

容迟容断网络路由协议研究*

田成平¹, 慈林林^{1,2}, 程 宾¹, 赵守俊²

¹(北京理工大学 计算机学院, 北京 100081)

²(第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

通讯作者: 田成平, E-mail: chengpingtian85@gmail.com

摘 要: 容迟容断网络近年来得到了广泛的研究和应用. 容迟容断网络中源节点和目的节点之间不存在持续稳定的端到端路径, 因而传统网络的路由协议无法适用于容迟容断网络. 为了完成容迟容断网络消息传输, 采用基于存储-转发的路由机制. 容迟容断网络路由协议性能受链路生存时间、节点缓存大小以及网络中节点移动模型等影响. 对容迟容断网络路由协议的研究和进展进行了较为深入的探讨, 对主要路由协议的性能进行了比较, 并总结了未来的研究方向.

关键词: 容迟容断网络; 挑战性网络; 路由协议

中文引用格式: 田成平, 慈林林, 程宾, 赵守俊. 容迟容断网络路由协议研究. 软件学报, 2013, 24(Suppl. (1)): 134-147. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13015.htm>

英文引用格式: Tian CP, Ci LL, Cheng B, Zhao SJ. Research on routing protocols on delay/disruption tolerant networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(Suppl. (1)): 134-147 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13015.htm>

Research on Routing Protocols on Delay/Disruption Tolerant Networks

TIAN Cheng-Ping¹, CI Lin-Lin^{1,2}, CHENG Bin¹, ZHAO Shou-Jun²

¹(School of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

²(Second Artillery Equipment Academy, Beijing 100085)

Corresponding author: TIAN Cheng-Ping, E-mail: chengpingtian85@gmail.com

Abstract: The delay tolerant network has been extensively studied and applied in recent years. When there is continuing and stable end-to-end path between the source node and the destination node in DTN, the traditional TCP/IP based network routing protocols cannot be applied to Delay/Disruption Tolerant Network. The storage-forward policy is used for message transmission. The performance of DTN routing protocols is influenced by the link existent time, buffer size of the nodes, and the mobility mode of the network. This paper discusses the study of DTN routing protocols, compare their performance, and highlight the future trends of DTN routing protocols.

Key words: delay/disruption tolerant network; challenged network; routing protocol

随着无线网络技术的发展, 一些新的无线网络技术应用于解决各种实际问题, 诞生了诸如星际通信^[1-5]、社会网络(social network)^[6]、移动车载网(vehicular ad hoc network, 简称 VANET)^[7,8]、应急通信^[9,10]、战术通信网^[11]、水下传感器网^[12-14]、野生动物监测传感器网络^[15-17]、乡村通信网络^[18,19]等新型无线网络. 这些网络中, 由于节点分布稀疏、节点高速移动、障碍物遮挡、通信链路质量差及遭受恶意攻击等造成网络的连通性难以保证, 节点之间不能维持稳定的端到端连接. 而传统无线网络中, 数据传输依赖于稳定的端到端连接, 网络的路由、拥塞控制和安全等都以此为基础. 因而传统无线网络中的诸多协议并不适用于这些新型无线网络^[20,21]. 故而设计一整套适合这种类型网络的通信协议就成为重要的研究内容.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61063042); 中国博士后基金(201104753); 国家部委预研基金(513150802)

收稿时间: 2013-05-02; 定稿时间: 2013-08-22

容迟容断网络(delay/disruption tolerant network,简称 DTN)^[22]又称为间歇性连接网络(intermittently connected network)^[23]、机会网络(opportunistic network)^[24]、受限网络(challenged network)^[25]。其研究起源于 20 世纪 90 年代末的星际网络互联。IRTF(Internet Research Task Force)成立了 IPNRG(Interplanetary Internet Research Group),提出了 IPN 的基本体系结构^[26]。

为了更好地研究这种受限网络环境下的数据传输,在星际网络研究组(IPNRG)的基础上成立了新的研究小组——容迟网络研究小组(Delay-Tolerant Network Research Group,简称 DTNRG)。DTNRG 继承了 IPNSIG 的许多研究成果,并且由 Internet 工程任务组(Internet Engineering Task Force)分别给出了容迟网络体系结构^[27]和 Bundle 协议格式^[28]。

2002 年, Fall 将 IPN 中的思想用于设计地面网络,随后在 2003 年的 SIGCOMM 会议上首次提出容迟网络概念^[22]。2004 年美国国防部下属的高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency,简称 DARPA)提出了中断容忍网络(disruption-tolerant network)的概念,也简称为 DTN,侧重于解决通信链路频繁中断情况下网络的通信问题。在后来的研究中,容迟网络和容断网络并不严格区分,统称为容迟容断网络(delay/disruption-tolerant network)。2007 年, NASA 决定正式采用容迟容断网络(DTN)作为用于间断连通网络传送数据的新协议, NSF, NSA, DARPA, OSD 和 NASA 等机构将对 DTN 的研究进行资助。近年来,成立了 SIGCOMM/WDTN, ICWS/DTN, MOBICOM/CHANTS 等研究小组等供研究者交流。

1 DTN 路由协议概述

1.1 DTN 特点

不同于传统的 Internet,容迟容断网络的提出是为了解决不存在持续稳定的端到端路径,间歇连接性网络中的数据通信问题,具有以下基本特点:

(1) 间歇连接性

DTN 中,节点间不存在持续稳定的端到端路径,即使偶然出现少量的端到端路径,也可能会频繁断开,网络处于间断连通状态。造成端到端路径频繁中断的原因很多,比如节点的快速移动导致 DTN 拓扑快速变化而产生的连接中断,也可能是由于信道质量差或非缺陷(non-faulty)引起的链路中断。相对而言,大多数的端到端路径断开与连接是没有规律可循的、不可预测的。某些情况下,链路中断时间可能甚至比连通时间更长,造成部分节点与网络中其他节点完全隔离,引起网络分割。

(2) 长可变延时和低数据率

网络数据传输延时一般可用数据包从源节点到目的节点的路径上每一跳链路的延时总和来表示,它包括消息发送传输时间、处理时间、传播时间、排队时间以及等待中断链路恢复的时间。

DTN 的受限特性决定了其较低的信道传输速率,数据率在很大程度上可能是不对称的,因此消息发送延时和传输延时要比传统网络大;同时由于传输速率低,等待其他消息传输的排队延时也会较大;在等待延时方面,由于链路频繁中断,等待节点间的链路恢复所需的延时可变并且可能会非常大,从几秒到几个小时甚至几天。影响网络延时的几个要素中,DTN 都比传统网络大,特别是等待延时,它在传统网络里可以忽略,但在 DTN 中却非常大。因此,DTN 中的消息投递延时远大于传统网络,往往要大几个数量级^[29]。

(3) 高误码率

在星际网络等典型的 DTN 场景下,通信信道质量较差而且易受干扰,很容易出现误码^[22]。在传统网络中,解决误码的方法通常是自动重传请求(automatic repeat request,简称 ARQ),但在 DTN 中,由于不稳定的端到端路径导致往返延时很大,ARQ 不能有效解决误码,因此误码率要远高于传统网络^[5]。在这种情况下,逐跳(hop-by-hop)重传机制要优于端到端的重传机制。

(4) 节点资源有限

DTN 中节点的处理能力、存储能力和能量等都有限,例如军用 Ad Hoc 网络中节点移动快,并且节点间的通信易受外界干扰。为了完成消息投递,节点需要将接收到的消息缓存较长时间,会占用节点宝贵的缓存空

间;对于传感器节点来说,由于便携性及成本控制等方面的因素,其处理能力、缓存和能量都非常有限.如果缓存过多的待传输消息以及与周围节点频繁地中断/建立连接,将消耗更多的节点能量以及宝贵的缓存资源.

(5) 安全性

对于链路资源非常宝贵的 DTN 来说,端到端的安全策略不具可行性,原因是端到端的安全策略一般在开始传输数据之前执行某种形式的端到端密钥认证与交换,而容迟容断网络中由于不存在持续稳定的端到端路径,端到端的密钥认证机制无法正常工作.且容迟容断网络中链路资源有限,因此通过增加特殊业务流来验证网络中节点间的安全性是不切实际的.

1.2 DTN路由协议综述

自容迟容断网络概念诞生以来,国内外许多研究人员进行了大量的研究工作.目前,对于容迟容断网络的研究主要集中在体系结构、路由、拥塞控制、安全和应用等方面,其中容迟容断网络路由技术是研究的难点和重点.由于容迟容断网络具有间歇连接性、高误码率、低数据率等特点,现有的有线网络和 Ad Hoc 网络路由协议都不能直接应用于容迟容断网络之中.因此,研究人员针对此问题提出了许多适合不同 DTN 场景的路由协议.

容迟容断网络的路由协议的目标就是在考虑网络特性条件下最大化消息投递率,减小消息的传输时延.首先,考虑网络中节点间通信链路的可用性.在星际网络中,由于星球的自转和公转导致网络中节点间通信链路的中断.但这种链路的断开与连接是可预测的,网络中接触(contact)是被称为预定的或可预测的^[30].相反,在灾难恢复网络之中,紧急救援人员的通信实体的未来移动位置是不可预知的,此时节点间的接触被称为间歇性或投机性接触.再者,必须考虑到节点的移动.某些情况下,网络中的一些移动节点可以用以设计路由算法,将符合某些移动方向要求的节点作为数据骡子(data mule)^[31],这种特殊节点是两个非相邻节点之间传递数据的载体.第三,还必须考虑网络中资源的可用性.在许多容迟容断网络环境中,节点的存储空间,数据传输速率和能量等方面都受到一定的限制.路由协议必须考虑如何充分利用有限的网络资源来最大限度地提高协议的性能.

容迟容断网络主动路由协议是在全局 DTN 网络中的一个连通区域图中计算路由,试图维护一个路由表来为数据转发提供支持,但实际上不可行.因为网络通信链路会经常中断,维护这样一个路由表并不实际.而 AODV 和 DSR^[32]这类被动路由协议是只在有消息需要转发到目的节点时才进行寻路,又称按需路由协议.

源端路由是指在消息的源节点处就进行路由选择,确定消息成功到达目的节点的路径,并且数据转发过程中路径不会改变.如果数据转发失败,只能在源端重新进行路由选择过程.而逐跳路由是在消息传输过程中的每一个节点处进行下一跳的路由选择.对于容迟容断网络的间歇连通特性,被动路由算法的性能会更好.

研究者将网络编码技术引入进行网络路由决策,称为基于编码的路由机制^[33-38].其基本思想是待转发的消息通过一定的网络编码规则重新编码后再进行转发,当目的节点成功接收一定数量编码后的数据就可以解码恢复原始的数据包.基于网络编码的路由协议优点是使用较小的网络开销,每次重传消息编码后的分片而不是整个数据包的副本,这就极大地减小了网络带宽资源的消耗,适用于节点缓存、链路资源受限的网络环境.

基于拓扑的路由协议使用网络中节点之间的连接信息寻路,要求必须及时更新并保持节点的拓扑连接信息甚至全局路由表,对于资源有限的 DTN 网络负载较大.而基于位置的路由协议使用节点地理位置信息进行路由决策,节点的路由选择基于对目标节点的位置判断和当前节点的位置信息,网络中每个节点只需保持并更新自身节点的邻居节点位置信息即可.基于位置的路由协议需要维护较少的网络信息并且不需要建立和维护全局路由表,因此,使用基于位置的 DTN 路由算法可大幅减少网络负载.

2 DTN 主要路由协议分析

2.1 单副本路由协议

为了限制消息副本数量,单副本路由协议同一时间只在网络中保留消息的一个副本,当节点接收到消息后,原保管节点将删除所缓存的消息副本.单副本路由的开销低,资源利用率高,但通常交付延迟较大,并且可靠性较低.

Direct transmission^[39]是最简单的单副本路由,每个源节点只将消息转发给目的节点.每个消息只传输 1 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 将消息转发给遇到的节点.基于效用的路由转交消息给效用值较高的目标节点. Seek and focus^[40]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,则执行随机转发;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.

CAR^[41]使用卡尔曼滤波(Kalman filter)联合评估上下文的多个方面,从而做出路由决策.上下文信息是对节点行为的周期性度量,包括连接变化率、邻居节点到目的节点的交付概率以及设备信息,如电池剩余电量.当节点缓存容量比较小时,CAR 的性能较好.

2.2 基于复制的路由协议

一般来说,单副本的路由算法对于减少网络开销非常有效,但是,消息投递率通常较低,而传输延迟较高.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,从而提高消息传输的成功率,同时减小传输延迟.研究的难点在于如何确定在网络中传播的消息副本数量以避免发生拥塞和考虑包括带宽、存储空间和能量等网络资源消耗之间的平衡.

泛洪(epidemic)^[42]是最基本的多副本路由协议.它以类似于病毒感染的方式在网络中传播消息.当两个节点相遇时,相互交换彼此缓存中没有的消息.最终网络中每个节点都携带相同的消息.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.这样无限制的泛洪会给网络带来极大的开销,它严重依赖于节点缓存空间以及通信链路的带宽.假设网络带宽及存储资源无限的情况下,泛洪路由算法以最快的速度传播消息副本,可以达到最高的消息投递率和相对可观的端到端延时.然而在实际网络环境中,网络资源有限,泛洪算法的关键假设并不成立,由于网络中消息拷贝数量的增加,可能导致网络拥塞,由于存储空间用尽而丢弃消息,造成网络性能的急剧下降^[23].因此泛洪算法并不具有太大的实用价值,研究人员采用了一些方法去控制网络中传播的消息拷贝的数量.

PROPHET^[23]是一种基于概率的多拷贝路由协议.实际上某些容迟容断网络中节点的移动并不是完全随机的,而是存在某种规律的,一般是基于重复行为模式,就是说,网络中节点以一种可预测的方式移动.比如网络中数据骡子遇到其他特定节点的概率大于其他节点.如果一个节点之前多次到达一个位置,那么该节点可能将再次访问该位置.在 PROPHET 路由算法利用节点间的非随机相遇概率来进行路由,当两个节点相遇时,它们交换概要向量(summary vector),另外也交换交付可能性(delivery predict ability)信息,并按照一定的概率将消息复制给对方.复制概率取决于两节点能将消息成功投递到目的节点的概率. ARER^[43]算法也提出了类似的方法.这类算法的主要思想是通过控制复制概率来调节消息复制的规模,从而在消息投递成功率和网络开销之间达到均衡.通过对复制概率的控制能在一定程度上减小网络开销,但是,当网络规模增大时,消息复制的次数仍然会急剧增加.这类多拷贝路由方式被称为基于泛洪的多拷贝路由.文献[44]改进了 PROPHET 算法中的路由抖动问题.

PROPHET 算法以连接概率为度量, Kim 等人提出了一种以移动概率为度量的 DTN 路由算法^[45],使用平均空闲连接时间来描述给定节点对的连接周期.实验结果表明,平均空闲连接时间可以提高 DTN 路由算法性能.

容迟容断网络中影响消息投递率的因素不只是节点投递可能性.文献[46]研究表明,错误的转发决定可能是由 DTN 的存储-转发特性引起的.研究人员利用消息概念优化了原有的概率路由算法 PROPHET,提高了消息投递率.

美国马萨诸塞大学 Burgess 等人在文献[47]的基础上进行扩展,提出的 MaxProp^[48]路由算法也使用了 PROPHET 路由算法中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来转发消息.当存储空间满时,基于路径可能性来删除消息. MaxProp 的核心就是决定哪些消息优先发送而哪些消息应该首先被丢弃. MaxProp 本质上维护依据报文成功传输到目的节点的估计概率而得到的一个报文序列.

MV^[47]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.交付概率随时间的增长而下降,并且周期性地更新.

为了更有效地控制网络的开销,Spray and wait^[49]试图利用基于复制的路由算法提高消息投递率和基于转发路由算法.它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),当携带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 时才停止复制.如果消息未到达目的节点,则进入 wait 阶段,携带该消息的节点只将消息转发给目的节点.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^[50]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.除了 Spray and Wait 和 Spray and focus 之外,文献[51]也是属于基于配额的路由.文献[52]提出了基于马尔可夫位置预测模型的 spray and forwarding(SFR)路由算法.基于节点的历史位置信息,该算法使用第 2 阶马尔可夫观测机制来预测目的节点位置,然后将数据以贪婪算法转发出去,能够大幅度减少特定方向上转发的消息数量,达到网络负载均衡.

在 Spray and wait 的基础上,研究者提出了一些改进. SMART^[53]利用频繁遇到目标的节点以增加交付的机会; Multi period spraying^[54]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^[55]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 Roller Net 轨迹的基础上,建立查找表,每个节点根据其活跃度(在一个时间间隔内的通信机会数目)动态地选择适当的副本数量,以适应网络变化,减小传输延迟.

一些研究者^[56,57]从资源分配的角度处理 DTN 路由.其中 RAPID^[56]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这 3 个度量. 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.

文献[58]针对已有的容迟容断网络泛洪(epidemic)路由算法代价高昂并且网络负载过大,其他几种路由算法需要提前获知链路连接信息等缺点,提出了一种基于泛洪的链路状态协议去传播全局信息,但只使用一个单一路径来转发数据.算法只需使用观察到的网络信息即可进行路由决策.仿真结果表明,此算法性能与之前的需要全部网络拓扑结构信息的路由算法相当.

2.3 基于先验知识的路由协议

在容迟容断网络中,节点可获知的网络先验知识包括节点位置、移动路径、缓冲大小以及能量等.利用这些先验知识,针对不同网络应用场景来设计相应的路由算法,会在很大程度上提升容迟容断网络的性能.

文献[30]提及的基于网络先验知识的单副本路由算法,考虑链路连接信息统计、节点间连接信息、节点缓冲队列信息等不同要求所需的路由算法,计算最小延迟路径.针对连接统计信息提出了最小期望延迟路由算法(minimum expected delay,简称 MED);针对节点间的连接信息提出了最早投递路由算法(earliest delivery,简称 ED);MED-PC^[59]和 AMED^[60]是 MED 的改进算法.根据节点间的连接和本地队列提出了基于本地队列的最早投递算法(earliest delivery with local queue,简称 EDLQ)和基于全局队列的最早投递算法(earliest delivery with all queue,简称 EDAQ).实验结果表明,路由算法中使用的网络先验知识越多,路由算法的性能越好.但在实际的容迟容断网络环境中,获知全局的网络先验知识是不可能的,只能是尽可能地利用可获得的网络先验知识来设计路由算法,以期达到更好的性能.

基于预测和中继的路由算法(predict and relay,简称 PER)^[61],节点确定未来连接时间的分布概率并选择合适的下一跳节点来提高端到端的消息投递率. PER 算法基于以下两个假设:第一,节点在一组可以经常访问到的节点周围移动而不是完全随机的移动;第二,节点的移动行为就是半确定的,并且可以通过足够的节点移动历史信息来预测.

文献[62]提出了一种可扩展的基于预测的异构 DTN 网络路由算法,在不同网络域边界处设定服务器.基于用户在线记录的位置预测算法来估计目的节点可能的位置,接下来边界服务器基于模糊逻辑选择位于目的节点路径上的邻近中间节点,消息被临时保存直到目的节点的位置被预测到.实验结果表明,该算法可在有限的缓存空间情况下有效传递消息.

Vendramin 等人利用 ACO(ant colony optimization,蚂蚁群落优化)机制为复杂动态 DTN 网络提出一种新的基于预测的转发协议^[63].该协议主要利用了 ACO 的 population-based 搜索和快速学习适应新环境的特点.协议主要分为 3 个部分:路由、高度和缓存管理.

利用网络先验知识进行路由选择的路由协议还有:基于链路状态探测的水下声纳传感器网络链路预测和路由选择机制^[64]、带有导航预测的城市车辆容迟网络地理路由算法^[65]、节点移动模型确定情况下的空间图(space-time graph)路由框架^[66]、基于链路状态的路由协议 PLSR(predictable link-state routing)^[20].

现有的路由算法提供尽力服务,不能优化 QoS 以及支持消息优先级.文献[67]提出的 ALARMS 路由算法利用关于不同路由相关参数更精确的知识库来取得更好的 QoS.假设一个变化的摆渡(ferry)模型,设置许多沿预置路径移动的摆渡节点来进行节点与区域网关之间交换消息,摆渡节点还通知网关节点关于其下次到达网关节点的时间以及停留时间等前置路由信息.区域网关节点利用这个信息来估计每个消息的投递时延并选择可最快将消息传递到目的节点的摆渡节点进行消息转发.实验结果表明,ALARMS 路由算法性能优于现有的 Epidemic, Spray and wait 和 Spray and focus 路由算法.

2.4 基于网络编码的路由协议

高效的网络编码有利于提高网络中数据传输的可靠性.研究者将网络编码技术引入容迟容断网络路由决策中,称为基于编码的路由机制^[33-38,68]、使用喷泉码的优化概率转发机制^[69]、双向网络编码的多播机会路由协议^[70].文献[71,72]分别使用网络编码(network coding)和擦除编码(eraser coding)来提高容迟容断网络消息投递率.Widmer 等人提出了基于网络编码的概率路由算法^[73],每个消息中包含编码向量,当中间节点接收到消息后,中间节点并不简单转发消息,而是将收到的消息进行线性组合编码产生一个新的消息,按照转发规则进行转发.类似地,文献[74]提出了基于网络编码的泛洪路由协议.理论分析及实验结果表明,在带宽和节点缓冲受限的情况下,该协议性能优于传统的泛洪路由协议.进一步研究发现,当传输大量数据时,与基于复制的路由协议相比,基于网络编码的路由协议^[35]明显降低了数据传输量,且仅增加了少量的延迟.

2.5 基于位置的路由协议

基于地理位置的路由算法假设网络中的每个节点可以借助空间定位系统获取本节点的地理位置信息,并利用这些信息寻找到达目的节点的路由路径.在这类路由算法中,某些算法假设目的节点及与本节点相邻的所有一跳邻居的位置都是已知的,某些情况下还假设两跳邻居节点的位置也是已知的.与先验式路由和反应式路由分类类似,根据路由算法是否需要维护路由表,基于地理位置的路由算法可以分为两类:位置辅助的路由协议,如 LAR(location-aided routing)^[75];基于位置信息的路由算法,如 GPSR(greedy perimeter stateless routing)^[76]、GEDIR(geographic distance routing)^[77]、GRA(geographical routing algorithm)^[78]、PLBR(preference location-based routing strategy)^[79]、LDPR(location and direction aware priority routing)^[80]、3DGR^[81].文献[82]仅向探测到的节点发送自身的位置信息来进行路由选择.文献[83]分析了容迟容断网络中节点的位置及连接信息,发现节点间距离过远是影响网络消息投递的主要原因,在此基础上提出了一种新的基于位置的路由策略.

2.6 多播路由协议

多播路由由允许一个源节点同时向多个目的节点传输信息,同时向多个目标地址发送消息可有效减小网络中数据包的拷贝数目.传统有线网络中已存在很多优秀的多播路由协议,但它们并不能直接适用于节点快速移动、间歇连通性、高延时的容迟容断网络,容迟容断网络环境下的高效多播路由协议已成为一个重要的研究热点.

文献[84]将容迟容断网络的 PROPHET 单播路由协议扩展为多播.文献[85]使用了非保管传输的多播机制

扩展 PROPHET 路由协议.文献[86]将两跳中继算法应用于多播场景中,提出了可扩展的 DTN 多播路由协议 RelayCast.文献[87]提出了保证较小转发数量的非重复的多播机制.文献[88]提出一个基于按需路径发现和全局状态感知的多播机制来解决容迟网络中连接不稳定性.文献[89-91]对比了容迟容断网络的不同多播路由协议的性能.文献[92]对容迟容断网络的多播协议进行了仿真分析.

(1) 基于单播的多播路由算法

基于单播的多播算法实现简单.源节点根据消息的接收者数量把消息复制相应的份数,并沿通往目标节点的最短路径分别发送.由于源节点对同一消息进行多次复制,故中间节点处应该存在多个消息副本.

缺点:所有复制工作都在源节点处完成,故源节点的工作效率成为算法的瓶颈;同一消息的多个副本同时存在于网络中,加大了网络的开销,占用了不必要的带宽资源,效率较低.

(2) 基于静态树(static-tree-based multicast)的多播算法

该算法使用始于源节点的树结构进行多播.在算法开始时,源节点访问网络中其他节点获取整个网络的链路连接的信息,根据收集到的信息构建一个以源节点为根节点的多播树,然后按照生成的多播树进行多播选路.如果网络中两个节点之间的连接失效,那么消息将保存在上游节点,等待连接恢复后继续向下游节点传递.

缺点:不适合节点移动、网络拓扑快速变化、连接频繁中断的 DTN 网络.

(3) 基于动态树(dynamic-tree-based multicast,简称 DTBR)的多播算法^[93]

DTBR 假设源节点拥有整个网络所有连接信息或概要信息,但这在现实中难以实现^[94].进入多播会话阶段后,根据已知的链路状态信息,算法要求上游节点给下游节点发送消息接收者收列表(receiver list),而下游节点只允许向列表中存在的目的节点发送消息拷贝.

缺点:DTBR 在一定程度上适应了 DTN 网络拓扑变化,但是由于下游节点只有向上游节点指定的消息接收者列表中的节点发送消息权限,而没有消息转发对象的选择权.当下游节点发现新的转发机会(新的链路建立)时,无权对这些新的链路加以利用,错失了一些好的消息转发机会.故而 DTBR 在适应网络拓扑动态变化方面还是有一定的局限性.

DTBR 动态变化多播树以适应网络变化.在 DTBR 中每个 bundle 有根据 DTN 链接的状态逐跳变化的树.每个节点都有一个 bundle 做如下几件事:收集 DTN 链路状态信息来更新自己的知识库;根据自身知识库计算最小代价的多播树;利用发现的多播树来转发 bundle^[89].

与 STBR 的区别:DTBR 在当前节点计算消息的接收列表,而 STBR 在消息产生的源节点计算^[93].

(4) 基于树的动态按需多播算法(on-demand situation-aware multicast,简称 OS-Multicast)^[95]

OS-Multicast 在 DTBR 的基础上发展而来,不同于 DTBR,OS-Multicast 在每个中间转发节点处建立一个以自己为源节点到目的节点的转发树,并且这棵树可以根据网络链接状态变化进行动态调整.这样,对于中间节点发现的链路变化,可以有效地加以利用.

优点:与 DTBR 相比,对网络拓扑动态变化的适应性更高.在网络节点分布较密时算法性能好.

缺点:当网络节点分布稀疏时,算法的有效性明显下降;OS-Multicast 采用了类似 DSR 的路由决策算法,假定诸如链路状态、网络拓扑等能够很好地被获知,这种假设存在一定的局限性.

(5) 基于域内的多播路由算法

基于上下文知识的多播选路算法(context-aware multicast routing,简称 CAMR)^[94]可以适应不同的网络场景.算法性能优于现有的许多 DTN 多播路由算法,可达到最高的消息投递率(delivery ratio).即使在网络节点稀疏情况下,延迟仍与 DTBR 和 OS-Multicast 相当.CAMR 利用节点密度自适应高度转发概率,每个节点维护自身两跳范围内的邻居节点信息.当消息的所有目的节点都在自己的通信范围内时,不需要开启路由发现过程就可以直接转发消息.另外,当节点发现自身处在一个邻居节点分布稀疏的网络中时,可以当作摆渡节点(ferry)转发消息.

协议描述:

- 本地节点密度估计(local node density estimation)DTN 节点周期性地广播邻居发现消息,另一个节点收

到该消息并且在一个随机的时延之后反馈给邻居发现消息产生者一个包括节点自身信息(标识、位置、速度)和一跳相邻节点信息(标识、位置、速度)的包,因此每个节点可以估计其邻居节点数目,用 N_d 表示,如果 N_d 小于一个指定的值,那么在一个邻居发现周期内,给当前节点设置一个稀疏连接标识。

- 2 跳邻居连接估计(2-hop neighbor contact estimation)

特点:CAMR 利用了类似 Ad hoc 网络的路由发现过程,因此只有在对节点移动信息掌握较好的情况下,才能取得好的效果。

CERM(controlled epidemic routing for multicasting)路由算法^[96]是一种采用受控传染性路由实现的组播算法,该算法不需要网络先验知识,而是通过一系列控制机制实现传输速率和资源消耗的折中。这些控制机制包括消息生存时间 TTL、网络中转发的消息副本数量和路由概率等。该算法的优点是复杂度低,缺点是对节点缓存及链路带宽等网络资源要求高。

(6) 基于域间的组多路由算法

EIMD(efficient inter-domain multicast delivery)路由算法^[97]是一种综合型域间多播算法。假设网络中包含多个域且每个域均有一个头节点和至少 1 个摆渡节点,头节点和摆渡节点构成上层网络,而使其余的节点构成下层网络。当进行多播传输时,源节点首先把消息传输给本域的头节点,再由其转发给本地的组成员及来访的摆渡节点,同时,头节点从摆渡节点处接收的消息传给本地多播组成员。该算法可以通过增加节点移动速度或节点的数量来提高网络性能。

SHIM(scalable hierarchical inter-domain multicast)路由算法^[98]是一种可扩展的分级域间组播路由算法。其中,每个区域至少有 1 个域首节点。整个网络划分为上下两层:上层由所有区域的域首和源节点组成,下层由其他节点组成。该算法组播传输采用 3 个步骤:(1) 利用单播路由策略,源节点把消息传送给域首;(2) 利用域间组播路由策略,消息由源节点域首发送给接收节点域首;(3) 利用域内组播路由策略,接收节点域首把消息传输到目的节点。实验结果表明,在域间组播环境下,该算法可获得较高的消息投递率。

3 DTN 路由协议分析与比较

3.1 DTN路由性能评估指标

应用场景不同,对 DTN 路由协议性能的需求也不同。本文为了不失一般性,设定评估 DTN 路由协议的性能指标如下:

- (1) 消息拷贝数,是指网络存在同一消息的副本数。选择合适的副本数有助于提高消息投递率和减小时延,但过多的消息副本会导致网络的拥塞,反倒影响路由协议性能。
- (2) 能量消耗。DTN 中网络节点能量有限,节点能量消耗对于整个网络生存时间的至关重要,路由协议设计必须考虑尽可能地减小节点能量消耗,增加网络生存时间。
- (3) 存储空间消耗。节点的存储空间决定其作为中继节点可缓存消息数量的多少。如果类似泛洪的路由协议对节点存储空间的需求很高,但一般情况下节点的存储空间有限,路由协议就必须考虑优化缓存管理、队列调度等问题,防止由于单个或部分节点中继负荷过大而丢弃消息。
- (4) 传输时延。传输时延是 DTN 路由设计重要的性能指标。时延关系到消息的有效性。在诸如应急网络等场景下,消息的及时传输至关重要。
- (5) 消息投递率。在无端到端固定连接的受限网络中,最大化消息投递率仍是路由协议设计的首要目标,但取决于实际应用场景的需求,一般需要与其他指标进行折中取舍。
- (6) 复杂度。一般 DTN 节点的处理能力比较有限。DTN 路由协议的路由发现和处理过程不能过于复杂,以保证节点的正常工作。

3.2 DTN主要路由协议分析

DTN 路由协议大多数情况下只针对特定的应用场景而提出,不同应用场景的 DTN 节点构成、链路带宽、

节点存储能力及能量都不尽相同,因此路由协议选择的侧重点也不相同.在这种情况下,比较 DTN 路由协议的优劣就比较困难,没有一个统一的评估标准.而全面深入分析现有的 DTN 路由协议,有助于理解并优化解决现有 DTN 路由协议存在的问题,也有助于在实际中根据不用应用场景、不同侧重点选择合适的路由协议.表 1 对于本文讨论的路由协议进行了简单的比较.对于路由协议所使用的先验知识、存储资源开销、延迟、复杂性等进行了分析.在实际应用中具体采用哪种路由协议,还需要根据应用场景、网络规模、网络结构、性能要求、复杂性及成本等方面进行综合考虑.

表 1 DTN 路由协议分析比较

Routing protocols	Number of copies	Energy consume	Storage	Latency	Delivery ratio	Complexity
Single-Copy routing protocols						
Direct transmission ^[39]	1	Low	Low	High	High	Low
Data mule ^[31]	1	Large	Normal	High	Normal	Low
PLSR ^[99]	1	Large	Normal	Low	High	High
Seek and focus ^[40]	1	Low	Low	Normal	Normal	Low
FC ^[30]	1	Low	Normal	High	Low	Low
Replication-Based routing protocols						
Epidemic ^[42]	Large	Large	Large	High	High	Low
MaxProp ^[48]	1	Normal	Normal	Low	High	High
Prophet ^[23]	Many	Normal	Normal	Low	Normal	Low
MV ^[47]	Many	Large	Normal	Normal	Normal	High
Spray and wait	Many	Low	Normal	Low	Normal	Low
Spray and focus ^[50]	Many	Normal	Normal	Low	High	Low
RAPID ^[56]	Many	Low	Low	Low	High	Normal
CAR ^[41]	Many	Normal	Low	Normal	Normal	Low
Knowledge-Based routing protocols						
MED ^[30]	Many	Low	Normal	High	Normal	Low
ED ^[30]	Many	Normal	Normal	Normal	Low	Normal
EDLQ ^[30]	Many	Normal	Normal	Low	Normal	Normal
EDAQ ^[30]	Many	Normal	Normal	Low	High	Normal
Ref ^[59,60]	Many	Low	Normal	Normal	Normal	Normal
Network coding-based routing						
Erasure coding ^[68,72]	Many	Large	Normal	Low	Normal	High
Network coding ^[35,71,73]	Many	Large	Normal	Low	Normal	High
Location-Based routing protocols						
LAR ^[75]	Many	Normal	Large	Normal	Normal	Normal
GPSR ^[76]	Many	Normal	Normal	High	Normal	Normal
LDPR ^[80]	Many	Normal	Low	Normal	Normal	High
3DGR ^[81]	Many	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Multicast routing protocols						
STBR ^[93]	Many	Normal	Large	High	High	Normal
DTBR ^[93]	Many	Normal	Normal	Normal	High	Normal
OS-Multicast ^[95]	Many	No metric	Normal	Normal	High	Normal
CAMR ^[94]	Many	Normal	Normal	Normal	High	High
CERM ^[96]	Many	Normal	Large	Normal	Normal	Normal
SHIM ^[98]	Many	No metric	Normal	High	High	High
EIMD ^[100]	Many	Normal	Low	Normal	Normal	High

4 总 结

DTN 网络为间歇性连通、低带宽、高误码率等特性的网络数据传输提供了一种解决方案.自 2003 年以来,对 DTN 的应用与研究发展迅速.DTN 对于解决诸如灾区应急通信、军用战术网络通信、野生动物监测等都具有现实的意义.越来越多的研究者投入到 DTN 的相关研究之中,其中路由协议的研究作为 DTN 研究中的重点,

涌现了大量的研究成果.但从实用性、普适性等方面考虑,现有的路由协议还存在一些问题需要解决:

- (1) 针对特殊应用背景下的 DTN 网络特点,诸如战场环境下的 DTN 网络等极恶劣条件下网络特性进行研究,充分考虑算法复杂性、时延等需求.
- (2) 安全性:现有的 DTN 路由协议极少考虑到安全因素,DTN 网络中节点缺少物理防护,通信方式大多采用无线传输,容易受到攻击,信号易被截获.面临的安全性问题很严峻,在安全性方面是否可借鉴有线网络的可信网络连接技术来提高 DTN 网络安全性?
- (3) 现有 DTN 路由协议没有统一的评估指标,路由协议大多是针对某一指标进行设计与优化,对于其他方面考虑较少,导致网络性能难以提升,因此需要利用新的分析工具来进行,考虑 DTN 路由的多指标优化问题.

未来对于 DTN 路由协议的研究应该集中于以下几个方面:(1) 针对新的应用场景^[101],比如物联网环境下的 DTN 路由协议研究^[102,103]等;(2) 考虑路由协议的多个性能指标的优化,研究自适应的 DTN 路由协议^[104,105];(3) DTN 路由协议的安全因素也是一个重要的研究方向,目前这方面几乎是空白,而安全问题尤为重要;(4) 研究跨层的 DTN 通信协议^[106],结合 DTN 节点间物理传输信道的特性进行协议的设计与开发.

致谢 衷心感谢本文评审专家提出中肯、有益的意见,感谢编辑老师的热情工作,同时,向对本文工作给予支持和提出宝贵建议的同行专家表示诚挚的谢意.

References:

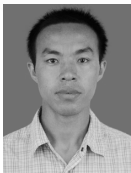
- [1] Jenkins A, Kuzminsky S, Gifford KK. Delay/Disruption-Tolerant networking: Flight test results from the international space station. *Big Sky: IEEE*, 2010. 1–8. [doi: 10.1109/AERO.2010.5446948]
- [2] Wang RH, Dave V, Ren B. Interplanetary overlay network (ION) for long-delay communications with asymmetric channel rates. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications*. 2011. [doi: 10.1109/icc.2011.5962928]
- [3] Krupiarz CJ, Birrane EJ, Ballard BW. Enabling the interplanetary Internet. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2011,30(2): 122–134. [doi: 10.1109/AERO.2010.5446948]
- [4] Caini C, Cruickshank H, Farrell S. Delay- and disruption-tolerant networking (DTN): An alternative solution for future satellite networking applications. *Proc. of the IEEE*, 2011,99(11):1980–1997.
- [5] Burleigh S, Hooke A, Torgerson L. Delay-Tolerant networking: An approach to interplanetary Internet. *IEEE Communications Magazine*, 2003,41(6):128–136. [doi: 10.1109/MCOM.2003.1204759]
- [6] Zhou T, Xu H B, Liu M. Spatial and temporal correlations-based routing algorithm in intermittent connectivity human social network. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012. [doi: 10.1155/2012/515046]
- [7] Wu H, Fujimoto R, Guensler R. MDDV: A mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks ACM 2004. [doi: 10.1145/1023875.1023884]
- [8] Mousannif H, Khalil I, Olariu S. Cooperation as a service in VANET: Implementation and simulation results. *Mobile Information Systems*, 2012,8(2):153–172.
- [9] Saha S, Sushovan, Sheldekar A. Post disaster management using delay tolerant network. In: *Recent Trends in Wireless and Mobile Networks*. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 170–184.
- [10] Camara D, Bonnet C, Filali F. Propagation of public safety warning messages a delay tolerant network approach. *New York: IEEE*, 2010. 1–6. [doi: 10.1109/WCNC.2010.5506191]
- [11] Krishnan R, Basu P, Mikkelsen JM. The spindle disruption-tolerant networking system. In: *Proc. of the IEEE Military Communications Conf. IEEE*, 2007. [doi: 10.1109/MILCOM.2007.4454942]
- [12] Partan J, Kurose J, Levine BN. A survey of practical issues in underwater networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2007,11(4):23–33.
- [13] Ribeiro FJL, Pedroza ACP, Costa L. Deepwater monitoring system in underwater delay/disruption tolerant network. *IEEE Latin America Trans.*, 2012,10(1):1324–1331.
- [14] Berni A, Merani D, Potter J. Heterogeneous system framework for underwater networking. In: *Proc. of the IEEE Military Communications Conf. New York: IEEE*, 2011. 2050–2056. [doi: 10.1109/MILCOM.2011.6127620]

- [15] Juang P, Oki H, Wang Y. Energy-Efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. ACM, 2002. 96–107.
- [16] Ehsan S, Bradford K, Brugger M. Design and analysis of delay-tolerant sensor networks for monitoring and tracking free-roaming animals. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2012,11(3):1220–1227. [doi: 10.1109/TWC.2012.012412.111405]
- [17] Barua M, Lu RX, Shen XM. Health-Post: A delay-tolerant secure long-term health care scheme in rural area. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. New York: IEEE, 2011. [doi: 10.1109/GLOCOM.2011.6134286]
- [18] Seth A, Kroeker D, Zaharia M. Low-Cost communication for rural Internet kiosks using mechanical backhaul. ACM, 2006. 334–345. [doi: 10.1145/1161089.1161127]
- [19] Husni E, IEEE. Delay tolerant network based Internet services for remote areas using train systems. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Networks. New York: IEEE, 2011. 47–52. [doi: 10.1109/ICON.2011.6168505]
- [20] Farrell S, Cahill V, Geraghty D. When TCP breaks: Delay- and disruption-tolerant networking. Internet Computing, IEEE, 2006, 10(4):72–78.
- [21] Dai Y, Yang P, Chen G. CFP: Integration of fountain codes and optimal probabilistic forwarding in DTNs. In: Proc. of the 2010 IEEE Global Telecommunications Conf. (Globecom 2010). 2010. 1–5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5684030]
- [22] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(4):27–34. [doi: 10.1145/863955.863960]
- [23] Lindgren A, Doria A, Schelén O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2003,7(3):19–20. [doi: 10.1145/961268.961272]
- [24] Pelusi L, Passarella A, Conti M. Opportunistic networking: Data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks. IEEE Communications Magazine, 2006,44(11):134–141.
- [25] Harras KA, Wittie MP, Almeroth KC. ParaNets: A parallel network architecture for challenged networks. IEEE, 2007. 73–78. [doi: 10.1109/HotMobile.2007.13]
- [26] Cerf V, Burleigh S, Hooke A. Interplanetary Internet (IPN): Architectural definition. 2001.
- [27] Cerf V, Burleigh S, Hooke A. Delay-Tolerant networking architecture. RFC 4838, IRTF DTN Research Group, 2007.
- [28] Psounis K, Raghavendra CS. Performance analysis of mobility-assisted routing. New York: ACM, 2006. 49–60.
- [29] Warthman F. Delay-Tolerant networks (DTNs): A tutorial. 2003.
- [30] Jain S, Fall K, Patra R. Routing in a delay tolerant network. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004,34(4): 145–157.
- [31] Shah RC, Roy S, Jain S. Data mules: Modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks. Ad Hoc Networks, 2003,1(2):215–233.
- [32] Broch J, Maltz D A, Johnson DB. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. ACM, 1998. 85–97. [doi: 10.1145/288235.288256]
- [33] Liao Y, Tan K, Zhang Z. Estimation based erasure-coding routing in delay tolerant networks. ACM, 2006. 557–562.
- [34] Jain S, Demmer M, Patra R. Using redundancy to cope with failures in a delay tolerant network. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2005,35(4):109–120.
- [35] Lin Y, Li B, Liang B. Efficient network coded data transmissions in disruption tolerant networks. IEEE, 2008. 1508–1516.
- [36] Dimakis AG, Prabhakaran V, Ramchandran K. Decentralized erasure codes for distributed networked storage. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2006,14(SI):2809–2816. [doi: 10.1109/TIT.2006.874535]
- [37] Altman E, de Pellegrini F. Forward correction and fountain codes in delay-tolerant networks. IEEE/ACM Trans. on Networks, 2011,19(1):1–13.
- [38] Torbatian M, DAMEN M O. On the design of delay-tolerant distributed space-time codes with minimum length. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2009,8(2):931–939.
- [39] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Single-Copy routing in intermittently connected mobile networks. IEEE, 2004 [doi: 10.1109/SAHCN.2004.1381922]
- [40] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The single-copy case. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2008,16(1):63–76.
- [41] Musolesi M, Mascolo C. Car: Context-Aware adaptive routing for delay-tolerant mobile networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2009,8(2):246–260.

- [42] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing in partially-connected ad hoc network. Technical Report, CS-200006, Duke University, 2000.
- [43] Wang X, Shu Y, Jin Z. Adaptive randomized epidemic routing for disruption tolerant networks. *IEEE Trans. on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, 2009, 424–429. [doi: 10.1109/MSN.2009.79]
- [44] Xue JF, Li JS, Cao YD. Advanced PROPHET routing in delay tolerant network. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Communication Software and Networks*. 2009. 411–413.
- [45] Kim YP, Nakano K, Miyakita K. A routing protocol for considering the time variant mobility model in delay tolerant network. *IEICE Trans. on Information and Systems*, 2012,E95D(2):451–461.
- [46] Lee FC, Yeo CK. Probabilistic routing based on history of messages in delay tolerant networks. In: *Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conf. New York: IEEE*, 2011. 1–6. [doi: 10.1109/VETECE.2011.6093035]
- [47] Burns B, Brock O, Levine BN. MV routing and capacity building in disruption tolerant networks. In: *Proc. of the IEEE Infocom 2005: The Conf. on Computer Communications*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2005. 398–408.
- [48] Burgess J, Gallagher B, Jensen D. Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. 2006. 1–11. [doi: 10.1109/INFOCOM.2006.228]
- [49] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. *ACM*, 2005. 252–259.
- [50] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The multiple-copy case. *IEEE/ACM Trans. on Networks*, 2008,16(1):77–90.
- [51] Nelson SC, Bakht M, Kravets R. Encounter-Based routing in DTNs. *IEEE*. 2009. 846–854. [doi: 10.1109/INFCOM.2009.5061994]
- [52] Dang F, Yang XL, Long KP. Spray and forward: Efficient routing based on the Markov location prediction model for DTNs. *Science China Information Sciences*, 2012,55(2):433–440.
- [53] Tang L, Zheng Q, Liu J. SMART: A selective controlled-flooding routing for delay tolerant networks. In: *Proc. of 2007 the 4th Int'l Conf on Broadband Communications, Networks and Systems*. IEEE, 2007. 356–365. [doi: 10.1109/BROADNETS.2007.4550455]
- [54] Bulut E, Wang Z, Szymanski BK. Cost-Effective multiperiod spraying for routing in delay-tolerant networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2010,18(5):1530–1543.
- [55] Tournoux PU, Leguay J, Benbadis F. Density-Aware routing in highly dynamic DTNs: The RollerNet case. *IEEE Trans. on Mobile Computers*, 2011,10(12):1755–1768.
- [56] Balasubramanian A, Levine B N, Venkataramani A. DTN routing as a resource allocation problem. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2007,37(4):373–384.
- [57] Small T, Haas ZJ. Resource and performance tradeoffs in delay-tolerant wireless networks. *ACM*, 2005. 260–267. [doi: 10.1145/1080139.1080144]
- [58] Jones EPC, Li L, Schmidtke JK. Practical routing in delay-tolerant networks. *IEEE Trans. on Mobile Computers*, 2007,6(8): 943–959.
- [59] Newman MEJ. Detecting community structure in networks. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 2004,38(2):321–330.
- [60] Danon L, Díaz-guilera A, Duch J. Comparing community structure identification. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2005,(9):90–98. [doi: 10.1088/1742-5468/2005/09/P09008]
- [61] Yuan Q, Cardei I, Wu J. An efficient prediction-based routing in disruption-tolerant networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2012,23(1):19–31.
- [62] Huang CJ, Chen HM, Lin CF. A scalable routing for delay-tolerant heterogeneous networks. *Int'l Journal of Innovative Computing Information and Control*, 2012,8(1A):49–59.
- [63] Vendramin ACK, Munaretto A, Delgado MR. GrAnt: Inferring best forwarders from complex networks' dynamics through a greedy ant colony optimization. *Computer Networks*, 2012,56(3):997–1015.
- [64] Chen J, Han YY, Li DS. Link prediction and route selection based on channel state detection in UASNs. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2011,2011:Article ID 939864. [doi: 10.1155/2011/939864]
- [65] Cheng PC, Lee KC, Gerla M. GeoDTN plus Nav: Geographic DTN routing with navigator prediction for urban vehicular environments. *Mobile Network Applications*, 2010,15(1):61–82.

- [66] Merugu S, Ammar MH, Zegura EW. Routing in space and time in networks with predictable mobility. Technical Report, GIT-CC-04-07, Georgia Tech College of Computing, 2004.
- [67] Xian Y, Huang CT, Cobb J. Look-Ahead routing and message scheduling in delay-tolerant networks. *Computer Communications*, 2011,34(18):2184–2194.
- [68] Jain S, Demmer M, Patra R. Using redundancy to cope with failures in a delay tolerant network. *ACM*, 2005. 109–120 [doi: 10.1145/1080091.1080106]
- [69] Dai Y, Yang PL, Chen GH. CFP: Integration of fountain codes and optimal probabilistic forwarding in DTNs. In: *Proc. of the 2010 IEEE Global Telecommunications Conf. New York: IEEE*. 2010. 1–5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5684030]
- [70] Daru P, Han Z. Wireless multicast opportunistic routing with dual network coding. *Key Engineering Materials*, 2011,1244(474): 1173–1178.
- [71] Fragouli C, Widmer J, Le Boudec JY. Efficient broadcasting using network coding. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2008, 16(2):450–463.
- [72] Wang Y, Jain S, Martonosi M. Erasure-Coding based routing for opportunistic networks. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. ACM*, 2005. 229–236. [doi: 10.1145/1080139.1080140]
- [73] Widmer J, Le Boudec JY. Network coding for efficient communication in extreme networks. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. ACM*, 2005. 284–291. [doi: 10.1145/1080139.1080147]
- [74] Lin Y, Liang B, Li B. Performance modeling of network coding in epidemic routing. In: *Proc. of the ACM Int'l MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking. ACM*, 2007. [doi: 10.1145/1247694.1247709]
- [75] Ko YB, Vaidya NH. Location-Aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks. *Wireless Networks*, 2000,6(4):307–321.
- [76] Karp B, Kung HT. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. *ACM*, 2000. 243–254. [doi: 10.1145/345910.345953]
- [77] Stojmenovic I, Lin X. GEDIR: Loop-Free location based routing in wireless networks. In: *Proc. of the IASTED Int'l Conf. on Parallel and Distributed Computing and Systems*. 1999.
- [78] Kuiper E, Nadjm-Tehrani S. Geographical routing with location service in intermittently connected MANETs. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2011,60(2):592–604.
- [79] Liu J, Gong H, Zeng J. Preference location-based routing in delay tolerant networks. *Int'l Journal of Digital Content Technology and Its Applications*, 2011,5(12):468–474.
- [80] Shen J, Moh S, Chung I. A priority routing protocol based on location and moving direction in delay tolerant networks. *IEICE Trans. on Information and Systems*, 2010,(10):2763–2775.
- [81] Altahan AM, Watfa MK. A position-based routing algorithm in 3D sensor networks. *Wireless Communications on Mobile Computer*, 2012,12(1):33–52. [doi: 10.1002/wcm.888]
- [82] Seo DO, Lee DH. The end-to-end reliability algorithms based on the location information and implicit ACK in delay tolerant mobile networks. In: *Proc. of 2011 the 3rd Int'l Mega-Conf. on Future-Generation Information Technology. Jeju Island: Springer-Verlag*, 2011.
- [83] Tian Y, Li J. Location-Aware routing for delay tolerant networks. In: *Proc. of 2010 the 5th Int'l ICST Conf. on Communications and Networking in China (CHINACOM). New York: IEEE*, 2010. 1–5.
- [84] Santiago J, Casaca A, Pereira PR. Multicast in delay tolerant networks using probabilities and mobility information. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 2009,7(1-2):51–68.
- [85] Santiago J, Casaca A, Pereira PR. Non-Custodial multicast over the DTN-prophet protocol. In: *Wireless Sensor and Actor Networks II. New York: Springer-Verlag*, 2008. 197–208.
- [86] Lee U, Oh SY, Lee KW. RelayCast: Scalable multicast routing in delay tolerant networks. In: *Proc. of the 16th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols. Los Alamitos: IEEE Computer Society*, 2008. 218–227.
- [87] Wang YS, Wu J. A dynamic multicast tree based routing scheme without replication in delay tolerant networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2012,72(3):424–436.
- [88] Arif M, Satija K, Chaudhary S. ERBR: Enhanced and improved delay for requirement based routing in delay tolerant networks. In: Meghanathan N, Kaushik BK, Nagamalai D, eds. *Proc. of the Advances in Networks and Communications*. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 223–232.
- [89] Ye Q, Cheng L, Chuah MC. Performance comparison of different multicast routing strategies in disruption tolerant networks. *Computer Communications*, 2009,32(16):1731–1741.

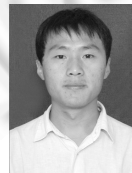
- [90] Xi Y, Chuah M. Performance evaluation of an encountered based multicast scheme for disruption tolerant networks. New York: IEEE, 2008. 353–358 [doi: 10.1109/MAHSS.2008.4660018]
- [91] Zhang L, Zhou XW. A rough set performance evaluation approach for multicast routing strategies in delay and disruption tolerant networks. In: Proc. of the 2009 1st Int'l Conf. on Future Information Networks (ICFIN 2009). New York: IEEE, 2009. 280–284. [doi: 10.1109/ICFIN.2009.5339602]
- [92] Abdulla M, Simon R. A simulation analysis of multicasting in delay tolerant networks. In: Proc. of the WSC 2006. 2006.
- [93] Zhao W, Ammar M, Zegura E. Multicasting in delay tolerant networks: Semantic models and routing algorithms. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2005 Workshops: Conf. on Computer Communications. 2005. 268–275. [doi: 10.1145/1080139.1080145]
- [94] Chuah MC, Yang P. Context-Aware multicast routing scheme for disruption tolerant networks. Int'l Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2009,4(5):269–281. [doi: 10.1504/IJAHUC.2009.027477]
- [95] Ye Q, Cheng L, Chuah MC. OS-Multicast: On-Demand situation-aware multicasting in disruption tolerant networks. In: Proc. of 2006 IEEE the 63rd Vehicular Technology Conf. 2006. 96–100 [doi: 10.1109/VETECS.2006.1682783]
- [96] Abdulla M, Simon R. Controlled epidemic routing for multicasting in delay tolerant networks. In: Proc. of the 2008 IEEE Int'l Symp. on Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems. New York: IEEE, 2008. 1–10.
- [97] Guo Z, Wang B, Cui JH. Prediction assisted single-copy routing in underwater delay tolerant networks. In: Proc. of the Globecom 2010. 1–6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683232]
- [98] Huang M, Chen S, Zhu Y. Cost-Efficient topology design problem in time-evolving delay-tolerant networks. In: Proc. of the Globecom 2010. 1–5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5684269]
- [99] Fischer D, Basin D, Engel T. Topology dynamics and routing for predictable mobile networks. In: Proc. of the ICNP 2008. IEEE, 2008. 207–217. [doi: 10.1109/ICNP.2008.4697039]
- [100] Guo Z, Wang B, Cui JH. Prediction assisted single-copy routing in underwater delay tolerant networks. New York: IEEE, 2010. 1–6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683232]
- [101] Shu YA, Shu ZY, Luo B. An energy balancing adaptive routing strategy based on interference model in 6LoWPANs. Journal of Information & Computational Science, 2013,22(3):466–470.
- [102] Bagula AB, Djenouri D, Karbab E. On the relevance of using interference and service differentiation routing in the Internet-of-things. In: Proc. of the NEW2AN/ruSMART 2013. LNCS 8121, Springer-Verlag, 2013. 25–35. [doi: 10.1007/978-3-642-40316-3_3]
- [103] Machado K, Rosario D, Cerqueira E. A routing protocol based on energy and link quality for internet of things applications. Sensors, 2013,13(2):1942–1964.
- [104] Zhang JB, Luo GC. Adaptive spraying for routing in delay tolerant networks. Wireless Personal Communications, 2012,66(1): 217–233. [doi: 10.1007/s11277-011-0334-3]
- [105] Xue LQ, Liu JK, Peng J. An adaptive message ferry routing algorithm for delay tolerant networks. 2012. 699–703. [doi: 10.1109/ICCT.2012.6511295]
- [106] Thaalbi M, Tabbane N, Bejaoui T. A cross layer balanced routing protocol for differentiated traffics over mobile ad hoc networks. In: Proc. of the NEW2AN/ruSMART 2013. LNCS 8121, Springer-Verlag, 2013. 407–419.



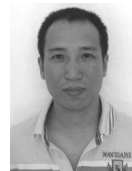
田成平(1985—),男,甘肃镇原人,博士生,工程师,主要研究领域为移动计算,容迟容断网络.
E-mail: chengpingtian85@gmail.com



慈林林(1950—),男,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为人工智能,移动计算.
E-mail: cilinlin@263.net



程宾(1985—),男,博士生,CCF 学生会会员,主要研究领域为无线传感器网络.
E-mail: chengbinpaper@gmail.com



赵守俊(1981—),男,博士,助理研究员,主要研究领域为移动计算.
E-mail: seafra@163.com