

延迟容忍网络路由协议研究^{*}

张俊宝, 罗光春, 李 炯, 陈爱国

(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 成都 611731)

摘 要: 简介延迟容忍网络, 论述和追踪国内外延迟容忍网络路由协议的研究进展, 对现有的延迟容忍网络路由协议进行了分类研究, 着重介绍了一些经典路由协议, 对不同类别路由协议的特点和性能进行了分析和比较, 并详细介绍了冗余副本消除, 最后提出延迟容忍网络路由协议需要解决的问题和进一步的研究方向。

关键词: 延迟容忍网络; 路由; 副本消除

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)03-0808-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.03.002

Study on routing protocols in delay tolerant networks

ZHANG Jun-bao, LUO Guang-chun, LI Jiong, CHEN Ai-guo

(School of Computer Science & Engineering, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: This paper attempted to describe and track the latest research results of DTN routing protocols. It discussed the classification of existing routing protocols for DTNs. Then it presented a number of representative routing protocols, and also presented redundancy elimination issues. Finally, this paper proposed some research directions for future.

Key words: delay tolerant network (DTN); routing; redundancy elimination

传统的 TCP/IP 建立在一些假设基础之上, 如假设源节点与目标节点之间存在持续可用的连接等。随着无线移动通信技术的发展, 越来越多的网络违反了 TCP/IP 的一项或多项假设, 如深空通信网络、陆地移动网络等^[1]。为了开发星际间 Internet, NASA 于 1998 年建立 IPN (inter-planetary network)^[2] 项目, 后来发展成为 IPN SIG (Interplanetary Special Interest Group of the Internet Society)。其目标是定义架构和协议, 以在地球 Internet 和遥远的星球或宇宙飞船上的 Internet 之间进行互连互通。但是 IPN 项目的实验代价昂贵^[1]。

2003 年, Fall^[1] 提出延迟容忍网络 (DTN) 体系结构。DTN 继承了 IPN 的架构和一些协议, 同时吸取了 MANET (mobile Ad hoc network)、WSN (wireless sensor network) 的一些内容。DTN 拓展了 IPN 的应用范围, 覆盖了从深空通信到陆地移动通信的领域。从此以后, 对传感器网络和 MANET 不断增长的兴趣联合 DTN, 将研究扩展到了移动传感器网络、稀疏 MANET 等^[1,3]。

DTN 是一类间歇连接的网络。由于节点移动、能量管理等原因, 源节点和目标节点之间可能不存在一条完整的端到端路径; 网络拓扑动态变化, 导致传统的网络协议不能适用于该类网络。DTN 的链路有高延迟、低数据速率、间歇连接、长排队时间等特点; DTN 中节点的资源和寿命有限; 在 DTN 中经常遇到短暂的和持久的分割。许多网络应用都属于这一类, 如野生动物追踪、军事网络、灾难恢复和应急响应系统等^[1,3,4]。

近年来, DTN 已经吸引了很多研究者的关注。IRTF (Internet Research Task Force) 成立 DTNRG (Delay Tolerant Network

Research Group)^[5], 致力于研究 DTN 架构和协议设计原则, 以提供极端环境下可互操作的通信。DARPA (defense advanced research projects agency)^[6] 提出 disruption tolerant network, 大部分概念与 DTN 相似, 架构和协议可通用。DTN 体系结构不仅能够适应网络连接断开, 而且为处理异构网络提供了一个框架。IP 协议模型要求每个节点使用共同的网络层协议来支持异构, 而 DTN 可以互连一个较大网络的异构部分, 支持不同的寻址方式^[1,3,4]。DTNRG 已经制定了一系列 Internet RFC^[5]。

1 DTN 路由

由于 DTN 拓扑动态变化, 源节点和目标节点之间可能并不存在可用的连接, 获得全网拓扑信息的代价很高。因此, 传统网络的路由协议不适用于 DTN。针对 DTN 动态变化的本质, DTN 路由采用存储—携带—转发 (store-carry-and-forward) 的模式: 当一个节点产生或者收到消息时, 如果当前没有路径可以到达目标节点, 或者没有连接到达任意其他节点, 先缓存该消息, 直到有合适的通信机会才转发该消息^[7-9]。

与传统路由协议寻找最短路径不同, DTN 路由要解决的问题是: 什么时候, 转发给谁^[7-9]。近年来, DTN 路由已成为一个独立开放的研究领域^[3]。

1.1 路由性能度量

由于 DTN 通常由移动节点、电池供电的设备组成, DTN 路由的目标是以较少的资源消耗获得较高的消息交付率 (可靠性) 和较低的交付延迟。常用以下度量指标评估路由协议的

收稿日期: 2011-10-12; 修回日期: 2011-11-27 基金项目: 国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-10-0298); 四川省应用基础计划资助项目 (2010JY0113)

作者简介: 张俊宝 (1978-), 男, 河南巩义人, 博士研究生, 主要研究方向为延迟容忍网络、移动网络 (quards@sina.com); 罗光春 (1974-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为中间件技术、计算机网络和信息安全; 李炯 (1979-), 男, 讲师, 主要研究方向为软件工程; 陈爱国 (1981-), 男, 博士, 主要研究方向为软件分析。

性能;a)交付率(delivery ratio)^[7],成功到达目标节点的消息数量与网络中产生的消息总数之比;b)交付延迟(delivery delay)^[7],从源节点产生消息到目标节点第一次接收到该消息所经历的时间;c)资源消耗,消息传输过程中所消耗的网络资源,包括带宽、缓存、能量等,通常使用网络中消息在节点间传输的总次数度量资源消耗^[10]。

1.2 路由分类

根据每个消息在网络中传播的副本数量,已有路由协议可分为单副本路由和多副本路由。在单副本路由中,同一时间网络中只有一个节点携带同一消息,它降低了网络开销,但可靠性相对较低。在多副本路由中,同一时间网络中有多个节点携带同一消息的副本。由于DTN动态变化,多副本路由增加了消息到达目标节点的概率,降低了交付延迟,但消耗了大量网络资源。按照路由策略,其中多副本路由又可以分为基于复制的路由、基于社会行为的路由和基于编码的路由等^[11~14]。

根据节点是否有先验知识,已有路由协议可分为基于先验知识和无先验知识的路由。先验知识包括接触、缓存队列、流量等。按照路由策略,其中基于先验知识的路由协议可分为基于先验知识的路由和引入特殊节点的路由等。随着节点所拥有先验知识的增加,路由性能提升,但是完全的先验知识难以实现。在没有先验知识的情况下,无先验知识的路由采用随机或基于历史信息预测等方法进行路由决策^[11~14]。

1.3 相关术语

接触(contact)^[7]。DTN中一个基本概念,指一次通信机会。当两个节点进入彼此的无线通信范围时,就发生一次接触。

消息(message)^[11]。DTN中传输的数据单元称为消息。消息的集合称为bundle。

感染(infected)^[10]。如果一个节点有一个或多个消息副本,则称该节点被感染。

1.4 仿真

为了评估DTN路由协议的性能,常用的仿真工具为ONE(opportunistic network environment simulator)^[15],目前的版本是1.4.1。其他仿真工具有NS、MATLAB,也有研究者自行开发的仿真工具^[16]。

常用的移动模型有RD(random direction mobility model)、RWP(random waypoint mobility model)等^[15]。Spyropoulos等人^[17]分析了在常用移动模型下,不同节点间的预期相遇时间;另外,可以使用BonnMotion^[18]生成移动场景。研究者也采集了大量现实轨迹数据以供研究,如Infocom^[19]、RollerNet^[20]等。

2 典型路由协议

2.1 单副本路由

为限制消息副本数量,单副本路由在同一时间只在网络中保留消息的一个副本。单副本路由的开销低,资源利用率高,但通常交付延迟较大,并且不太可靠。

Direct transmission^[21]是最简单的单副本路由,每个源节点只将消息转发给目标节点。每个交付的消息只传输一次,从而总的传输次数最少。但是在间歇连接的网络中,交付率较低,交付延迟可能很大。

随机路由以概率 p 将消息移交给所遇到的节点。基于效

用的路由转交给目标节点效用值较高的节点。Seek and focus^[21]结合了随机路由和基于效用路由:如果当前效用值低于阈值,执行随机转发;如果收到消息的节点,其效用值大于阈值,则执行基于效用的转发。Seek and focus缓解了慢启动,并利用了基于效用的高效。

CAR^[22]使用卡尔曼滤波(Kalman filter)联合评估上下文的多个方面,从而作出路由决策。上下文信息是对节点行为的周期性度量,包括连接变化率、邻居节点到目标节点的交付概率以及设备信息,如电池剩余电量。当缓存容量比较小时,CAR的性能较好。

2.2 基于复制的路由

一般来说,单副本方案关于减少网络开销非常有效,但是,消息交付率通常较低,而交付延迟较高。提高传输性能的方法之一是对同一消息使用多副本,每个副本通过不同路径传输,从而增加交付的可能性,同时降低交付延迟。研究的难点在于如何确定在网络中传播的消息副本数量。

Epidemic^[23]是最基本的多副本路由协议,它以类似病毒感染的方式在网络中传播消息。当两个节点相遇时,相互交换彼此没有的消息。如果当前没有到达目标节点的可用路径,节点就缓存该消息。在没有竞争也就是资源无限的情况下,Epidemic以最快的速度传播消息副本,从而达到最小的交付延迟和最大的交付率。然而在实际中,由于网络资源有限,随着消息数量增加,对资源的竞争使得Epidemic的性能下降。同时,Epidemic消耗了大量网络资源,如带宽、缓存、能量等。

通过使用数学工具,研究者从不同方面分析了Epidemic路由的性能。Groenevelt等人^[24]使用马尔可夫模型,研究了Epidemic中存储和延迟的权衡。Zhang等人^[25]使用常微分方程,研究随节点密度增加Epidemic的交付延迟,获得了关于延迟的封闭形式表达式。为了减少资源消耗,在Epidemic的基础上,研究者提出了一些改进方案。

PROPHET^[26]是一种基于概率的路由协议。MANET中节点的移动并不像通常假设的那样,不是随机的;而且,基于重复行为模式,节点以一种可预测的方式移动。如果一个节点之前多次访问一个位置,该节点可能将再次访问该位置。根据以上观察,在PROPHET中,当两个节点相遇,它们交换概要向量(summary vectors),另外也交换交付可能性(delivery predictability)信息。节点只将消息转发给交付可能性较高的节点。

MaxProp^[27]和MV^[28]也使用了PROPHET所使用的节点间相遇频率。根据历史数据,MaxProp基于节点相遇的历史信息度量路径的可能性,并且基于到目标的路径可能性调度消息。当存储空间满时,基于路径可能性删除消息。在MV^[28]路由协议中,节点记录其路径及其在该路径上遇到的节点。每个节点为每个所遇到的节点存储一个变量,表示成功交付给该节点的可能性。当两个节点相遇时,各自设置到对方的交付概率为1。交付概率随时间增长而下降,并且周期性更新。

简单计数协议(simple counting protocol)^[29]根据最近接触中已接收到消息副本的节点数量自适应地丢弃或者传播消息,从而达到控制洪泛的目的。简单计数协议对一个消息的持续携带者或非携带者进行计数,以此决定是否丢弃或传播该消息。

在 (p,q) -Epidemic^[30]中,源节点以概率 q 转发消息给中继节点,感染的中继节点以概率 p 转发消息给其他中继节点。源节点和中继节点都以概率1转发消息给目标节点。当 $p=q=0$ 时,即为Direct transmission;当 $p=q=1$ 时,即为Epidemic。

当节点移动独立且随机、历史相遇信息无助于预测未来相遇时, (p, q) -Epidemic 会很有效。

Spray and wait^[31] 限制消息副本数量为一个固定配额, 将消息传输过程分为 spray 和 wait 阶段。在消息产生的时候即确定了其在网络中传播的副本数量 L 。在 spray 阶段(binary spray), 当有消息副本的节点遇到无该消息的节点时, 该节点会将所携带消息副本的一半转发给对方节点, 自己保留剩余的一半, 直到所携带消息副本数量为 1 才停止复制。如果消息未到达目标, 则进入 wait 阶段, 携带该消息的节点只将消息转发给目标。Wait 阶段类似于 Direct transmission。Spray and wait 兼有 Epidemic 的健壮性和 Direct transmission 的简单性, Binary spray 在所有 spray 方案中有最小的预期延迟。Spray and focus^[10] 在 focus 阶段将消息转发给有较高效用值的节点, 而不是单纯等待。

在 Spray and wait 的基础上, 研究者提出了一些改进。OR-WAR^[32] 利用上下文信息计算接触窗口, 以效用值/位的顺序复制消息; SMART^[33] 利用频繁遇到目标的节点以增加交付的机会; Multiperiod spraying^[16] 将 Spray and wait 的单个 spray 阶段扩展为多个, 希望在达到预期交付延迟的同时, 有效地利用资源。

基于 Spray and wait 的路由协议都是在网络中传播固定配额的消息副本, 但是固定配额不一定能适应网络的动态变化。Density-aware spray-and-wait^[34] 提出由每个节点动态选择副本数量以适应网络动态变化。在分析 RollerNet 轨迹的基础上, 建立查找表, 每个节点根据其度(在一个时间间隔内的通信机会数目)动态选择适当的副本数量, 以适应网络变化, 达到预期延迟。

一些研究者^[35, 36] 从资源分配的角度处理 DTN 路由。其中 RAPID^[36] 考虑了存储器和带宽的限制。RAPID 采集关于网络资源的信息, 利用一个效用函数决定转发哪个消息。效用函数考虑了最小化最大延迟、最小化平均延迟、增加在最后期限内到达目标节点的消息数量三个度量之一。RAPID 未讨论能量消耗问题, 并且对每个消息计算效用函数可能导致可扩展性问题。

2.3 基于社会行为的路由

研究者在 DTN 中观察到一些社会网络属性^[37, 38], 如 PSN (pocket switched networks)、mobile social networks。社会关系随时间变化趋向稳定, 社会网络分析是一种有吸引力的提高 DTN 路由性能的技术。

SimBetTS^[37] 首次将社会网络分析引入 DTN 路由, 定义了节点的中心性, 包括度中心性、中介中心性以及相似性等。基于节点过去交互的社会分析度量节点的中心性、相似度, 在此基础上建立效用函数, 有效传输消息。

SimBetAge^[39] 在 SimBetTS 的基础上, 由于社会关系随时间变化, 引入老化因子。针对 SimBetTS 的不足, 重新定义了相似性, 并引入 flow betweenness、directed betweenness 等度量, 以处理社会网络的动态并调整社会网络度量。

在社会网络中, 节点之间可能形成社区。社区的形成可能会影响节点的路由决策。BUBBLE^[38] 假设每个节点有全局和本地两个排序, 分别代表节点在全社会的排名和在其所属社区的排名。两个节点相遇时, 如果两者都不属于目标所在社区, 则消息转发给全局排名(global ranking)较高的节点; 如果所遇节点和目标节点位于同一社区, 则消息转发给本地排名(local

ranking)较高的节点。这样, 消息到达目标的概率增加。

Bulut 等人^[40] 分析了社会网络中节点的分组(社区)行为, 一些节点相遇比其他节点频繁。消息只在源节点所在社区和目标节点所在社区传播, 并且传播的副本数量分别为 L_{in} 、 L_{out} 。LocalCom^[41] 是以社区为基础的感染转发方案。首先, 使用节点的本地信息检测网络的社区结构, 然后, 该消息通过网关被转发到每个社区。

鉴于之前对节点关系的单一度量在精确表示节点间转发机会存在的不足, 如相遇频率、接触时间、分离时间等, Bulut 等人^[42] 提出一种新的度量 SPM (social pressure metric), 在此基础上形成朋友社区。如果所遇节点和目标节点位于同一朋友社区, 并且该节点是目标节点一个较强的朋友, 则转发消息给该节点。

此外, 其他一些研究考虑了社会网络的一些有趣的性质。Zhou 等人^[43] 处理了节点从习惯性活动的不规则偏离。结果表明, 通过在网络中散播消息的多个副本, 即使偏离的节点也至少会接近携带副本的节点之一, 从而提高最坏情况下的路由性能。Li 等人^[44] 研究了节点在社交中的自私行为对路由的影响。

2.4 基于编码的路由

为了应对无线信道的损失, 研究者建议在无线 Ad hoc 网络 and DTNs 中使用擦除编码和网络编码技术。

擦除编码^[45] 的基本思路是将一原始消息编码为大量编码块。假设原始消息包含 k 块, 使用擦除编码, 消息编码为 n ($n > K$) 块, 如果收到 k 或更多的 n 块, 原始消息可以成功解码。在这里, $r = n/k$ 称为复制因素, 它决定了冗余的程度。每个编码块在网络中独立传输。

网络编码^[46] 来自于信息论, 是指网络中的节点在转发消息之前对消息进行一些运算, 而不是简单地转发接收到的数据。网络编码应用于路由可以进一步提高系统的吞吐量。

2.5 基于先验知识的路由

当有网络的全部或部分先验知识时, 可采用基于先验知识的路由。然而在间歇连接的网络中, 实现先验知识的代价很高。

Jain 等人^[7] 将 DTN 路由形式化为一个有向多图, 其中可能有多条边存在于一对节点间。之所以存在这样的多条边, 是因为可能有多个不同的物理连接或网络链路只在不同的时间可用。通过使用不同层次关于接触、缓存队列、流量需求(traffic demand)的先验知识作出路由决策。根据先验知识的多少, 作者定义了先验知识的各个层次。根据不同的先验知识层次, 提出相应的路由协议^[7]: First contact (FC), 节点没有先验知识, 源节点将消息转发给第一个遇到的节点, 然后等待和目标节点相遇; MED (minimum expected delay), 有接触的概要知识, 基于平均等待时间计算随时间变化的边的代价, 用最短路径算法(Dijkstra)选择要转发的节点; Earliest delivery (ED), 有接触的先验知识, 由源节点确定消息转发的路径; Earliest delivery with local queuing (EDLQ), 有接触和本地队列的先验知识, 与 ED 不同, EDLQ 结合本地队列信息逐跳路由; Earliest delivery with all queues (EDAQ), 有接触和所有队列的先验知识, 与 ED 相同, EDAQ 是源路由, 并且节点为消息保留缓存; Linear programming (LP), 有接触、所有队列和流量的先验知识, 采用线性规划方法; Jones 等人^[47] 提出 MEED (minimum estimated expected delay), 是 MED^[7] 的一个变体, 不同于 MED, MEED 使用观察到的接触历史计算预期等待时间。

2.6 引入特殊节点的路由

为在网络中提供连接,部署一些特殊的节点。静态低能量的传感器稀疏地部署在网络中,以采集各种形式的数据。一些移动节点 data mule^[48]在这些传感器之间移动,收集传感器采集的数据,然后将消息交付给有线访问点。Data mules 有大容量缓存,经历长期与网络中其他节点的分离。作者假设网络中只有静态传感器节点,data mules 之间不交换数据,高可靠性以高存储需求为代价。

假设关于节点移动和连接的先验知识。引入规划路线策略,使用在预定义路线上移动的消息 ferry^[49]提供通信服务。Message ferries 预定义路线移动以联系节点,或者节点在一个特定时间移动至接近于预定义的轨迹位置以交换消息。

Throwbox^[50]是小且便宜的设备,由电池供电,装备了无线接口和存储器,有处理能力,作为静态路由器部署。通过在移动节点间中继数据,Throwboxes 能增加数据传输机会。

3 冗余副本消除

多副本路由协议在网络中传播消息的多个副本。当消息成功到达目标节点后,该消息的副本仍然会被源节点和中继节点携带。这些冗余副本消耗了有限的网络资源。如果没有被通知消息已经到达目标节点,节点会继续携带和转发该消息^[29,35]。由于网络的间歇连接,从网络中消除已经成功交付消息的冗余副本是很困难的。对于多副本路由协议,这是一个重要的问题。研究者已经提出了一些冗余副本消除方案,或者称之为恢复方案^[25]。研究的难点在于如何应对冗余消息副本数量的动态变化。

冗余副本消除的目标是以较小的开销,从网络中消除已经交付的消息副本,且不依赖于具体的路由协议。根据冗余副本消除方案是否使用确认,将已存的副本消除方案分为基于 ACK 和无 ACK^[30]两类。

3.1 无 ACK 的冗余副本消除

无 ACK 的冗余副本消除方案不使用 ACK,而是基于阈值,如 JUST_TTL^[35]、threshold-based^[51]。如果达到阈值,节点则丢掉该消息副本。然而,如何确定恰当的阈值是研究的难点。

JUST_TTL^[33]是最简单的方法,从消息产生到当前所经历的时间达到阈值时,将丢掉该消息。Threshold-based^[51]是当节点收到一个新消息,为该消息设立一个计数器。节点遇到其他携带该消息的节点时,计数器加1。当计数器值达到阈值时,节点删除该消息,且不再接收该消息。其他携带该消息的节点遇到这个节点时,其计数器仍加1。

3.2 基于 ACK 的冗余副本消除

基于 ACK 的冗余副本消除方案使用 ACK 通知感染的节点该消息已经交付,包括两个部分:a)通知,当目标节点第一次收到一条消息,它产生一个相应的 ACK,在网络中分发该 ACK;b)消除,不管节点是否被感染,收到 ACK 的节点都不会再次接收该消息,如果节点被感染了,它们也会从缓存中丢掉该消息。根据传播 ACK 的方式,已有的基于 ACK 的方案可以分为基于洪泛和基于广播两类。

当目标节点收到消息后,VACCINE^[35]在网络中洪泛该消息的 ACK,收到 ACK 的节点,如果有该消息,则从缓存中删除,所有收到 ACK 的节点不再接收该消息。类似的方案还有 FULL_ERASE、IMMUNE、IMMUNE_TX 等^[35]。

Bulut 等人^[16]提出基于广播的方案。每个节点装备较大功率的无线设备,当目标节点接收到消息时,目标节点并不是立即广播 ACK,而是一直等到所接收消息最接近的阶段改变时间 x_d 。到那时,目标在全网广播所有接收到消息的 ACK。虽然广播 ACK 的时间有所延迟,但是在交付之后所收到消息的扩散得到了抑制。基于广播的副本消除方案的性能接近最优,只是需要大功率无线设备的支持。

4 DTN 路由展望

基于已有工作和 DTN 的特征,在 DTN 路由领域仍有许多研究的问题有待解决,下面列出了一些应该解决的问题。

在 DTN 中设计一个路由协议的关键问题是,针对不同的应用场景确定相应的目标,如短交付延迟,或系统吞吐量等。另一个相关的问题是,如何才能界定在这种间歇性连接网络中的系统容量^[3,9]。

应制定方法以确定有多少个节点转发,这是一个折中。转发的节点数量越大,消息就有更好的机会到达目标节点,但是需要更多的网络资源(如带宽、缓存空间和能量等)。应该开发分析模型以量化权衡。

当在网络中有消息的多个副本时,重复的消息副本产生了,需要消除不必要的副本以减少缓存占用,但需要确定:在哪里进行冗余副本消除,是目标节点或中间节点,以及如何消除冗余副本;当目标节点成功收到消息后,如何通知中间节点丢弃这些消息,而通知中间节点需要额外的资源;其次,还有效率和额外开销之间的权衡。调度在 DTN 中比在传统网络中要复杂得多,因为 DTN 是间歇性连接,应该开发适当的缓存管理方案(当缓存满时丢掉哪些消息)和调度。在 DTN 中存在消息分片的问题。带宽有限,同时由于节点移动、连接时间有限,如果不能在连接断开之前传输完成一个完整的消息,应该开发适当的分片、重组方案^[7]。

5 结束语

近年来,DTN 路由已经发展成为一个独立健康的研究领域。研究者已经提出许多优秀的方法,以在 DTN 中有效可靠地传输数据。在网络性能和资源需求方面,每种方法都有其自身的优势和不足。在有网络先验知识的情况下开发的路由协议,其性能可作为网络性能的上限,对随机情形下的协议设计也是一种指引。具有高移动性和小无线电范围内的无线网络将成为一种普遍的现象。DTN 路由的研究,仍有许多开放问题需要解决,这些问题必须得到充分理解和研究。

参考文献:

- [1] FALL K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets [C]//Proc of SIGCOMM. New York:ACM Press,2003:27-34.
- [2] Inter Planetary Internet [EB/OL]. [2011-10-25]. <http://www.ipnsig.org>.
- [3] FALL K, FARRELL S. DTN: an architectural retrospective [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26 (5): 828-836.
- [4] 樊秀梅,单志广,张宝贤,等. 容迟网络体系结构及其关键技术研究[J]. 电子学报, 2008, 36(1): 161-170.
- [5] Delay tolerant networking research group [EB/OL]. [2011-10-25]. <http://www.dtnrg.org/>.
- [6] Disruption tolerant networking [EB/OL]. [2011-10-25]. <http://www.darpa.mil/ato/solicit/DTN/>.

- [7] JAIN S, FALL K, PATRA R. Routing in a delay tolerant network [C]//Proc of SIGCOMM. New York: ACM Press, 2004: 145-157.
- [8] JONES E, WARD P. Routing strategies for delay-tolerant networks [C]//Proc of International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, 2006.
- [9] SPYROPOULOS T, RAIS R, TURLETTI T, *et al.* Routing for disruption tolerant networks: taxonomy and design [J]. *Wireless Networks*, 2010, 16(8): 2349-2370.
- [10] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multiple-copy case [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2008, 16(1): 77-90.
- [11] ZHANG Z. Routing in intermittently connected mobile Ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2006, 8(1): 24-37.
- [12] PSARAS I, WOOD L, TAFAZOLLI R. Delay-/disruption-tolerant networking: state of the art and future challenges [R]. Guildford: University of Surrey, 2010.
- [13] 肖明军, 黄刘生. 容迟网络路由算法 [J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(7): 1065-1073.
- [14] 熊永平, 孙利民, 牛建伟, 等. 机会网络 [J]. 软件学报, 2009, 20(1): 124-137.
- [15] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKKÄINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation [C]//Proc of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques, 2009: 55-65.
- [16] BULUT E, WANG Z, SZYMANSKI B K. Cost-effective multiperiod spraying for routing in delay-tolerant networks [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2010, 18(5): 1530-1543.
- [17] SPYROPOULOS T, KONSTANTINOS P, CAULIGI S R. Performance analysis of mobility-assisted routing [C]//Proc of the 7th International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing, 2006: 49-60.
- [18] BonnMotion [EB/OL]. [2011-10-25]. <http://net.cs.uni-bonn.de/wg/cs/applications/bonnmotion/>.
- [19] CRAWDAD [EB/OL]. [2011-10-25]. <http://crawdad.cs.dartmouth.edu/data.php>.
- [20] RollerNet [EB/OL]. [2011-10-25]. <http://rollernet.lip6.fr>.
- [21] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the single-copy case [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2008, 16(1): 63-76.
- [22] MUSOLESI M, MASCOLO C. CAR: context-aware adaptive routing for delay-tolerant mobile networks [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2008, 8(2): 246-260.
- [23] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially connected Ad hoc networks, CS-2000-06 [R]. Durham: Duke University, 2000.
- [24] GROENEVELT R, NAIN P, KOOLE G. The message delay in mobile Ad hoc networks [J]. *Performance Evaluation*, 2005, 62(1-4): 210-228.
- [25] ZHANG X, NEGLIA G, KUROSE J, *et al.* Performance modeling of epidemic routing [J]. *Computer Networks*, 2007, 51(10): 2867-2891.
- [26] LINDGREN A, DORIA A, SCHELÉN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2003, 7(3): 19-20.
- [27] BURGESS J, GALLAGHER B, JENSEN D, *et al.* MaxProp: routing for vehicle-based disruption-tolerant networks [C]//Proc of IEEE INFOCOM, 2006: 1-11.
- [28] BURNS B, BROCK O, LEVINE B N. MV routing and capacity building in disruption tolerant networks [C]//Proc of IEEE INFOCOM, 2005: 398-408.
- [29] WALKER B, GLENN J, CLANCY T. Analysis of simple counting protocols for delay-tolerant networks [C]//Proc of MOBICOM Workshop on Challenged Network, 2007: 19-26.
- [30] MATSUDA T, TAKINE T. (p, q) -Epidemic routing for sparsely populated mobile Ad hoc networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(5): 783-793.
- [31] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C, *et al.* Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks [C]//Proc of SIGCOMM. New York: ACM Press, 2005: 252-259.
- [32] SANDULESCU G, NADJM-TEHRANI S. Opportunistic DTN routing with window-aware adaptive replication [C]//Proc of Asian Internet Engineering Conference, 2008: 103-112.
- [33] TANG L, ZHENG Q, LIU J, *et al.* Selective message forwarding in delay tolerant networks [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2009, 14(4): 387-400.
- [34] TOURNOUX P U, LEGUAY J, BENBADIS F, *et al.* The accordion phenomenon: analysis, characterization, and impact on DTN routing [C]//Proc of IEEE INFOCOM, 2009: 1116-1124.
- [35] SMALL T, HAAS Z. Resource and performance tradeoffs in delay-tolerant wireless networks [C]//Proc of SIGCOMM, 2005: 260-267.
- [36] BALASUBRAMANIAN A, LEVINE B, VENKATARAMANI A. DTN routing as a resource allocation problem [C]//Proc of SIGCOMM. New York: ACM Press, 2007: 373-384.
- [37] DALY E M, HAAHR M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs [C]//Proc of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing, 2007: 32-40.
- [38] HUI P, CROWCROFT J, YONEKI E. BUBBLE rap: social-based forwarding in delay tolerant networks [C]//Proc of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing, 2008: 241-250.
- [39] BITSCH LINK J Á, VIOL N, GOLIATH A, *et al.* SimBetAge: utilizing temporal changes in social networks for pocket switched networks [C]//Proc of the 1st ACM Workshop on User-Provided Networking: Challenges and Opportunities, 2009: 13-18.
- [40] BULUT E, WANG Z, SZYMANSKI B. Impact of social networks on delay tolerant routing [C]//Proc of IEEE GLOBECOM, 2009.
- [41] LI Feng, WU Jie. LocalCom: a community-based epidemic forwarding scheme in disruption-tolerant networks [C]//Proc of IEEE SEC-ON, 2009: 1-9.
- [42] BULUT E, SZYMANSKI B K. Friendship based routing in delay tolerant mobile social networks [C]//Proc of IEEE GLOBECOM, 2010: 1-5.
- [43] ZHOU Tong, CHOUDHURY R, CHAKRABARTY K. Diverse routing: exploiting social behavior for routing in delay-tolerant networks [C]//Proc of International Conference on Computational Science and Engineering, 2009: 1115-1122.
- [44] LI Q, ZHU S, CAO G. Routing in socially selfish delay tolerant networks [C]//Proc of IEEE INFOCOM, 2010.
- [45] WANG Y, JAIN S, MARTONOSI M, *et al.* Erasure-coding based routing for opportunistic networks [C]//Proc of SIGCOMM. New York: ACM Press, 2005: 229-236.
- [46] WIDMER J, LE BOUDEC J Y. Network coding for efficient communication in extreme networks [C]//Proc of SIGCOMM. New York: ACM Press, 2005: 284-291.
- [47] JONES E, LI L, WARD P. Practical routing in delay-tolerant networks [C]//Proc of SIGCOMM. New York: ACM Press, 2005: 237-243.
- [48] SHAH R C, ROY S, JAIN S, *et al.* Data mules: modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks [J]. *Ad hoc Networks*, 2003, 1(2-3): 215-233.
- [49] ZHAO Wen-rui, AMMAR M, ZEGURA E. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile Ad hoc networks [C]//Proc of MobiHoc, 2004: 187-198.
- [50] ZHAO Wen-rui, CHEN Yang, AMMAR M, *et al.* Capacity enhancement using throwboxes in DTNs [C]//Proc of IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor System, 2007: 31-40.
- [51] YU Hai-zheng, BIAN Hong. Threshold-based message copies control in delay tolerant networks [J]. *Journal of Networks*, 2011, 6(1): 96-103.