

机会网络*

熊永平^{1,3}, 孙利民²⁺, 牛建伟⁴, 刘燕⁵

¹(中国科学院 计算技术研究所,北京 100190)

²(中国科学院 软件研究所,信息安全国家重点实验室,北京 100190)

³(中国科学院 研究生院,北京 100049)

⁴(北京航空航天大学 计算机科学与工程学院,北京 100191)

⁵(北京大学 软件与微电子学院,北京 102600)

Opportunistic Networks

XIONG Yong-Ping^{1,3}, SUN Li-Min²⁺, NIU Jian-Wei⁴, LIU Yan⁵

¹(Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(State Key Laboratory of Information Security, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

³(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

⁴(School of Computer Science and Engineering, BeiHang University, Beijing 100191, China)

⁵(School of Software and Microelectronics, Peking University, Beijing 102600, China)

+ Corresponding author: E-mail: sunlimin@is.iscas.ac.cn

Xiong YP, Sun LM, Niu JW, Liu Y. Opportunistic networks. *Journal of Software*, 2009,20(1):124–137.
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm>

Abstract: The appearance of plenty of intelligent devices equipped for short-range wireless communications boosts the fast rise of wireless ad hoc networks application. However, in many realistic application environments, nodes form a disconnected network for most of the time due to nodal mobility, low density, lossy link, etc. Conventional communication model of mobile ad hoc network (MANET) requires at least one path existing from source to destination nodes, which results in communication failure in these scenarios. Opportunistic networks utilize the communication opportunities arising from node movement to forward messages in a hop-by-hop way, and implement communications between nodes based on the “store-carry-forward” routing pattern. This networking approach, totally different from the traditional communication model, captures great interests from researchers. This paper first introduces the conceptions and theories of opportunistic networks and some current typical applications. Then it elaborates the popular research problems including opportunistic forwarding mechanism, mobility model and opportunistic data dissemination and retrieval. Some other interesting research points such as communication middleware, cooperation and security problem and new applications are stated briefly. Finally, the paper concludes and looks forward to the possible research focuses for opportunistic networks in the future.

Key words: opportunistic routing; opportunistic network; DTN (delay tolerant network); ad hoc

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60673178, 60873241 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2008AA01Z217 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2008-05-23; Accepted 2008-08-28

摘要: 大量具备短距离通信能力的智能设备的出现推动了无线自组网应用的迅速发展.但在许多实际应用环境中,节点移动、网络稀疏或信号衰减等各种原因通常导致形成的网络大部分时间不连通.传统的移动自组织网络传输模式要求通信源和目标节点之间存在至少一条完整的路径,因而无法在这类环境中运行.机会网络利用节点移动形成的通信机会逐跳传输消息,以“存储-携带-转发”的路由模式实现节点间通信,这种完全不同于传统网络通信模式的新兴组网方式引起了研究界极大的兴趣.首先介绍机会网络的概念和理论基础,并给出了当前机会网络的一些典型应用,然后详细阐述了机会网络研究的热点问题,包括机会转发机制、移动模型和基于机会通信的数据分发和检索等,并简要叙述了机会网络的通信中间件、协作和安全机制以及机会网络新的应用等其他研究问题,最后进行总结并展望了机会网络未来一段时间内的研究重点.

关键词: 机会路由;机会网络;延迟容忍网络;自组织

中图法分类号: TP393

文献标识码: A

大量低成本、具备短距离无线通信能力的智能设备的出现推动了无线自组织网络应用的迅速发展.例如,行驶在公路上带有智能设备的车辆自组成车载网络,实现交通事故预警和其他道路安全应用^[1];各种配备蓝牙或 Wi-Fi 接口的手持电子设备,如 MP3 播放器、手机、PDA 等自组成网络以实现数据共享或协作访问互联网^[2];放置在动物身上的传感器组成移动传感器网络收集动物迁徙数据^[3]等.

在上述的各种实际自组织网络应用中,节点移动、节点稀疏、射频关闭或障碍物造成信号衰减等多种原因都可能导致网络大多数时候不能连通.这种网络环境中,传统的 MANET(mobile ad hoc network)通信模式无法有效运行.因为 MANET 在传输用户数据之前,需要预先通过 AODV(ad-hoc on-demand distance vector)或 DSR(dynamic source routing)等路由算法建立通信端点之间的路由,并将数据分组按照节点路由表中确定的下一跳节点顺序转发到目标节点.这种工作模式隐含一个重要的假设:网络大部分时候是连通的,任一节点对之间存在至少一条完整的端到端通信路径.而在前述网络中,在一个特定时刻,网络可能被分割成不连通的子区域,源节点和目标节点位于不同的连通域而导致 MANET 路由协议不能发现去往目标节点的路由.然而,通信源和目标不存在完整连通路径并不意味着不能实现通信,由于节点的移动,两个节点可以进入相互通信范围而交换数据,机会网络^[4]就是利用这种节点对之间的逐跳转发将数据从源节点传输到目标节点.

机会网络不要求网络的全连通,更适合实际的自组网需求,且对于实现未来普适计算具有重大影响^[5],因而近年来引起了科研人员的密切关注.在网络领域相关著名会议上,如 SIGCOMM,MOBICOM,INFOCOM,MOBIHOC,ICNP,PERCOM 等,相关的重要研究成果逐年增多.此外,还专门成立了一些研讨会,如 Mobicom 的 CHANTS,MobiSys 的 MobiOPP,ICDCS 的 DTMN 以及 PERCOM 的 ICMAN 等,供研究者交流.鉴于机会网络在国外的发展已经取得了一定的成果,为了深入理解机会网络的概念和发展趋势,并促进国内在该方向上的研究,综述机会网络研究进展工作十分有意义.

本文首先引入机会网络的概念和应用,并对机会网络研究的相关热点问题加以介绍,包括机会转发机制、节点移动模型和基于机会通信的数据分发和检索等,然后对其他研究问题,如通信中间件、安全与协作机制等进行简单的叙述,最后总结全文并展望未来几年内的研究趋势.

1 机会网络概念和理论基础

目前机会网络还没有一个统一的定义,本文通过综合现有文献分析机会网络特点,给出一个描述性定义:机会网络是一种不需要源节点和目标节点之间存在完整链路,利用节点移动带来的相遇机会实现通信的自组织网络.图 1 是一个机会网络示意图, t_1 时刻源节点 S 希望将数据传输给目标节点 D ,但 S 和 D 位于不同的连通域而没有通信路径,因此, S 首先将数据打包成消息发送给邻居节点 3,由于 3 并没有合适的机会转发下一跳节点,它将消息在本地存储并等待传输机会,经过一段时间到达 t_2 时刻,节点 3 运动到节点 4 的通信范围并转发给节点 4,在 t_3 时刻,节点 4 将消息传输给目标节点 D ,完成数据传输.

机会网络的部分概念来源于早期的延迟容忍网络 DTN(delay tolerant network)^[6]研究.DTN 最初是容迟网

网络研究组(DTNRG)为星际网络 IPN(interplanetary network)^[7]通信而提出来的,其主要目标是支持具有间歇性连通、延迟大、错误率高等通信特征的不同网络的互联和互操作,如互联 Internet 和传感器网络、移动自组织网络等.DTN 网络体系由多个底层运行独立通信协议的 DTN 域组成,域间网关利用“存储-转发”的模式工作,当去往目标 DTN 域的链路存在时转发消息,否则,将消息存储在本地持久存储器中等待可用链路.机会网络可以看成是具有一般 DTN 网络特征的无线自组网.

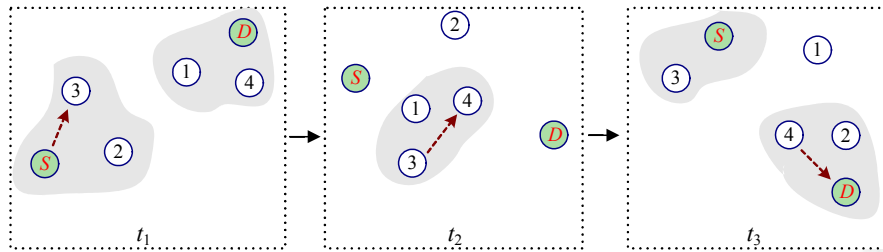


Fig.1 Illustration of opportunistic networks

图 1 机会网络示意图

除了 DTN 研究的促进以及实际网络环境的需求以外,机会网络也有自组网理论基础的支撑.研究^[8]发现,在 n 个节点随机部署的固定无线自组织网络中,任一节点对之间的吞吐率最优情况按照 $1/\sqrt{n}$,最差情况按照 $1/\sqrt{n \log(n)}$ 降低.当网络规模增大时,无线传输的相互干扰导致网络容量不断降低,这个结果证明了静态自组织网络的不可扩展性.Grossglauser 等人^[9]证明,当允许节点移动时,通过增加数据传输延时可以提高网络容量.其原理是通过控制导致相互干扰的并发通信,单个节点对之间的吞吐率在网络规模增大时可以保持不变.Grossglauser 等人提出的方法是源节点必须缓存数据直到进入目标节点通信范围内才允许传输数据,但这种方法的延迟很大.他们又提出利用节点移动性和中间节点临时存储转发分组来提高网络容量.源节点将消息传输给邻居中继节点,该节点缓存消息再将消息转发给目标节点或遇到的其他中继节点.这些研究构成了机会组网的理论基础.

2 机会网络的应用

很多应用领域都无法建立结构化的全连通网络,导致传统的多跳自组织网络协议无法运行,而机会网络能够更好地满足这些应用需求.由于机会网络应用领域还在不断发展之中,本节仅列举一些典型的应用.

2.1 野生动物追踪

在大范围的野生动物追踪应用中,机会网络比传统 mesh 结构的静态传感器网络更具优势.ZebraNet^[3]是一个由普林斯顿大学设计,用来追踪非洲草原斑马的机会网络系统.该系统由安装在斑马脖子上的低功耗传感器和移动基站组成.传感器收集斑马的迁徙数据,并与相遇的斑马传感器交换数据,研究人员定期开车携带移动基站穿越追踪区域收集数据.SWIM(shared wireless infostation model)^[10]是一个监视海洋鲸鱼的水下机会网络.嵌入在鲸鱼身上的特殊 Tag 周期性地收集监控数据,当两头鲸鱼相遇时,它们的 Tag 相互通信并交换数据,每头鲸鱼不仅存储自身数据,也携带了相遇的其他鲸鱼的数据,通过鲸鱼的移动,数据被复制并扩散在不同的鲸鱼上,直至到达部署在水面浮标或飞过的海鸟身上携带的基站.

2.2 手持设备组网

随着手机、PDA 等手持设备的大量普及,利用手持设备组网实现数据交换和提供网络服务具有广阔的应用前景.剑桥大学和 Intel 研究院提出的 PSN(pocket switched network)^[2]是由人随身携带的手持设备形成的机会网络,每个设备节点既可以通过人们相遇带来的局部通信机会,也可以通过 Wi-Fi 或 GPRS(general packet radio service)等接入 Internet 的全局连接转发数据.当目标节点位于当前节点附近区域或不能接入 Internet,或者用户

应用需要很高的带宽和很小的延迟时,局部连接能比全局连接提供更好的服务.PSN旨在充分利用手持设备的计算、存储和带宽资源,透明地利用各种连接方式为用户提供网络服务.例如,电子邮件服务,当发送节点和接收节点位于相互通信范围内时,PSN节点不需要接入Internet通过传统的SMTP和POP3等技术实现,而是直接利用本地连接转发数据.

2.3 车载网络

随着配备短距离无线接口车辆的增多,行驶在道路上的车辆由于速度快,密度不均匀形成了一个车载机会网络.这种网络在交通事故预警、路况检测、拥塞预报等交通安全应用中具有巨大的潜力,此外,利用车辆与路边接入点的机会通信可以提供Internet访问和商业应用等.

CarTel^[11]是MIT开发的基于车辆传感器的信息收集和发布系统,能够用于环境监测、路况收集、车辆诊断和路线导航等.安装在车辆上的嵌入式CarTel节点,负责收集和处理车辆上多种传感器采集的数据,包括车辆运行信息和道路信息等.使用Wi-Fi或BlueTooth等通信技术,CarTel节点在车辆相遇时可以直接交换数据,同时,CarTel节点也可以通过路边的无线接入点将数据发送到Internet上的服务器.

2.4 偏远地区网络传输

发展中国家或偏远地区的网络基础设施通常不够完善而不能接入互联网,使用机会网络技术能够提供非即时,但价格低廉、相对可用的网络服务.DakNet^[11]是由MIT开发、部署在印度偏远地区提供互联网服务的机会网络.DakNet包括:部署在村庄的Kiosk设备、公交车辆上的MAP(mobile access points)设备以及部署在城镇的互联网AP设备,这些设备之间使用Wi-Fi接口通信.村民通过PDA与Kiosk设备交换数据;往返农村和城镇的公交车经过Kiosk设备附近时,MAP和Kiosk设备交换数据,当公交车到达城镇时,MAP通过AP连接到互联网上传或下载数据.类似的系统还包括为芬兰北部的游牧民族提供信息服务的Saami Network Connectivity^[12]和Berkeley和Intel研究院正在联合开发的Tier项目^[13].

3 机会网络研究的热点问题

目前,机会网络的研究热点问题主要包括3个方面:机会转发机制、节点移动模型和基于机会通信的数据分发和检索等.

3.1 机会转发机制

转发和路由是任何组网技术的首要问题.如前所述,现有的自组织网络路由协议假设源和目标节点之间存在至少一条完整的通信路径,而无法在机会网络中运行.为了在不连通的网络中实现节点通信,机会网络中的路由机制以“存储-携带-转发”的模式工作.在这种模式中,当路由表中不存在去往目标节点的下一跳节点时,将消息在当前节点上缓存,并随着当前节点的移动以等待合适的转发机会.针对每个消息确定最好的下一跳转发节点和选择合适的转发时机就成为设计高效机会网络路由协议的关键问题.因此,传统网络中的依据网络状态信息建立和维护路由的功能退化成一跳转发节点的单跳决策问题,因而本文使用术语“转发”来代替“路由”.

本文根据转发策略的不同,将目前的机会转发机制主要分为4类:基于冗余(redundancy-based)的转发机制、基于效用(utility-based)的转发、冗余效用混合(hybrid)机制和基于主动运动(node movement)的转发机制,如图2所示.在基于冗余的转发机制中,通过基于复制(replication)或基于编码(coding)的方式,每个消息产生多个冗余消息在网络中扩散,通过多路径并行传输提高消息传输性能.基于效用的转发机制与传统的网络转发类似,使用单路径、单消息拷贝,它利用网络状态信息来决策下一跳节点.该机制利用一个估计函数给每个节点赋予转发效用值(utility),该函数使用相遇预测(meeting prediction)、链路状态(link state)和上下文信息(context)等不同的参数来评估节点转发消息的有用性.当两个节点相遇时,消息从效用值低的节点转发到效用值高的节点,直到目标节点.冗余效用混合机制综合了基于冗余和基于效用的转发机制,每个消息产生多个冗余消息,每个冗余消息按照基于效用的转发策略转发到目标节点.在基于节点主动运动的转发机制中,网络中某些节点在部署区域内主动运动来为其他节点提供通信服务,与节点不存在可用的下一跳邻居节点被动等待连接机会的方式相比,提

高了网络传输效率.

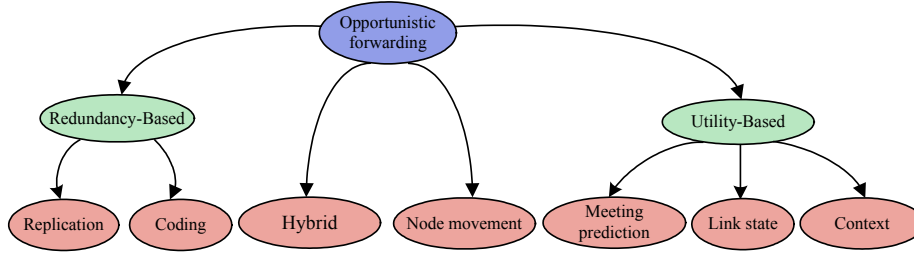


Fig.2 Taxonomy of opportunistic forwarding schemes

图 2 机会转发机制分类

3.1.1 基于复制的转发

该机制中,同一消息的多份拷贝被注入网络,当其中一个到达目标节点时,消息传输成功.其核心问题是确定优化的消息拷贝数和产生消息拷贝的方式.最简单的机制是直接传输(direct transmission,简称 DT)^[9],源节点缓存消息直到遇到目标节点才转发,网络开销最小,但传输延时大和传输成功率最低.在 2-HOP 算法^[9]中,源节点将消息拷贝给最先遇到的 L 个中继节点,源节点和 L 个中继节点只将消息转发给目标节点,消息需要两跳到达目标节点.假定节点独立移动,节点之间相遇概率为 p ,则 DT 的传输成功率为 p ,而 2-HOP 算法的传输成功率为 $1 - (1-p)^{L+1} \approx (L+1)p$ (当 p 较小时),因此提高了传输成功率.Binary Spray and Wait^[14]在源节点指定消息允许的最大拷贝数为 L ,并使用基于二叉树的方法来产生 L 份拷贝.该机制由两个阶段组成:Spray 阶段,在遇到没有缓存该消息的中继节点时,将消息拷贝给节点,并将剩下的拷贝任务分成两半,由该邻居节点完成 $\lfloor (L-1)/2 \rfloor$,自身完成剩下的部分 $\lfloor (L-1)/2 \rfloor$,当节点剩下 1 份拷贝任务时,节点转入 Wait 阶段,等待转发给目标节点,相比只允许源节点分发消息拷贝的 2-HOP 算法进一步降低了传输延时.

在传染转发(epidemic forwarding,简称 EF)^[15]机制中,每个节点维护一个消息队列,当两个节点相遇时,交换对方没有存储的消息.它本质上是一种洪泛算法,每个携带消息的节点都将消息转发给所有遇到的邻居节点.如果网络的带宽和缓存等资源足够,EF 机制可以保证找到到达目标节点的最短路径,而由于实际网络节点带宽和缓存等资源有限,随着网络节点数的增大,其性能由于广播导致的拥塞会急剧下降.相比前几种消息拷贝数固定的算法,EF 机制可扩展性很差.

3.1.2 基于编码的转发

基于编码的转发机制将待传输数据编码成相互冗余的消息,目标节点仅需要接收到部分编码后的消息,即可通过消息之间的运算重建原数据.Wang 等人^[16]提出了一种基于擦除编码(eraser-coding,简称 EC)的机会转发机制.源节点先将原始数据分成 m 个块,然后将这些数据块编码成 k 个小消息,目标节点只需要接收到 k 个消息中的任意 $m \times (1+\epsilon)$ 个小消息就可重建原始数据, ϵ 是由具体编码算法确定的小常数^[17].该机制中源节点将编码后的小消息平均分配给 k 个相遇的中继节点,每个中继节点携带部分小消息直到遇到目标节点.该算法保证了网络连接最差情况下的性能,但在网络连接足够好的时候却不能充分利用连接机会,因为每次相遇没有考虑相遇持续时间,只传输固定数目的小消息.Ling-Jyh 等人^[18]提出了一种基于 EC 和复制的混合式路由机制 H-EC,每个编码后的小消息生成两个拷贝,当遇到邻居节点时,首先将消息的第 1 份拷贝传输给该节点,然后在该连接持续时间,将其他消息的第 2 份拷贝转发给该节点,通过充分利用每次连接机会取得更好的传输性能.

此外,Widmer 等人^[19]将网络编码引入到机会网络中,提出了一种基于随机线性网络编码的机会转发机制,将不同消息源的消息映射到一个有限域形成一个信息向量,中间节点利用随机生成的编码向量将接收到的特定个数的消息线性编码成新向量,重新注入到网络中,当目标节点接收到足够的消息向量时可解码出原消息.基于编码的转发机制在网络拥塞或链路信号差导致丢包时具有很好的鲁棒性,而且传输的消息总数不会随网络规模和节点密度而发生变化,可以很好地控制网络开销,具有良好的可扩展性.

3.1.3 基于相遇预测的转发

在基于相遇预测的机会转发机制中,每个节点都维持一个与目标节点相遇的预测概率.可以通过节点的历史移动轨迹来预测该概率.在 ZebraNet^[3]提出的基于移动历史的转发机制中,每个动物身上的传感器节点维持了一个到达基站的概率,当传感器随动物移动到基站通信范围内时,该概率值增加,否则,该概率值随时间的推移而逐渐降低.当两个传感器节点相遇时,概率低的节点将自身消息转发给概率高的传感器节点.在 Seek and Focus^[20]协议中,对所有网络节点,当前节点记录从上次相遇后经过的时长,并以此估计节点之间的相遇概率.当节点由于移动速度慢和移动范围的局部性导致网络“慢启动”和概率值分布不均匀时,该机制临时切换到随机选择转发节点以提高转发性能.

节点位置和运动方向也可以用来预测节点相遇概率.LeBrun 等人^[21]针对车载网络提出一种基于移动向量预测的方法来估计与目标节点的相遇概率,该方法假设每个车辆都配备 GPS,可实时获取当前位置和运动方向.由于行驶的车辆必须沿着道路前进,不能完全随机移动,因此,当车辆相遇时,每个车辆根据自身的移动方向向量和从当前位置到达目标节点位置的向量,并用这两个向量的夹角来估计到达目标节点的概率.

一些“理想”的转发机制利用节点的移动模型估计相遇概率,MobySpace^[22]假设已知节点之间的相遇规律,并据此建立一个高维欧式空间,空间中的每根轴代表一个节点对之间的相遇,沿轴的距离代表相遇概率,两个节点如果遇到的节点集相似且与相遇频率类似,则在空间中位置相近,当节点相遇时,更适合的转发节点就是在空间中更靠近目标的节点.

3.1.4 基于链路估计的转发

基于链路的机会转发机制考虑节点之间的“端到端”的链路状态来选择转发节点.尽管机会网络中不一定存在端到端的完整路径,但通过收集单跳链路状态估算出的端到端路径的有用性仍可作为转发决策依据.一些机制利用链路的平均可用性来估算单跳链路状态.在最短期望路径路由(shortest expected path routing protocol, 简称 SEPR)^[23]中,每个节点都维护到达已知节点的链路可用概率值,两个节点 i 和 j 之间的链路概率计算为 $P_{ij} = T_{conn} / T_w$, T_{conn} 是时间窗口 T_w 内节点对维持连通的时长.每次节点相遇时,该概率值更新,同时相互交换概率表.SEPR 假定穿越一条链路的时间与链路概率值成反比,并使用穿越时间作为链路长度,当节点获得所有已知节点本地链路概率后,利用 Dijkstra 算法计算当前节点到达目标节点的最短路径.优先 Epidemic(prioritized epidemic)^[24]则利用计算出的最短路径长度来赋予节点被抛弃的优先级,距离目的节点的路径长度越大,被抛弃的优先级越低,通过抛弃无用消息降低网络负载,提高传染转发机制的性能.

链路延迟也可以用来估计链路的效用值.文献[25]提出使用消息到达目标节点端到端的传输最短延时 Minimum Estimated Expected Delay(MEED)作为转发决策依据.文献[26]通过挖掘邻居节点链路之间的依赖性来改进基于简单统计的链路质量评估.不仅考虑当前自身链路的连通次数和持续时间,还考虑当前链路与前邻节点前一条链路的依赖关系,提出使用“期望依赖延迟(expected dependent delay)”作为转发测度.

3.1.5 基于上下文信息的转发

除了使用上述网络状态参数以外,该方法还使用节点能量、移动速度、节点密度以及位置信息等更为广泛的上下文参数来计算节点效用值.Context-Aware Routing(CAR)协议^[27]使用的上下文属性包括:剩余能量、拓扑变化速率、到达目标连通域的概率和移动速度等.利用时间序列分析理论根据节点属性历史数据预测属性值,以此综合计算节点效用值.CAR扩充DSDV(destination-sequenced distance-vector routing)协议的路由表项为(目标节点,下一跳,费用,传输概率),通过周期性地在连通域内交换路由表信息,每个节点都维护到目标节点的概率.若当前节点与目标节点位于同一连通域,则直接转发,否则,转发给当前连通域内到达目标节点概率值最高的节点.

使用节点上下文属性计算效用值比较复杂,不同参数的权重对传输性能影响很大.近来有学者提出了一种基于 Age Rumor 的机会转发机制^[28],目标节点周期性地在网络内广播一个很小的 Age 消息,该消息的年龄值随时间不断老化.当节点接收到相同的 Age 消息时,保存年龄较小的.由于网络的不连通性,距离目标节点越近,节点上 Age 消息的年龄越小.当节点需要转发消息时,选择一个具有目标节点最小 Age 消息的邻居节点转发.该机制计算

简单,但Age消息传播会造成额外的开销.

3.1.6 冗余效用混合转发

混合转发机制同时使用并行传输和基于效用的转发决策提高传输性能.PROPHET(probabilistic routing protocol using history of encounters and transitivity)^[29]综合了传染转发和基于相遇预测转发.与 ZebraNet 机制相似,每个节点估计到达其他节点的相遇概率,该节点相遇时升高,否则,随时间递减,但 PROPHET 中概率的更新使用了概率的传递性,即节点 a 有可能遇到节点 b ,而 b 有可能遇到节点 c ,则 a 可以成为目标节点为 c 的消息转发节点.节点相遇时,PROPHET 将到达目标节点概率比自身高且对方没有缓存的消息传输给对方,降低了传染转发广播引起的拥塞导致的性能影响.

Spray and Focus(SF)^[30]改进了 Spray and Wait(SW)中的 Wait 阶段,图 3 对比了 SW 和 SF 两种转发机制的工作过程,其中,深色节点表示携带消息拷贝的节点,颜色越深,节点效用值越大.Spray 阶段将消息分发到 L 个不同的中继节点后,SW 机制中 L 个不同的中继节点将等待直到遇到目标节点,而 SF 机制中,消息不断地从效用值低的节点转发到效用值高的节点,直到遇到目标节点.当节点效用值在网络分布适当时,SF 机制可极大地提高传输性能.

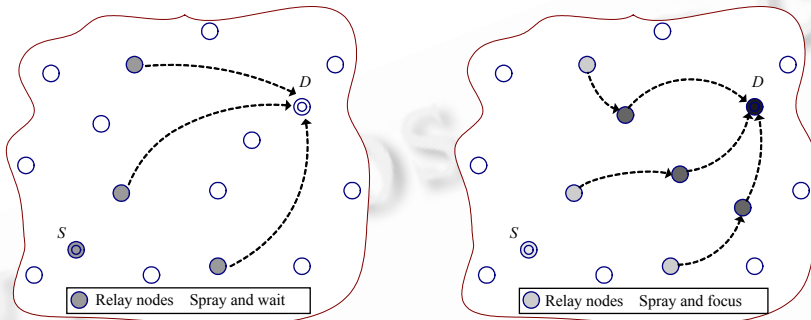


Fig.3 Spray and Wait vs. Spray and Focus

图 3 Spray and Wait 与 Spray and Focus

在机会移动传感器网络中,Masocolo^[31]提出了 SCAR(sensor context-aware adaptive routing)转发机制收集传感器网络数据.SCAR 结合了 CAR 协议中基于时间序列分析理论的节点效用估计和 SW 中源节点限制消息最大拷贝数的思想.传感器节点产生消息后指定其允许的最多拷贝个数为 K ,并分发给相遇的前 K 个效用值比自身大的节点,每个消息拷贝沿着节点效用梯度增大的方向传输到 Sink 节点.在 Wang^[32]提出的转发机制中,每个传感器节点使用与 PROPHET 类似的机制维持一个到达 sink 节点的传输概率值来指导消息转发,但节点拷贝个数不是由源节点指定,而是将每个消息关联一个容错度值,该值表示消息在网内的冗余度,随着消息在网络内的拷贝数的增加,消息冗余度不断增加,通过只转发冗余度大于一定阈值的消息来控制网络开销.但消息容错度很难精确计算,导致消息转发与传染转发相似.文献[33]提出了一种综合基于擦除编码和相遇预测的转发机制,该算法在节点生成一个消息时,根据到达 sink 节点的传输概率,计算使得到达 sink 节点的概率最大的最优码块大小,然后将编码后的消息块使用基于效用的转发.微软研究院也提出了一种相似的转发机制 EBEC(estimation-based erasure coding)^[34].

3.1.7 基于节点主动运动的转发

当网络节点稀疏或拓扑变化具有很强的随机性时,前述转发机制都被动等待相遇更好的转发节点.在基于节点主动移动的转发机制中,部分特殊节点主动移动为其他普通节点提供通信服务.DataMULEs 系统^[35]通过引入移动节点来实现稀疏传感器网络的数据收集.稀疏部署在观测场景中的传感器形成一个不连通的网络,使用现有的固定传感器组网技术无法完成数据收集.该系统利用场景中移动且具备通信功能的车辆或动物 MULE 节点,在移动过程中收集传感器数据,并以单跳或多跳方式将数据转发到接入骨干网的 AP 节点.Message Ferrying(MF)^[36]使用 Ferry 节点主动移动实现稀疏 MANET 中的数据传输.Ferry 节点是部署区域内的一个特殊

节点,它按照预定义路径或普通节点通信请求而规划出的路径来移动,源节点将数据装载到 Ferry 节点,Ferry 节点在移动过程中将数据转发给附近的目标节点.单 Ferry 系统容量小且很容易由于单点失败导致系统崩溃,文献[37]又提出使用多个 Ferry 节点提供通信服务以提高系统的可靠性和传输效率.基于 Ferry 的机会转发机制需要收集普通节点的传输流量需求以规划节点路径,或者要求普通节点可控移动,这些假设比较严格,因而实际应用范围有限.

机会转发机制是机会网络中研究最早、成果最丰富的领域,但大多数转发机制性能只进行了模拟测试,在实际系统中的性能还有待验证.这方面 UMASS(University of Massachusetts Amherst)做出了初步努力,他们组建了一个由 40 辆公交车组成的实际机会网络测试环境 DieselNet,并对一些协议性能进行了验证.

3.2 节点移动模型

节点移动模型描述了节点的移动模式,包括位置、速度等特征的变化,广泛应用于自组网协议性能的分析 and 评价,是自组织网络的基础研究之一.传统的 MANET 假设网络是全连通的,节点的移动对路由层以上的协议是“屏蔽”的.因此一般从网络拓扑角度去分析移动模型对协议性能的影响,如拓扑连通率、节点连通度等,而机会网络中的移动模型研究是以刻画节点相遇特征为核心的.这是因为在机会网络中的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,相比于传统的 MANET,移动模型对机会网络研究更加重要.

3.2.1 独立同分布的理论移动模型

许多学者研究了 3 个经典的独立同分布移动模型:Random Way Point^[38](RWP),Random Walk(RW)和 Random Direction^[39](RD).这些模型下的节点相遇特征可用两个参数来刻画:相遇时间(meeting time,简称 MT)和相遇间隔时间(inter meeting time,简称 IMT).MT 是指两个节点从静止开始到第一次相遇(进入通信范围)经过的时间间隔,而 IMT 是指两个节点前后两次相遇的时间间隔.文献[39]都分别从不同的角度证明了上述 3 个移动模型的节点期望相遇时间(expected meeting time)服从指数分布或其尾部服从指数分布,并基于此分析了多种路由协议的延时性能.文献[40]推导出 RW 模型下期期望相遇间隔时间的分布也服从指数分布,而文献[41]推导了 RD 模型和 RWP 模型下的期望相遇间隔时间分布,并证明了 RWP 和 RD 模型下相遇时间和相遇间隔时间的尾部分布是无记忆的.

3.2.2 基于统计的实际移动模型

除了从理论来推导以外,一些研究人员还利用统计方法,通过收集实际环境中节点的运动轨迹来研究节点的移动特征.MIT 的 Reality Mining 项目^[42]记录了 MIT 校园中 100 个携带蓝牙智能手机的学生和职工为期 9 个月的移动轨迹和相遇数据;UCSD 的 Wireless Topology Discovery^[43]收集了 11 周内 300 个无线 PDA 与 Wi-Fi 接入点的相遇数据;剑桥大学的 Huggle 项目^[44]则记录了若干个带有蓝牙接口的 iMote 设备在校园的相遇情况.此外,他们还在 INFOCOM 参会期间进行了类似的实验;UMass 研究小组^[45]收集并分析了由公交车上的 Wi-Fi 节点组成的机会网络 DieselNet 实际运行中的相遇规律.文献[2]通过分析文献[43]中的数据集发现,实际节点的移动具有社区特性,节点相遇时间服从近似的幂律分布,而不是根据经典移动模型推导出的指数分布,这些成果证实了传统的移动模型并不一定适用于实际节点的移动特征,但研究人员在对于使用何种分布的移动模型问题上一直存在争议.文献[46]试图统一这两种类型的移动模型,作者从理论上推导出在一个有限边界的移动空间中,节点相遇间隔时间服从指数分布,如果去掉有限边界的条件,按照 RW 模型移动的节点相遇间隔就与统计观察到的结果相一致,服从近似幂律分布.

3.2.3 基于社区的移动模型

人所携带设备组成的网络是机会网络的一个主要应用,探索适用于这类场景且便于数学分析的移动模型机会网络研究的一个重点.基于由人组成的机会网络节点移动实际表现出的社区特性,一些研究人员提出了基于社区的移动模型(community based model).该模型下的节点并不是随机选取移动位置,而是考虑了 3 种情况来决策下一步移动位置:1) 节点偏好,节点比其他节点更倾向于去往某个特定位置或遇到特定节点;2) 节点异构性:某些节点能够到达所有位置/遇到所有其他节点;3) 行为时变性:节点移动随着时间变化.Musolesi 等人^[47]结

合社会网络理论提出了一种基于社区的移动模型.该模型根据节点之间联系的紧密程度,将节点分布在多个在不同区域的社区,然后计算不同社区对每个节点的吸引力,并以此确定节点是否移动以及朝哪个目标区域移动.Spyropoulos 等人^[48,49]提出了时变的社区移动模型,每个节点的工作周期由正常移动周期和集中移动周期组成,每个周期内,节点随机选择一个社区作为它的本地社区.节点在每个周期都有两种移动状态,Local epoch 和 Roaming epoch.前者是选择在本地社区内移动,后者是在其他地方漫游.节点在两个状态之间以一定的概率来切换,形成一个马尔可夫链,概率大小由所处的移动周期来确定.例如,在集中移动周期内,节点访问本地社区的概率较高.

还有一些研究人员在利用社区概念来改进机会转发机制性能时取得了初步进展.Pan 等人^[50]将属于同一社区的节点贴上相同的标签,节点相遇时,根据所贴标签优先选择与目标节点属于同一社区的节点作为转发节点,大幅度地降低了传输延迟和网络开销,提高了传输性能.文献[51]则引入社会网络理论中的节点重要度计算理论,利用节点间相遇统计,分布式计算每个节点在网络内的重要程度,并以此作为节点转发决策的依据.结果表明,基于该转发机制的传输性能相比基于网络状态的转发机制提高很多.

研究人员通过收集小规模区域内的节点移动轨迹,提出了一些新的移动模型,但由于机会组网尚未真正大规模应用,这些新模型能否刻画节点的真实移动特征,还需要更多实际节点的移动轨迹来验证.最近发起的“一百万计划”^[52]试图在千万人口的城市中收集 100 万个参与者的移动轨迹数据来改进目前的研究状况.

3.3 基于机会通信的数据分发和检索

由于机会网络以 Store Carry and Forward 模式传输数据,每个转发节点都会缓存转发的消息,这种特征使得内容存储成为机会网络的核心服务.与传统组网将存储认为是应用层功能特性不同,机会网络将存储和路由机制结合在一起管理,支持基于内容的组网,即网络中消息的流动是由内容驱动,而不是以分组为单位.这类研究主要集中在基于机会通信的数据分发和检索上.

3.3.1 机会数据分发机制

在机会网络中的数据分发过程中,请求节点首先发布订阅请求或兴趣消息,产生资源数据的节点将数据分发给感兴趣的节点.TACO-DTN^[53]是一个容忍延迟的内容分发系统,该系统由移动用户、固定信息站和位于主干网的服务器组成,用户在移动过程中向相遇的信息站发送订阅请求,信息站通过间断性连接将请求发送到主干网服务器,服务器计算内容事件与信息站所有订阅请求的匹配程度,以此确定事件在该信息站的优先级,并选择高优先级的事件推送到该信息站.Mascolo 等人^[54]针对车载机会网络提出了一个基于周期性广播的数据分发算法.该算法中,携带事件消息的车辆周期性地广播该消息,同时在单跳范围内广播事件的元数据并收集所有邻居节点对该事件的订阅请求,然后将订阅车辆按照行驶方向划分在不同的簇,并将消息转发给驶向订阅节点最多簇的车辆,当连续 k 次轮询都出现特定个数的订阅节点时,在消息转发到新车辆后,原消息不删除并继续广播;反之,当连续 k 次轮询都没有订阅节点时,当前消息从网络中删除.Guidec 等人^[55]提出了一种基于协商的文档分发机制.该机制中,每个分发节点接收到邻居节点发布的兴趣消息后,从缓存中检索对应的文档,再将文档元数据列表,并将自己的兴趣广播.邻居节点若发现列表中包含自身感兴趣的文档,则生成一个请求消息单播给该节点,节点收到请求后,将文档广播给所有邻居节点.文献[56]提出了机会网络上的发布订阅系统.订阅节点将订阅请求和上下文信息在周围 k 跳节点上分发,上下文信息包括节点移动性、与相遇兴趣的其他节点的连接情况和能量等,用来计算节点转发事件消息的 utility.当一个事件消息产生时,依次按照确定性订阅请求、节点 utility 和随机选择的顺序选择合适的邻居节点转发事件消息到订阅节点.

3.3.2 机会数据检索机制

基于机会通信的数据检索过程由请求节点驱动,请求节点在网络内发布查询消息,存储对应数据的节点返回结果消息到请求节点.Pan 等人^[57]针对手持设备机会网络 PSN,借鉴物理学中的渗透过程,提出了一种数据检索算法.每个用户节点看成一个细胞,查询节点将类比为溶质分子的查询消息在网络中扩散,形成以查询节点为中心、由中间节点组成的查询消息浓度差.缓存结果的节点接收到查询消息后,生成类比为溶剂分子的响应消息,从而改变当前细胞的浓度,按照渗透过程,响应消息溶剂分子将流向溶质浓度更高的节点,直到返回查询节

点.Zhao 等人^[58]研究了机会网络中的数据检索机制.该机制引入信息检索领域的语言模型,将文档表示成一个随机过程,检索请求则用一个关键字集合表达,根据文档与多个查询请求的匹配程度计算文档优先级作为缓存管理和传输调度的依据.Wolfson 等人^[59]针对机会网络的资源发现、提出了类似的算法 RBB(rank based broadcast).在 RBB 中,每个节点维持查询消息和数据消息两个队列,并根据查询消息的生成时间设定消息优先级,根据查询消息和数据消息的匹配程度设定数据消息优先级,当信道空闲时,节点将选取队列中优先级最高的查询消息和数据消息进行广播.

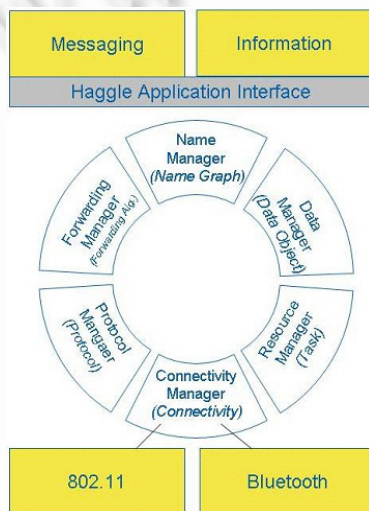
基于机会通信的数据分发和检索使用基于内容的路由方式传输数据,消息的传输没有完全采用传统网络通信中根据分组目标地址进行转发的方式.这类面向特定应用的机会网络,充分利用了机会网络传输自包含的数据消息而不是传统的分组的特性,减轻了传统网络中在不连通网络中通信端点交互过多的低效问题.

4 机会网络的其他研究问题

从通信组网的角度看,机会网络研究已经取得了一定的成果,但从实际应用来说,还有许多问题需要研究,包括机会网络通信中间件、网络安全和隐私保护问题、节点协作机制、机会网络新应用等.

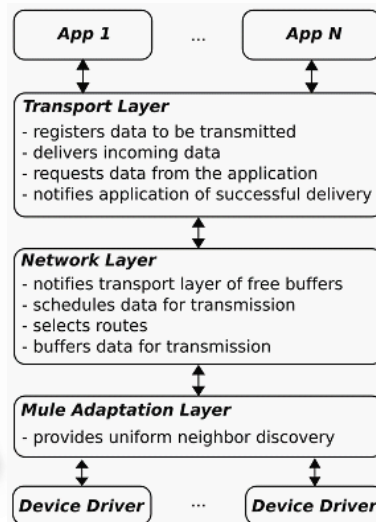
4.1 机会通信中间件

机会网络中,由于节点之间依赖随机的通信机会传输数据,传统的 Socket 编程接口并不适合,设计适合多种应用服务的机会通信中间件是机会网络实际应用的支撑问题.Haggle 项目^[60]旨在探索利用人们随身携带的大量无线设备之间的机会通信实现新的数据应用和转发方案,针对手持设备组成的机会网络设计了一种通信中间件,如图 4(a)所示,将数据管理、连接管理等各种功能组合在一个无层协议栈中,并提供给上层统一的应用接口.车载机会网络 CarTel 项目^[11]中也开发了支持机会通信的 CafNet(carry and forward)中间件.该中间件给应用层提供的不是流式接口,而是消息接口,应用程序和传输层通过注册和回调的方式来发送或接收数据消息.



(a) Haggle middleware

(a) Haggle 中间件



(b) CafNet middleware

(b) CafNet 中间件

Fig.4

图 4

4.2 节点协作机制

自组织机会网络的一个隐含的假设是所有节点都愿意协作,帮助其他节点转发消息.而在实际网络中,如果整个网络属于同一个组织,如监控野生动物的机会传感器网络,节点可自然实现协作传输.对于更普遍的属于不

同实体的节点组成的自组织网络,需要研究一般的协作机制以保证网络传输服务质量。

学者们研究了传统的移动自组网中的节点协作机制,但对于机会网络,目前的相关研究成果较少,Panagakos 等人^[61]研究了机会网络中存在自私节点对 3 种典型机会转发机制性能的影响,结果表明,当节点有自私行为时,消息传输延迟增大.Defrawy 等人^[62]引入电子商务的“微支付”激励节点为其他节点提供资源访问服务,Levente 等人^[63]提出使用“物物交换”的原理,两个进入通信范围的节点基于各自获得的利益为对方传输消息,任何一方出现自私行为,对方可取消此次交易。

4.3 安全和隐私问题

机会网络利用节点相遇机会通信,网络节点更加不可控制,对数据的机密性和完整性、路由安全性等带来更大的挑战.Asokan 等人^[64]研究了身份密码学(identity-based cryptography)在机会网络中的适用性,结果表明,身份密码学在认证和数据完整性方面并不比传统加密机制要好,但更有利于保护数据的机密性.Alaeddine 等人^[65]则首次研究了机会网络中 Epidemic Forwarding 机制的漏洞,并验证了恶意攻击该路由机制很难实现,攻击结果取决于网络场景,如节点密度和移动性等。

4.4 机会网络新应用

近年来,研究人员开始探索机会网络的新应用.Feiselia 等人^[66]提出了一个分布式机会备份系统.该系统假设人们大多数时候的生活轨迹是重复的,日常生活中人们携带的移动设备会遇到相同的设备,利用机会通信将移动设备的数据备份到其他相遇的移动设备上.Ott 等人^[67]设计了一个基于机会网络的数据存储和检索系统,利用机会网络中消息会产生多个拷贝存储在中继节点上的转发模式,作者利用提出在消息中加入应用层信息,使得参与转发的每个中间节点都可以缓存内容作分布式存储或执行应用相关的转发。

5 结论与展望

机会网络是一种不需要源节点和目标节点之间存在完整链路,利用节点移动带来的相遇机会实现通信的自组织网络.作为一种全新的组网方式,机会网络在很多领域存在着巨大的潜力,并对于实现未来普适计算具有重大影响。

本文对机会网络目前的研究进展进行了综述,期望本文的介绍能够推动相关领域学者对这一新兴技术的关注与研究.我们预计机会网络领域未来一段时间内研究的重点方向包括:(1) 由于手持设备的普及,结合社会网络理论研究手持设备形成的机会网络移动模型与高效转发机制的研究;(2) 设计机会网络与集中式网络,如蜂窝网或 WLAN 的混合式网络应用系统;(3) 结合特定应用,如水下传感器网络数据收集、车载网络信息分发等,研究跨应用层、网络层甚至 MAC 层等多层的优化通信协议;(4) 研究通用的机会通信中间件,以支持不同应用服务运行。

References:

- [1] Hull B, Bychkovsky V, Zhang Y, Chen K, Goraczko M, Miu A, Shih E, Balakrishnan H, Madden S. CarTel: A distributed mobile sensor computing system. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Boulder: ACM, 2006. 125–138.
- [2] Pan H, Chaintreau A, Scott J, Gass R, Crowcroft J, Diot C. Pocket switched networks and human mobility in conference environments. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Philadelphia: ACM, 2005. 244–251.
- [3] Juang P, Oki H, Wang Y, Martonosi M, Peh LS, Rubenstein D. Energy-Efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. In: Proc. of the 10th Int'l Conf. on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. New York: ACM, 2002. 96–107. DOI=<http://doi.acm.org/10.1145/605397.605408>
- [4] Pelusi L, Passarella A, Conti M. Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks. Communications Magazine, 2006,44(11):134–141.
- [5] Conti M, Giordano S. Multihop ad hoc networking: The reality. Communications Magazine, 2007,45(4):88–95.

- [6] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets. In: Proc. of the 2003 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. Karlsruhe: ACM, 2003. 27–34.
- [7] Akyildiz IF, Akan B, Chen C, Fang J, Su W. InterPlaNetary Internet: State-of-the-Art and research challenges. *Computer Networks*, 2003,43(2):75–112.
- [8] Gupta P, Kumar P. The capacity of wireless networks. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2000,46(2):388–404.
- [9] Grossglauser M, Tse DNC. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2002, 10(4):477–486.
- [10] Small T, Haas ZJ. The shared wireless infostation model: A new ad hoc networking paradigm (or where there is a whale, there is a way). In: Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking. Annapolis: ACM, 2003. 233–244.
- [11] Pentland A, Fletcher R, Hasson A. DakNet: Rethinking connectivity in developing nations. *Computer*, 2004,37(1):78–83.
- [12] Avri D, Maria U, and Durga PP. Providing connectivity to the Saami nomadic community. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Open Collaborative Design for Sustainable Innovation (dyd 02). Bangalore, 2002.
- [13] Brewer E, *et al.* Tier project. 2006. <http://tier.cs.berkeley.edu/wiki/Home>
- [14] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Philadelphia: ACM, 2005. 252–259.
- [15] Becker VD. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Technique Report, CS-2000-06, Department of Computer Science, Duke University, Durham, NC, 2000.
- [16] Wang Y, Jain S, Martonosi M, Fall K. Erasure-Coding based routing for opportunistic networks. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Philadelphia: ACM, 2005. 229–236.
- [17] Mitzenmacher M. Digital fountains: A survey and look forward. In: Information Theory Workshop. 2004. 271–276.
- [18] Chen L, Yu C, Sun T, Chen YC, Chu HH. A hybrid routing approach for opportunistic networks. In: Proc. of the 2006 SIGCOMM Workshop on Challenged Networks. Pisa: ACM, 2006. 213–220.
- [19] Widmer J, Boudec JL. Network coding for efficient communication in extreme networks. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Philadelphia: ACM, 2005. 284–291.
- [20] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C. Single-Copy routing in intermittently connected mobile networks. In: Proc. of the 2004 1st Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. 2004. 235–244.
- [21] LeBrun J, Chuah CN, Ghosal D, Zhang M. Knowledge-Based opportunistic forwarding in vehicular wireless ad hoc networks. In: Vehicular Technology Conf., the VTC 2005-Spring, Vol.4. 2005. 2289–2293.
- [22] Leguay J, Friedman T, Conan V. DTN routing in a mobility pattern space. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Philadelphia: ACM, 2005. 276–283.
- [23] Tan K, Zhang Q, Zhu W. Shortest path routing in partially connected ad hoc networks. In: Global Telecommunications Conf., the GLOBECOM 2003, Vol.2. 2003. 1038–1042.
- [24] Ramanathan R, Hansen R, Basu P, Rosales-Hain R, Krishnan R. Prioritized epidemic routing for opportunistic networks. In: Proc. of the 1st Int'l MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking. San Juan: ACM, 2007. 62–66.
- [25] Jones EPC, Li L, Ward PAS. Practical routing in delay-tolerant networks. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Philadelphia: ACM, 2005. 237–243.
- [26] Chen C, Chen Z. Evaluating contacts for routing in highly partitioned mobile networks. In: Proc. of the 1st Int'l MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking. San Juan: ACM, 2007. 17–24.
- [27] Musolesi M, Hailes S, Mascolo C. Adaptive routing for intermittently connected mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 6th IEEE Int'l Symp on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2005. 2005. 183–189.
- [28] Jacquet P, Mans B. Routing in intermittently connected networks: Age rumors in connected components. In: Proc. of the 5th Annual IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops, PerCom Workshops 2007. 2007. 53–58.
- [29] Lindgren A, Doria A, Schelén O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2003,7(3):19–20.
- [30] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Spray and focus: Efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and correlated mobility. In: Proc. of the IEEE PerCom Workshop on Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks. 2007.

- [31] Mascolo C, Musolesi M, Pásztor B. Opportunistic mobile sensor data collection with SCAR. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Boulder: ACM, 2006. 343–344.
- [32] Wang Y, Wu H. DFT-MSN: The Delay/Fault-Tolerant mobile sensor network for pervasive information gathering. In: Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications. 2006. 1–12.
- [33] Wang Y, Wu H. Replication-Based efficient data delivery scheme (red) for delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN). In: Proc. of the 4th Annual IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops, the PerCom Workshops 2006. 2006. 5.
- [34] Liao Y, Tan K, Zhang Z, Gao L. Estimation based erasure-coding routing in delay tolerant networks. In: Proc. of the 2006 Int'l Conf. on Wireless Communications and Mobile Computing. Vancouver: ACM, 2006. 557–562.
- [35] Shah R, Roy S, Jain S, Brunette W. Data MULEs: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. In: Proc. of the 1st IEEE, 2003 IEEE Int'l Workshop on Sensor Network Protocols and Applications. 2003. 30–41.
- [36] Zhao W, Ammar M, Zegura E. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 5th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Roppongi Hills: ACM, 2004. 187–198.
- [37] Zhao W, Ammar M, Zegura E. Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant network. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2005. Miami, 2005.
- [38] Broch J, Maltz DA, Johnson DB, Hu Y, Jetcheva J. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In: Proc. of the 4th Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Dallas: ACM, 1998. 85–97.
- [39] Bettstetter C. Mobility modeling in wireless networks: Categorization, smooth movement, and border effects. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001,5(3):55–66.
- [40] Small T, Haas ZJ. Resource and performance tradeoffs in delay-tolerant wireless networks. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Philadelphia: ACM, 2005. 260–267.
- [41] Jindal A, Psounis K. Performance analysis of epidemic routing under contention. In: Proc. of the 2006 Int'l Conf. on Wireless Communications and Mobile Computing. Vancouver: ACM, 2006. 539–544.
- [42] Eagle N, Pentland A. Reality mining: sensing complex social systems. Personal Ubiquitous Computing, 2006,10(4):255–268.
- [43] UCSD. Wireless topology discovery project, 2004. <http://sysnet.ucsd.edu/wtd/wtd.html>
- [44] Diot C, *et al.* Huggle project. 2004. <http://www.huggleproject.org>
- [45] Zhang X, Kurose J, Levine BN, Towsley D, Zhang H. Study of a bus-based disruption-tolerant network: Mobility modeling and impact on routing. In: Proc. of the 13th Annual ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Montréal: ACM, 2007. 195–206.
- [46] Cai H, Eun DY. Crossing over the bounded domain: from exponential to power-law inter-meeting time in MANET. In: Proc. of the 13th Annual ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Montréal: ACM, 2007. 159–170.
- [47] Musolesi M, Mascolo C. A community based mobility model for ad hoc network research. In: Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Multi-Hop Ad Hoc Networks: From Theory to Reality. New York: ACM, 31–38.
- [48] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Performance analysis of mobility-assisted routing. In: Proc. of the 7th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Florence: ACM, 2006. 49–60.
- [49] Hsu WJ, Spyropoulos T, Psounis K, Helmy A. Modeling time-variant user mobility in wireless mobile networks. In: Proc. of the 26th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications. IEEE, 2007. 758–766.
- [50] Hui P, Crowcroft J. How small labels create big improvements. In: Proc. of the 5th IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops. IEEE Computer Society, 2007. 65–70.
- [51] Daly EM, Haahr M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs. In: Proc. of the 8th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Montreal: ACM, 2007. 32–40.
- [52] <http://www.amillionpeople.net/>
- [53] Sollazzo G, Musolesi M, Mascolo C. TACO-DTN: A time-aware content-based dissemination system for delay tolerant networks. In: Proc. of the 1st Int'l MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking. San Juan: ACM, 2007. 83–90.
- [54] Leontiadis I, Mascolo C. Opportunistic spatio-temporal dissemination system for vehicular networks. In: Proc. of the 1st Int'l MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking. San Juan: ACM, 2007. 39–46.

- [55] Guidec F, Maheo Y. Opportunistic content-based dissemination in disconnected mobile Ad Hoc networks. In: Proc. of the UBIComm 2007 Int'l Conf. on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies. 2007. 49–54.
- [56] Roberto B, Leonardo Q. Content-Based routing in highly dynamic mobile Ad Hoc networks. *Pervasive Comput. & COMM*, 2005, V1(4):277–288.
- [57] Pan H, Leguay J, Crowcroft J, Scott J, Friedman T, Conan V. Osmosis in pocket switched networks. In: Proc. of the 1st Int'l Conf. on Communications and Networking in China, the ChinaCom 2006. 2006. 1–6.
- [58] Zhou Y, Levine BN, Croft WB. Distributed information retrieval for disruption-tolerant mobile networks. CIIR Technical Report, IR-412, University of Massachusetts Amherst, 2007.
- [59] Wolfson O, Xu B, Yin H, Cao H. Search-and-Discover in mobile P2P network databases. In: Proc. of the 26th IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems, ICDCS 2006. 2006. 65.
- [60] Scott J, Hui P, Crowcroft J, Diot C. Huggle: A networking architecture designed around mobile users. In: Proc. of the 3rd Annual IFIP Conf. on Wireless on-Demand Network Systems and Services (WONS 2006). Les Menuires, 2006.
- [61] Panagakis A, Vaios A, Stavrakakis I. On the effects of cooperation in DTNs. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Communication Systems Software and Middleware, the COMSWARE 2007. 2007. 1–6.
- [62] Defrawy KE, Zarki ME, Tsudik G. Incentive-Based cooperative and secure inter-personal networking. In: Proc. of the 1st Int'l MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking. San Juan: ACM, 2007. 57–61.
- [63] Buttyan L, Dora L, Felegyhazi M, Vajda I. Barter-Based cooperation in delay-tolerant personal wireless networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2007. 2007. 1–6.
- [64] Asokan N, Kostianen K, Ginzboorg P, Ott J, Luo C. Applicability of identity-based cryptography for disruption-tolerant networking. In: Proc. of the 1st Int'l MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking. San Juan: ACM, 2007. 52–56.
- [65] el Fawal A, le Boudec J, Salamatian K. Vulnerabilities in epidemic forwarding. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2007. 2007. 1–6.
- [66] Tan F, Ardon S, Ott M. UbiStore: Ubiquitous and opportunistic backup architecture. In: Proc. of the 5th IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops. IEEE Computer Society, 2007. 71–78.
- [67] Ott J, Pitkanen M. DTN-Based content storage and retrieval. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2007. 2007. 1–7, 18–21.



熊永平(1982—),男,江西丰城人,硕士,CCF 学生会员,主要研究领域为延迟容忍网络,传感器网络。



牛建伟(1969—),男,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究领域为嵌入式与移动计算,移动流媒体。



孙利民(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,无线接入网,多媒体技术。



刘燕(1971—),女,博士生,副教授,主要研究领域为计算机网络,软件工程。