完成通信。机会型网络比传统的移动自组网更适合于普适计算网络的实际场景。机会型网络是一种新型网络体系,其研究涌现了不少新方法和新模型,可以预见其具有很好的研究前景。

## 参考文献

- [1] Jing S, James S, et al. Huggle: Seamless Networking for Mobile Applications[C]// Proceedings of the Ninth International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2007). Innsbruck, Austria, 2007
- [2] Wang Y, Wu H. DFT-MSN: The Delay/Fault-Tolerant Mobile Sensor Network for Pervasive Information Gathering. INFOCOM, 2006; 1-12
- [3] Chen ZD, Kung H T, Vlah D. Ad Hoc Relay Wireless Networks over Moving Vehicles on Highways[C]// MobiHoc. 2001
- [4] Juang P, et al. Energy-efficient Computing for Wildlife Tracking: Design Trade-Offs and Early Experiences with ZebraNet [J]. ACM SIGPLAN Notices, 2002, 37: 96-107
- [5] Small T, Haas Z J. The Shared Wireless Infostation Model - A New Ad Hoc Networking Paradigm (or Where There is a Whale, there is a Way)[C]// MobiHoc. 2003
- [6] Pentland A, Fletcher R, Hasson A. DakNet: Rethinking Connectivity in Developing Nations[J]. IEEE Computer, 2004, 37(1): 78-83
- [7] Doria A, Uden M, Pandey D P. Providing Connectivity to the Saami Nomadic Community[C]// Proc. 2nd Int'l. Conf. Open Collaborative Design for Sustainable Innovation (dyd 02). Bangalore, India, 2002
- [8] Biswas S, Morris R. Opportunistic routing in multihop wireless networks[J]. Computer Communication Review, 2004, 34(1): 69-74
- [9] Lindgren A, Doria A, Schelen O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[C]// Proc. 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC 2003). ACM, 2003
- [10] Schtz S, Eggert L, Schmid S, et al. Protocol enhancements for intermittently connected hosts[J]. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 2005, 35(3): 5-18
- [11] Luciana P, Andrea P, Marco C. Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(11): 134-141
- [12] Vasilescu I, Kotay K, Rus D, et al. Data Collection, Storage, and Retrieval with an Underwater Sensor Network[C]// Proc. of the 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). San Diego, 2005
- [13] Cui J H, Kong J, Gerla M, et al. The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications[J]. IEEE Network, 2006, 20(3): 12-18
- [14] Wang R Y, Sobti S, Garg N, et al. Turning the postal system into a generic digital communication mechanism[C]// ACM SIGCOMM. 2004

- [15] Snowdon D, Glance N, Meunier J L. Pollen: using people as a communication medium[J]. Elsevier Computer Networks, 2001, 35(4):429-442
- [16] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets[C]//Proc. of ACM SIGCOMM, 2003:27-24
- [17] Wang Y, Wu H. Delay/Fault-Tolerant Mobile Sensor Network (DFT-MSN): A New Paradigm for Pervasive Information Gathering[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(9): 1021-1034
- [18] John B, Brian G, David J, et al. MaxProp: routing for vehicle-based disruption-tolerant networks[C]//the 25th IEEE International Conference on Computer Communications, 2006
- [19] Frenkiel R H, Badrinath B R, Borres J, et al. The Infostations challenge: balancing cost and ubiquity indelivering wireless data [J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(2): 66-71
- [20] Matthias G, David N C T. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks[J]. IEEE/ACM Trans. Netw. , 2002, 10(4): 477-486
- [21] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks[R]. CS-2000-06. Duke University, 2000
- [22] Widmer J, Boudec J Y L. Network coding for efficient communication in extreme networks[C]// ACM SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networks, 2005
- [23] Wang Y, Jain S, Martonosi M, et al. Erasure coding based routing for opportunistic networks[C]// ACM SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networks, 2005
- [24] Liao Y, Tan K, Zhang Z, et al. Estimation based erasure coding routing in delay tolerant networks[C]// International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2006
- [25] Chen L J, Yu C H, Sun T, et al. A hybrid routing approach for opportunistic networks [C] // ACM SIGCOMM Workshop on Challenged Networks, 2006
- [26] Burgess J, Gallagher B, Jensen D, et al. Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networking[C]// IEEE Infocom, 2006
- [27] Harras K A, Almeroth K C, Belding-Royer E M. Delay tolerant mobile networks(dtmns): Controlled flooding in sparse mobile networks[C]//IFIP Networking, 2005
- [28] 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
- [29] Boldrini C, Conti M, Jacopini J, et al. HiBOP: a History Based Routing Protocol for Opportunistic Networks[C]// WoWMoM, 2007
- [30] Ram R, Richard H, et al. Prioritized Epidemic Routing for Opportunistic Networks[C]//MobiOpp, 2007
- [31] Musolesi M, Hailes S, Mascolo C. Adaptive Routing for Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks [C] // WoWMoM, 2005
- [32] Su J, Ashvin G, Eyal L. An empirical evaluation of the student-net delay tolerant network[C]//MobiQuitous, 2006
- [33] Su J, Chin A, et al. User mobility for opportunistic ad-hoc networking[C]//6th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications(WMCSA), 2004
- [34] Anastasi G, Conti M, Monaldi E, et al. An Adaptive Data-transfer Protocol for Sensor Networks with Data Mules[C]//Proc. IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile, and Multimedia Networks, 2007
- [35] Zhao W, Ammar M, Zegura E. A Message Ferrying Approach for Data Delivery in Sparse Mobile Ad Hoc Networks[C]//MobiHoc, 2004: 187-98
- [36] Leguay J, Friedman T, Conan V. Evaluating Mobility Pattern Space Routing for DTNs[C]//Infocom, 2006
- [37] Jain S, et al. Exploiting Mobility for Energy Efficient Data Collection in Wireless Sensor Networks[J]. ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications(MONET), 2006, 11(3): 327-39
- [38] Camp T, Boleng J, Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research[J]. Wireless Communication and Mobile Computing Journal, 2002, 2(5): 483-502
- [39] McNett M, Voelker G M. Access and mobility of wireless PDA users[J]. SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev. , 2005, 9(2): 40-55
- [40] Yeo J, Kotz D, Henderson T. CRAWDAD: a community resource for archiving wireless data at Dartmouth[J]. Computer Communication Review, 2006, 36(2): 21-22
- [41] Chaintreau A, Hui P, et al. Pocket switched networks: Real-world mobility and its consequences for opportunistic forwarding [R]. UCAM-CL-TR-617. University of Cambridge, 2005
- [42] Chaintreau A, et al. Impact of human mobility on the design of opportunistic forwarding algorithms[C]//INFOCOM, 2006
- [43] Karagiannis T, et al. Power law and exponential decay of inter contact times between mobile devices[R]. MSR-TR-2007. Microsoft Research, March 2007
- [44] Muhammad A, George M. Characteristics of Common Mobility Models for Opportunistic Networks [C] // PM2HW2N, 2007: 105-109
- [45] Han C, Do Y E. Crossing over the Bounded Domain: From Exponential To Power-law Inter-meeting Time in MANET[C]//Mobicom, 2007: 159-170
- [46] Chen L J, Chen Y C, Sun T, et al. Finding Self-similarities in Opportunistic People Networks[C]//INFOCOM, 2007
- [47] Song L, Kotz D F. Evaluating opportunistic routing protocols with large realistic contact traces[C]//CHANTS, 2007: 35-42
- [48] 雷蕾, 林闯. 无线数据网络中机会调度理论模型的研究[J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1548-1557
- [49] Bhargava B, Lilien L, Rosenthal A, et al. Pervasive Trust[J]. IEEE Intelligent Systems, 2004, 19(5): 74-77
- [50] Lilien L, Kamal Z H, Gupta A. Opportunistic Networks: Challenges in Specializing the P2P Paradigm[C]//17th International Conference on Database and Expert Systems Applications, 2006: 722-726
- [51] Burgess J, Bissias G D, et al. Surviving attacks on disruption-tolerant networks without authentication [C] // MobiHoc, 2007: 61-70