

容迟与容断网络中的路由协议^{*}

张 龙¹⁺, 周贤伟¹, 王建萍¹, 邓 宇², 吴启武¹

¹(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

²(Department of Electronics, University of York, Heslington, York YO10 5DD, UK)

Routing Protocols for Delay and Disruption Tolerant Networks

ZHANG Long¹⁺, ZHOU Xian-Wei¹, WANG Jian-Ping¹, DENG Yu², WU Qi-Wu¹

¹(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

²(Department of Electronics, University of York, Heslington, York YO10 5DD, UK)

+ Corresponding author: E-mail: iceberg206@163.com

Zhang L, Zhou XW, Wang JP, Deng Y, Wu QW. Routing protocols for delay and disruption tolerant networks. *Journal of Software*, 2010,21(10):2554–2572. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3774.htm>

Abstract: As newly proposed end-to-end, store-and-forward networks, delay and disruption tolerant networks (DTN) are characterized by intermittent connectivity, frequent partitions, extremely high latency, asymmetric data rates, high error rates, heterogeneous interconnection, etc. Hence, traditional routing protocols for Internet, mobile ad hoc networks and wireless sensor networks, are difficult to be applied efficiently in DTN scenarios, and routing in DTN faces many new challenges. After briefly describing the fundamental characteristics of DTN and the major challenges in designing routing protocols, the metrics used to evaluate the DTN routing protocols are proposed. Next, research on routing protocols for DTN is comprehensively summarized and deeply analyzed in this paper, including unicast routing, multicast routing, and anycast routing. Finally, the main routing protocols are compared, and the open issues for the future research are also pointed out to motivate new research and development in the field of DTN.

Key words: delay tolerant network; disruption tolerant network; challenged network; intermittently connected network; routing protocol

摘 要: 作为一种新型的端到端存储转发网络体系结构,容迟与容断网络(delay and disruption tolerant network)具有间歇连接、频繁割裂、时延极高、非对称的数据速率、较高的误码率、异构互连等特点,传统的 Internet、移动 Ad Hoc 网络和传感网的路由协议难以有效应用在容迟与容断网络中,容迟与容断网络路由面临新的挑战。在简要介绍了容迟与容断网络的基本特性和路由协议设计挑战之后,提出了路由协议评估指标。然后从单播路由、组播路由和选播路由 3 个方面介绍了容迟与容断网络路由协议的研究进展,最后对主要路由协议进行了综合比较,并指出了未来的研究方向。

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60903004 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2009AA01Z209 (国家高技术研究发展计划(863)); the Beijing Municipal Natural Science Foundation of China under Grant No.4102042 (北京市自然科学基金)

Received 2009-01-17; Revised 2009-09-03; Accepted 2009-10-22

关键词: 容迟网络;容断网络;挑战性网络;间歇连接网络;路由协议

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

传统 Internet 采用 TCP/IP 协议簇作为体系结构,建立在以下基本假设之上:端到端保证持续连接、双向对称的数据率、较低的丢包率、传输时延以及误码率等.然而,近年来部署在极端环境(extreme environment)下的挑战性网络(challenged network)^[1]并不满足传统 Internet 设计假设中的一个或多个,具有间歇连接、频繁割裂、时延极高、非对称的数据率、较高的误码率与丢包率以及异构互连等特性,使得 Internet 体系结构不能有效地应用在这种网络中.例如,深空环境下的行星际(interplanetary)网络与空间传感网;附着在动物身上的传感器组成的移动传感网;战场环境下的战术、战略移动 Ad Hoc 网络;高速行驶的车辆组成的车辆 Ad Hoc 网络;用于发展中国家偏远地区间通信和 Internet 接入服务的信息网络;海洋、湖泊环境下的水声传感网等.

为实现孤岛式异构挑战性网络间互连与互操作以及异步消息的可靠传输,容迟与容断网络(delay and disruption tolerant network,简称 DTN)^[1-3]作为一种新型的网络体系结构应运而生.DTN 体系结构不同于 Internet 体系结构^[4-6],为解决异构挑战性网络间的互操作,在异构网络的传输层与应用层之间,DTN 引入捆绑层(bundle layer).捆绑层作为端到端面向消息(message-oriented)的覆盖层,采用存储转发的消息交换机制、低层逐跳的消息确认机制以及可选的端到端确认策略,提供持续存储(persistent storage)功能;采用保管传递(custody transfer)机制实现 DTN 节点间的消息重传与确认,增加消息传输的可靠性.捆绑层提供的功能类似于 Internet 网关,捆绑层中的消息称为 bundle.DTN 是未来无线网络发展的一个新方向,在环境监测、军事战略、深空探测、反恐安保、森林防火、地震监测、交通管理、水下探测、灾难救援和偏远地区及发展中国家网络基础设施建设等方面具有广泛的应用前景和实用价值.

路由是 DTN 网络层的主要功能,是 DTN 节点间通信以及提高网络连接性的基础.由于 DTN 处于间歇连接、频繁割裂的状态以及节点能量、存储空间有限,节点间往往无法保证实时路径存在,通常需要借助中继节点以多跳路由、存储转发的方式将消息传输到目的节点.因此,传统的适用于 Internet、移动 Ad Hoc 网络和传感网的路由协议^[7-10]很难有效应用于 DTN.设计有效的 DTN 路由协议来提高网络连接性、降低能量消耗与时延、增加消息传输率(delivery ratio)成为 DTN 研究的核心问题之一,DTN 路由协议作为一项关键技术成为新一代无线通信网络研究领域备受关注的前沿热点课题.近年来,国内外的研究机构已经开展了 DTN 路由方面的探索性研究^[11-17],取得了一定的研究进展.IEEE 和 ACM 等国际知名刊物和国际会议发表了大量 DTN 路由方面的重要研究成果,其中,有关会议还专门组织成立了 DTN 研究工作组(如 SIGCOMM/WDTN, SIGCOMM/CHANTS, ICWS/DTN, IWCMC/DTMN, MobiCom/CHANTS 等),《IEEE Journal on Selected Areas in Communications》和 Elsevier 旗下的《Computer Communications》等刊物为 DTN 研究设置了专刊.鉴于近年来国内外 DTN 路由领域的飞速发展,对该领域作一个全面介绍和总结具有重要意义.本文首先分析了 DTN 基本特性及路由设计面临的挑战,然后从单播路由、组播路由和选播(anycast)路由 3 方面以分类方式全面介绍了近年来国内外在 DTN 路由上取得的主要研究成果,并对主要成果逐类进行了比较,最后给出其进一步的研究方向,旨在深入了解和把握 DTN 路由研究的发展趋势,为 DTN 路由的进一步研究提供参考和借鉴.

1 DTN 路由协议概述

1.1 DTN 基本特性及路由设计挑战

DTN 不同于传统 Internet 等网络,主要具有以下基本特性^[1,4,5]:

(1) 间歇连接.由于节点的移动和能量有限,使得 DTN 频繁断开,导致 DTN 拓扑结构不断变化,并处于间歇连接、部分连接的状态,且网络连接状态具有一定的随机性,无法保证实时的端到端路由.

(2) 时延极高、数据率低.端到端时延表示端到端路由上每一跳的时延总和^[3],每一跳上经历的时延可由等待时间、排队时间、传输时间和传播时间组成^[18].由于 DTN 间歇连接特性,可能导致相邻节点在长时间内无法

连接,使得每一跳上经历的时延会极高,从而进一步导致数据率较低,同时还呈现出数据率非对称的特点。

(3) 资源有限、寿命有限.由于受价格、体积和功耗的限制,节点计算、处理与通信能力及存储空间比普通计算机要弱很多,有限的存储空间导致较高的丢包率.资源有限决定路由协议不能太复杂.同时,节点处于极端环境,通常采用电池提供能量,使得其寿命有限,甚至出现传输时延超过节点寿命的可能。

(4) 随机动态拓扑.节点由于环境变化等因素可随机移动,也可因为能量耗尽或故障退出网络,还可由于任务需求加入网络,导致 DTN 拓扑结构动态变化.此外,DTN 链路的间歇连接使其拓扑具有很大的不确定性,体现为 DTN 节点和链路数量及概率分布的变化,决定了路由应当能够适应随机动态拓扑的需要。

(5) 安全性差.节点处于真实物理世界,DTN 除受到传统无线通信网络面临的安全威胁以外,还可遇到窃听、消息修改、路由欺骗、拒绝服务(denial of service,简称 DoS)和恶意代码等安全攻击。

(6) 异构互连.DTN 是面向异步消息传输的覆盖网,通过引入捆绑层,使其可运行在不同异构网络的协议栈上,DTN 网关保证了异构网络互连时消息的可靠传输。

DTN 基本特性使其路由设计面临新的挑战,主要体现在以下几个方面^[12,13,18]:

(1) 路由目标.由于路由环路或节点存储空间有限造成消息(或数据包)丢失,DTN 路由最基本的目标就是最大化消息传输成功的概率(即传输率),同时最小化端到端时延和资源消耗(如存储空间、带宽和电池能量等)。

(2) 资源分配.在保证传输率的前提下尽量减少节点资源消耗,需要在消息传输与资源消耗间做出折衷。

(3) 可靠性.需要采取确认机制实现消息传输的可靠性。

(4) 安全问题.安全是 DTN 路由设计需要考虑的关键因素,DTN 节点容易受到虚假路由信息、确认欺骗、选择性转发等攻击,需要解决路由信息的保密性、完整性、可用性、认证以及入侵检测等问题。

1.2 DTN路由评估指标

根据 DTN 基本特性及其路由设计挑战,本文提出 DTN 路由协议的评估指标如下:

(1) 能量消耗.DTN 节点能量消耗对于 DTN 生存时间具有重大影响,是路由协议必须考虑的核心问题和设计目标,优化能量消耗可进一步提升 DTN 生命周期。

(2) 存储空间.DTN 节点资源有限使其不可承担过多的中继负荷,负荷过载易造成丢包,从而降低传输率,因此,优化存储空间是路由设计的另一目标。

(3) 安全性.每个 DTN 节点都是潜在的路由节点,更易受到攻击.路由面临的威胁主要有 DoS 攻击、虚假路由信息、确认欺骗、选择性转发等.安全性是路由协议评估的重要指标,包括对路由信息的保密性、完整性、可用性和认证以及对节点被攻击的抵抗性等。

(4) 可扩展性.针对实际应用情况,DTN 路由协议必须能够支持较大的网络规模.这是一个较为重要的评估指标,直接关系到路由协议的可用性。

(5) 时延.路由跳数对端到端时延至关重要,同时,时延与应用密切相关,时延大小将直接影响 DTN 的可用性和应用范围,时延是路由协议设计应考虑的重要指标之一。

(6) 复杂性.路由协议一般包括路由发现、路由选择和路由维护等方面,而 DTN 节点的能量、计算和存储能力有限,这要求路由协议尽量简单,操作不能太复杂,以保证 DTN 节点能够正常工作。

(7) 传输率.最大化消息传输率是 DTN 路由设计的目标,传输率是极为重要的 DTN 路由协议评估指标之一,与 DTN 的实际应用密切相关,设计路由时需要在传输率与资源消耗间做出折衷。

当然,DTN 路由协议评估指标还可在上述 7 方面的基础上有针对性地划分得更细些,根据具体需求或单播路由、组播路由和选播路由等不同的路由机制选择一部分指标或增加其他指标。

1.3 文献综述

目前在 DTN 路由方面的研究越来越受到国内外研究者的重视,图 1 给出了近年来 DTN 路由研究的主要文献.如图 1 所示,除综述文献外,DTN 路由研究的主要成果可分为 3 类:单播路由、组播路由和选播路由.根据路由策略的不同,单播路由可分为消息复制/洪泛策略、转发策略、历史/预测策略、编码策略、拓扑知识策略和

概率策略这 6 种类型.

(1) 消息复制/洪泛策略路由为增加消息传输率,由中继节点将消息进行复制,并以洪泛机制转发到下一跳节点,直至目的节点为止.

(2) 转发策略路由根据网络拓扑信息选择最佳路径,消息由此路径以逐跳方式转发至目的节点.

(3) 历史/预测策略路由采用估计的方式,将历史消息传输到目的节点的情况作为先验知识,中继节点通过决策,决定消息的转发.

(4) 编码策略路由转变了传统路由策略的思路,将网络编码或纠错编码(erasure coding)引入消息转发中,解决消息传输过程中面临的丢弃问题,提高网络吞吐量,均衡网络负载.

(5) 拓扑知识策略路由采用特殊移动节点负责 DTN 节点间的消息寻路、调度和传输.

(6) 概率策略路由根据节点移动类型或网络拓扑信息的某种概率分布来进行消息转发.

对于研究成果具有连续性的单播路由协议,将其归为同类;对于难以按上述 6 类进行分类的单播路由,将其归为“其他策略”类型.根据组播是发生在同一区域内还是发生在不同区域间,组播路由可分为基于域内的组播路由和基于域间的组播路由两种类型.对选播路由的研究目前处于起步阶段,则不对其作进一步的分类.

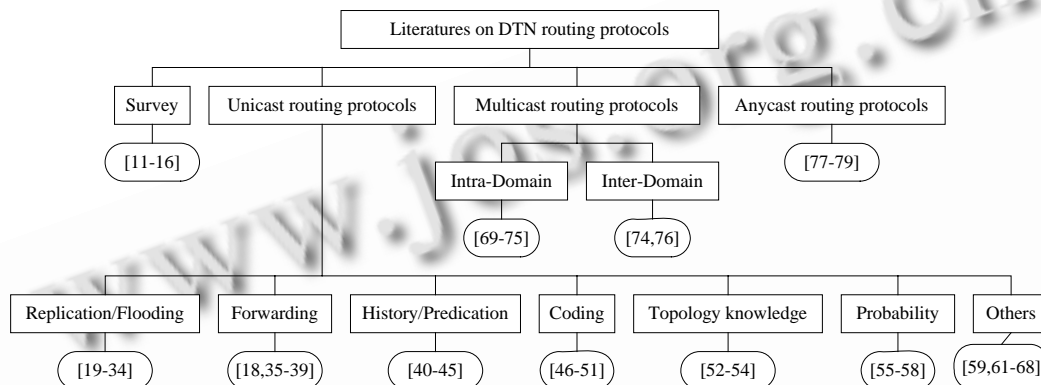


Fig.1 Overview of the literatures on DTN routing protocols

图 1 DTN 路由协议文献综述

2 DTN 路由协议分析

本节详细总结和分析了近年来国内外在 DTN 路由协议上取得的主要研究成果,从单播路由协议、组播路由协议和选播路由协议 3 方面分类进行分析和讨论.

2.1 单播路由协议

针对 DTN 单播路由协议,本文从消息复制/洪泛策略、转发策略、历史/预测策略、编码策略、拓扑知识策略和概率策略等方面分类进行阐述.

2.1.1 基于消息复制/洪泛策略的方法

1) 扩散方式路由(epidemic/spray)

传染性(epidemic)路由协议^[19]是一种基于存储携带转发(store-carry-forward,简称 SCF)方式的路由协议,是研究 DTN 路由的开端.为增加系统吞吐量,SCF 方式利用节点移动性来增加节点间的连接能力.该协议模仿生物环境中传染性病毒扩散传播方式,即每个被病毒传染的个体将把病毒传给与其接触的其他个体.传染性路由采用洪泛机制,每个节点存储所要转发的消息,消息列表由 Hash 表索引,称为总结(summary)向量,每个消息由唯一的标识符确定.当两个节点能够连接(contact:接触,表示具有 1 个通信机会)时,交换总结向量来决定本节点所没有存储的消息,并请求接收其副本,从而完成消息交换.考虑到节点资源消耗,采用长为 32bit 的标识符描述路由跳数,决定消息交换最大次数.通过能够连接的节点间消息交换,最终将源节点产生的消息传输到目的节点.该

协议设计的目标为最大化传输率、最小化端到端时延和总体资源消耗。

文献[20]提出一种节点移动下基于 2 跳中继 1 次复制(single-copy)的路由策略,假设节点独立移动,拥有无限大的存储空间来存储消息,源节点以 1 跳方式将消息随机传输给中继节点,中继节点存储该消息,当中继节点与目的节点连接时,中继节点将消息传输到目的节点,消息传输仅通过 1 次中继、2 跳完成,且消息复制 1 次。文献[21]提出一种基于不动点(fixed point)理论的机会路由策略,将多跳中继 1 次复制策略建模为不动点递归算法,最小化传输时延。与文献[20]不同,文献[22]提出一种 2 跳中继多次复制(multi-copy)路由策略,源节点将消息复制多份传输给能够与其连接的所有邻居节点,这些节点只将消息传输到目的节点。

PREP(prioritized epidemic)协议^[23]是一种基于优先级的传染性路由协议。该协议对每个 bundle 分配 1 个丢弃优先级 p_d 和 1 个传输优先级 p_t ,分别用于 bundle 丢弃和传输。其中, p_d 与 p_t 可取任意实数,其取值越小,优先级越大,并根据优先级函数将 bundle 以优先级方式作区分排序。优先级函数的输入包含到目的节点的成本、到源节点的成本、终止时间和生成时间。节点间的成本由平均可用性(average availability)作为度量标准,链路平均可用性通过传染性路由方式传输到其他节点。该协议具有传输率高的特点。

MRP(message relay protocol)协议^[24]是一种基于中继节点存储转发的路由协议。该协议充分利用了节点的移动性和存储能力,当网络中路由不存在时,节点发起受控(controlled)本地广播过程,将消息通过广播传输给邻居节点作为中继并由其存储消息,由于中继节点存在移动性,因而增加了消息通过中继节点传输到目的节点的概率。文献[25]提出一种基于常微分方程(ordinary differential equations,简称 ODE)模型的统一建模框架,用于研究扩散方式路由协议及其性能评估,ODE 模型采用有限过程马尔可夫模型,获得了评估扩散方式路由协议各种封闭形式的表示式。另外,文献[26]分析了在节点间竞争条件下传染性路由协议的性能,节点间竞争体现为有限带宽、调度和干扰这 3 个方面。文献[27]研究了 (p,q) -Epidemic Routing 问题,即 2-参数传染性路由,通过两个参数的设置,建立了路由统一分析框架。

2) 其他方式路由

MaxProp 协议^[28]是一种基于 UMass DieselNet**的路由协议。该协议对节点存储的数据包进行成本等级划分,成本通过估计数据包传输率获得,从而确定数据包传输的优先级,对于新接收的数据包分配最高的优先级。采用确认机制,避免同一数据包被同一节点接收两次。图 2 给出了 MaxProp 协议的路由策略,依图可知,该协议设定了数据包门限跳数值 t ,若数据包跳数 $< t$,则由跳数确定数据包优先级;若数据包跳数 $\geq t$,则由数据包传输成功概率确定其优先级。该协议具有传输率高、时延低等特点。

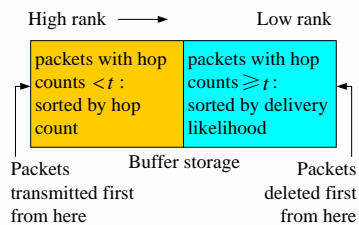


Fig.2 MaxProp routing strategy
图 2 MaxProp 协议的路由策略

RAPID(resource allocation protocol for intentional DTN routing)协议^[29]将 DTN 路由与资源分配问题相结合,采用启发式方法,把 DTN 建模为有向多图 $G=(V,E)$,其中, V 表示节点集, E 表示边集。节点间的接触由有向边 e 表示,进一步地可由二元组 (t_e, s_e) 表示,其中, t_e 表示节点的接触时间, s_e 表示传输机会大小。路由工作量(workload)定义为数据包集合 $P = \{(u_1, v_1, s_1, t_1), (u_2, v_2, s_2, t_2), \dots, (u_i, v_i, s_i, t_i), \dots\}$,其中,第 i 个元组中的元素分别为数据包源端、数据包目的端、传输机会大小和接触时间。根据路由度量标准,定义了以数据包为单位的效用函数,路由度量标准为平均时延、最大时延和超时数据包数。设计了 RAPID 协议的控制信道,用于交换 DTN 整体的系统状态信息。该协议最小化了上述 3 个路由度量标准。

MV(meetings and visits)协议^[30]是一种高效的消息传输路由协议。假设消息传输从处于移动状态的源节点到处于静止状态的目的节点,对于本地产生的消息,节点具有无限的存储空间,对于其他节点产生的消息,节点具有有限的存储空间。当节点 A 与节点 B 接触时,节点 A 将消息列表传输给节点 B,节点 B 计算消息传输概率。

** UMass DieselNet 是由美国 Massachusetts 大学开发的基于车辆网络的 DTN 测试床,当前该网络由 40 辆巴士和部署在路边的 Throwbox 基站组成,可提供巴士间、巴士、乘客及行人间的 IEEE 802.11b 接入功能。

同样,节点 A 接收节点 B 的消息列表,计算消息传输概率.节点 A 根据消息传输概率,重新组织其存储的消息.一般地,节点 k 将消息成功传输到目的节点 i 的消息传输概率定义为

$$P_n^k(i) = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - m_{jk} P_{n-1}^j(i)) \quad (1)$$

其中, n 表示跳数, N 表示节点总数, m_{jk} 表示节点 k 与节点 j 同时访问相同区域的概率.

文献[31]提出一种传输时延低、跳数少的能量有效路由协议 **SPRAY & WAIT**,由两个阶段组成:**SPRAY** 阶段和 **WAIT** 阶段.在 **SPRAY** 阶段,源节点要传输的消息被复制为 L 个,并转发到 L 个不同的中继节点;在 **WAIT** 阶段, L 个中继节点各自进行直接传输(direct transmission),直至把消息传输至目的节点.该协议的特点是简洁、高效.文献[32,33]提出一种基于 Infostation 模型的传染性路由策略,称为 **SWIM**(shared wireless Infostation model)方案.该方案采用 **SCF** 方式,将传感器装置(称为 whale tag)附着在鲸鱼表面上作为节点,以 Infostation 作为基站,将传感器节点收集到的数据以多跳方式传输到基站,其数据传输过程建模为传染性病毒扩散传播的过程.通过节点间的信息共享,降低平均时延.

SRAD(selective replication-based adaptive data delivery)策略^[34]是一种移动传感网中基于选择复制的动态数据传输策略,将消息动态复制给更有可能与 sink 节点通信的节点,延长了网络生命周期,获得了较高的传输率.

2.1.2 基于转发策略的方法

文献[18]提出 6 种基于转发方式的路由算法.考虑到 DTN 网络连接的时变性,将 DTN 建模为有向多图模型,如图 3 所示,每条边表示为 $e_n = ((u, v)_n, c(t), d(t))$,其中, u, v 分别表示该边的源节点和目的节点, $c(t)$ 表示链路容量函数, $d(t)$ 表示时延函数.此外,将网络动态拓扑特性和流量需求抽象为知识 **ORACLE** 集,所谓知识,即对网络状况的一种抽象描述.以知识 **ORACLE** 作为路由问题的输入变量,研究 **ORACLE** 与路由算法性能间的关系.**ORACLE** 分为接触总结、接触、排队和流量需求 4 种类型,每种类型反映出不同的知识量.根据 **ORACLE** 将路由算法分为 3 类:零知识(zero knowledge)路由、部分知识(partial knowledge)路由和完全知识(complete knowledge)路由.具体的 6 种路由算法见表 1,其知识量与性能关系如图 4 所示.

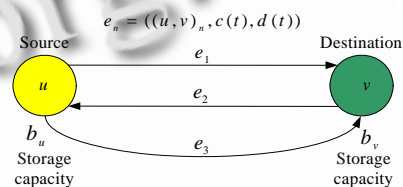


Fig.3 DTN directed multi-graph model
图 3 DTN 有向多图模型

Table 1 Routing algorithms in Reference [18]

表 1 文献[18]提出的路由算法

Abbr.	Name	Description	Oracles used
FC	First contact	Use any available contact	None
MED	Minimum expected delay	Dijkstra with time-invariant edge costs based on average edge waiting time	Contacts summary
ED	Earliest delivery	Modified Dijkstra with time-varying cost function based on waiting time	Contacts
EDLQ	Earliest delivery with local queue	ED with cost function incorporating local queuing	Contacts
EDAQ	Earliest delivery with all queue	ED with cost function incorporating queuing information at all nodes and using reservations	Contacts and queuing
LP	Linear program	Centralized algorithm and requires complete traffic demand	Contacts, queuing and traffic

MEED(minimum estimated expected delay)协议^[35]扩展了文献[18]提出的 **MED** 算法,是一种最小化估计期望时延的路由协议.该协议以端到端时延为度量标准,节点通过滑动历史窗口(sliding history window)记录接触的连接与断开时间,根据节点接触历史记录计算期望时延.当节点本地链路状态信息改变时,更新信息以扩散方式传输到所有节点,实现节点间链路状态的交换.该协议的问题是缺少滑动历史窗口大小的调整机制.

AED(advanced earliest-delivery)算法^[36]是一种增强型 **ED** 的 DTN 路由算法.从路由运行的实际网络环境出发,对文献[18]中 **ORACLE** 的精确性做出考虑,在文献[18]提出的 **ED** 算法的基础上,加入节点的时间精确性因子 $p(\Delta)$,并以此作为 **ED** 算法中接触代价的权重,当节点运动不确定性增加时,**AED** 算法能够维持较好的性能.

文献[37-39]提出一种基于 1 次复制的转发式路由分析框架.文献[37,38]利用移动实体数据骡 **MULE**

(mobile ubiquitous LAN extension)收集、存储传感器节点的感知数据,然后将数据传至接入点,建立了 MULE 的 3 层体系结构(自上而下分别为接入点、MULE 和传感器).文献[39]建立了 4 种 1 次复制机会式(opportunistic)逐跳(hop-by-hop)路由模型,通过比较和仿真,基于混合方法的“Seek and Focus”路由算法具有最佳性能,该算法联合了随机分发策略和基于效用的策略.

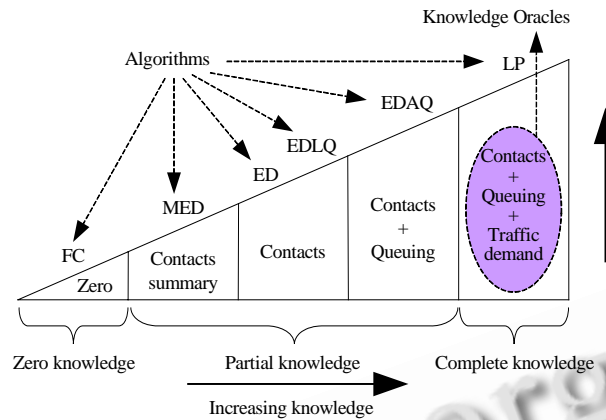


Fig.4 Performance comparison of six different routing algorithms under different levels of knowledge

图4 不同知识量条件下,6种路由算法的性能比较

2.1.3 基于历史/预测策略的方法

在野生动物跟踪的点到点 ZebraNet 无线系统^{***}条件下,文献[40]提出基于洪泛的路由协议和基于历史的路由协议.在 ZebraNet 系统中,被附着在斑马节点上的传感器称为跟踪项圈(tracking collar),节点以 P2P (peer-to-peer)方式将收集的信息传输到具有科学研究功能的移动基站.系统设计目标为利用最少的能量、存储空间和资源消耗实现可靠的数据传输.在基于洪泛的路由协议中,数据被洪泛到邻居节点,根据节点移动性,数据最终被传输到基站;在基于历史的路由协议中,基于过去数据成功传输到基站的情况,每个节点分配 1 个等级值,等级值越高,数据传输到基站的概率越大,因此该协议选择等级值高的节点优先传输数据.

文献[41]扩展了文献[19]的工作,针对节点存储空间有限,提出 4 种 bundle 丢弃策略用于确定节点间的 bundle 交换.bundle 丢弃策略分别为 DRA(drop-random),DLR(drop-least-recently-received),DOA(drop-oldest)和基于节点间接触概率估计的 DLE(drop-least-encountered).DLE 采用基于节点位置和移动信息的自适应方式,仿真结果表明,相比于未采用自适应方式的路由协议,基于 DLE 的传染性路由协议具有较为优越的性能.

CAR(context-aware routing)算法^[42]是一种情景(context)感知的自适应异步路由算法,情景被定义为一种对优化消息传输过程进行描述的属性集.节点间消息的传输通过选择具有最高消息传输概率的节点来完成,传输概率可以通过节点的情景信息获得.另外,文献[42]建立了情景信息评估与预测的框架.

文献[43]提出一种卫星 Ad Hoc 网络中基于审问(interrogation)的中继路由协议,卫星节点间通过彼此间对请求的响应(称为审问)获得网络拓扑和邻居节点信息,从而做出智能路由决策.该协议采用乐观转发(optimistic forwarding),即存储转发,规定 6 种度量标准用来选择下一跳节点.节点间通过交换控制消息开展审问过程,其控制消息采用知识查询与操作语言 KQML(knowledge query and manipulation language).

SEPR(shortest expected path routing)算法^[44]是一种基于最短期望路径的路由算法.文献[44]建立了一个用于描述高度割裂移动 Ad Hoc 网络的随机网络模型,表示为赋权完全图 $\tilde{G}(V)$,其中, V 表示节点集,用权值 $p_{i,j}$ ($0 \leq p_{i,j} \leq 1$)表示节点 i 与 j 间存在连接的概率.根据该模型,定义期望路径长度 $E(T)$ 作为源节点与目的节点间距离的度量标准,其中, T 表示消息从源节点传输到目的节点所需的时间. $E(T)$ 可表示为

^{***} ZebraNet 无线系统于 2004 年部署在肯尼亚的 Mpala 研究中心,主要用于探索与研究无线通信协议和利用高效方法计算斑马位置,并通过附着在斑马上的智能跟踪项圈传感器获取包括 GPS 位置和温度等数据,监测动物的习性.

$$E(T) = E_{path} = \sum_{t=1}^{\infty} t \cdot \prod(t) \quad (2)$$

其中, $\prod(t)$ 为目的节点接收到源节点发送消息的概率分布. SEPR 算法通过历史数据来估计节点 i 与 j 之间的权值 $p_{i,j}$, 即:

$$p_{i,j} = Time_{connection} / Time_Window \quad (3)$$

其中, $Time_{connection}$ 表示节点 i 与 j 保持连接的时间, $Time_Window$ 表示采样时间窗口的长度. 每个节点维持 1 张链路连接概率表, 在节点连接时可进行表更新, 进而根据 Dijkstra 算法获得到其他节点的期望路径长度.

FH(routing algorithm based on transfer history) 算法^[45] 是一种基于转发历史的异步路由算法, 利用分组转发的历史信息智能做出路由决策, 考虑中继节点数量对性能的影响, 以减少由于复制大量分组而产生的网络流量.

2.1.4 基于编码策略的方法

文献[46]提出一种基于纠错编码的路由算法, 其特点是节点开销固定. 该算法扩展了文献[20]的 2 跳中继路由策略, 若复制因子为 r , 消息大小为 M , 则在源节点进行纠错编码获得若干码块, 然后 kr (k 为常量) 个中继均分这若干个码块并直接转发至目的节点; 若目的节点接收到 $1/r$ 个码块, 则消息即可重构.

在文献[46]的基础上, 若接触容量(contact volume)表示 1 次接触时传输的最大数据量, 路径表示接触序列, 则路径容量表示路径上最小的接触容量. 另外, 用 x_i 表示纠错编码的总码块数在第 i 条路径上传输所占的比例, 假设节点 s 传输大小为 m 的消息到节点 d , 节点 s 与 d 之间存在 n 条可行路径, 用 V_i 表示第 i 条路径的路径容量, 用 S_i 表示数据在第 i 条路径成功传输的比例, 假设纠错编码产生 $b=(mr)/l$ 个码块, 且大小为 l , 目的节点只需 m/l 个码块即可重构消息. 文献[47]讨论了一种 NP 困难的最优分配问题: $\forall i \in 1, \dots, n$, 确定 (x_1, x_2, \dots, x_n) , 且 $0 \leq x_i \leq V_i/(mr)$, $\sum_{j=1}^n x_j = 1$, 使得:

$$\max Prob\left(\sum_{i=1}^n x_i S_i \geq 1/r\right) \quad (4)$$

其中, $Prob$ 表示概率运算符. 该最优分配问题的目标是最大化整体的消息传输概率.

EBEC(estimation-based erasure-coding routing) 算法^[48] 是一种联合纠错编码和基于估计方法的路由方案. 该方案基于文献[31]的路由协议, 以单位时间内某节点与其他节点的平均接触频率(average contact frequency, 简称 ACF) 值作为度量标准, 用于估计节点传输消息的能力. 每个节点维持 1 张 ACF 表, 节点间的码块转发量与接收节点的 ACF 值成正比. 文献[49]研究基于纠错编码的混合路由策略, 面向不同的传输内容(以内容为中心), 提出了 3 种消息调度算法: 顺序转发(sequential forwarding)、全交织(full interleaving)和分组交织(block-based interleaving).

文献[50]提出一种基于网络编码的概率转发路由协议. 源节点通过网络编码生成信息向量, 信息向量与编码向量相关联, 节点 v 接收到信息向量和编码向量, 并将其连同本地生成的信息向量存入译码矩阵 G_v 中. 一个接收数据包若能使译码矩阵 G_v 的秩增加, 则称该数据包为 innovative 包. 引入转发因子 d , 当节点接收到 innovative 包时, 生成 d 个新数据包并广播到邻居节点. 当目的节点接收到足够的数据包时, 源节点生成的信息向量被译码, 进而获得重构. 文献[51]将网络编码应用在传染性路由中, 提出了一种随机分析框架.

2.1.5 基于拓扑知识策略的方法

文献[52]提出一种基于移动容迟网络(delay tolerant mobile network, 简称 DTMN) 的区域(region)间信使(messenger)调度方案. 区域由相互连接的节点所组成的簇构成, 区域处于移动状态, 区域间处于断开状态, 区域间的 bundle 传输由信使完成, 如图 5 所示. 为实现区域间 bundle 传输, 提出了 2 种信使所有权(ownership)方案和 3 种信使调度策略, 前者包含区域(regional)信使和独立(independent)信使, 后者包含周期(periodic)时间调度、基于存储(storage-based)的时间调度和按需(on-demand)时间调度.

MF(message ferrying) 方案^[53] 是一种基于特殊移动节点 message ferry 的先验式移动支持(mobility-assisted)路由策略, 由 message ferry 负责节点间的信息传输. 对于节点移动, 引入非随机性(non-randomness)概念, 根据非随机先验式节点移动发起者的不同, 文献[53]把 MF 方案分为 NIMF(node-initiated MF)方案和 FIMF(ferry-initiated MF)方案, 前者由节点主动发起, 后者由 message ferry 主动发起. 仿真结果表明, MF 方案可以有效

地减少节点能量消耗,实现较高的消息传输率.

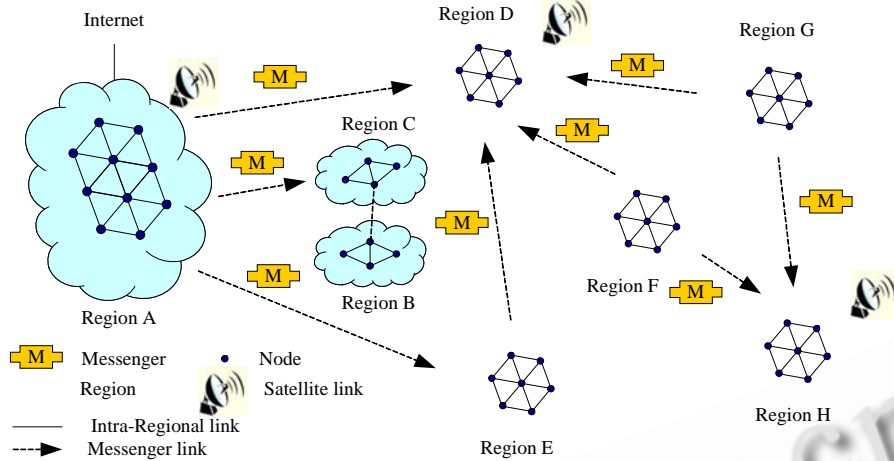


Fig.5 Diagram demonstrating regions and messengers in DTMN

图 5 DTMN 中区域与信使示意图

EZF(elliptical zone forwarding)方案^[54]延续了 MF 方案的思想,是一种基于椭圆区域转发的路由策略,采用 1 个 message ferry 负责无法连接的节点间信息传输.根据消息的传输时效不同,该方案将消息分为紧急(urgent)和常规(regular)两种类型,可看作是两种不同的业务类型.另外,文献[37,38]的路由策略也采用了基于拓扑知识策略的方法,但由于其侧重点不同,仍将其归为基于转发策略的方法.

2.1.6 基于概率策略的方法

文献[55]提出一种基于节点移动类型的路由方案.假设节点在包含 N 个位置的位置集内移动,节点处于相同位置才可通信.节点的移动基于幂律(power law)分布,且每个节点的移动类型定义为一个概率分布 P ,假设基于移动类型的幂律指数为 d ,则节点处于位置 i 的概率为

$$P(i) = K(1/d)^{n_i} \tag{5}$$

其中, n_i 表示节点被发现在位置 i 的概率, K 为常量.由于 $\sum_i P(i) = 1$,可得:

$$K = (1-1/d)/(1-1/d^N) \tag{6}$$

可见,幂律指数 d 成为决定节点移动行为的重要参数.节点移动类型的概率集对应着 N 维欧几里德空间中的一个点,则路由问题可视为寻找与目的节点具有相近的移动类型的节点,并将 bundle 传输到该节点.进一步地,通过计算欧几里德空间中两点间的距离,找到下一跳,文献[55]给出了 4 种计算距离的方法.

PROPHET(probabilistic routing protocol using history of encounters and transitivity)协议^[56]是一种基于概率策略的路由协议,利用节点间相遇(encounter)的历史信息和传递性(transitivity)来选择下一跳节点,以传输可预测性(predictability) $P_{(a,b)} \in [0,1]$ 作为概率度量标准,即:

$$P_{(a,b)} = P_{(a,b)old} + (1 - P_{(a,b)old}) \times P_{init} \tag{7}$$

其中, a 表示任意节点, b 表示节点 a 所知道的目的节点, $P_{init} \in (0,1]$ 表示初始常量.节点的传输可预测性以向量形式存储,且可在节点间进行交换.另外,传输可预测性具有传递性,即若节点 A 常与节点 B 连接,而节点 B 又常与节点 C 连接,则可以认为节点 C 与节点 A 能够以高成功率转发消息,传递性可表示为

$$P_{(a,c)} = P_{(a,c)old} + (1 - P_{(a,c)old}) \times P_{(a,b)} \times P_{(b,c)} \times \beta \tag{8}$$

其中, $\beta \in [0,1]$ 为常量因子.PROPHET 协议的消息转发思想为:当节点 A 与 B 连接时,若节点 B 具有更高的传输可预测性,则节点 A 将消息转发到节点 B .

PD(probabilistic delay)算法^[57]是一种基于概率时延的路由算法,考虑了传输性时延、概率性时延和历史因

素.具体来说,该算法引入了传输性时延、节点间的连接性和预测机制,通过设置参数把节点的连接性和预测转发为时延,时延可体现出路由器间的连接性,把时延量化为数据,通过一定的加权,最后所有参数被统一为一个具有综合意义的数据,采用 Dijkstra 算法寻找最优路由.BDPBR(bounded-delay,probability based routing)算法^[58]将有界传输时延的期望概率标记在消息上进行传输,实现了端到端时延有界的概率路由算法.在达到传输时延指标的前提下,对消息的扩散与转发进行控制,以此来降低通信开销.算法由评估预测和扩散传输两个阶段组成.通过引入必需传输概率(required delivery probability)和必需传输延时(required delivery delay)指标,可以为用户提供更加精确而灵活的消息发送控制方式,并能更好地权衡性能与通信开销之间的关系.

2.1.7 其他方法

SimBet 算法^[59]是一种基于社会网络分析技术的路由算法,社会网络呈现出小世界现象^[60],具体地说,该算法是一种基于节点自私的中间状态集中性(betweenness centrality)与节点社会相似性(similarity)的路由算法.若目的节点对于传输节点或接触是不知的,则为了增加消息传输的概率,消息被传输到更具有集中性的节点.类似地,PSCF(polyogarithmic store-carry-forward)策略^[61]和 SWR(small world routing)协议^[62]也采用了小世界模型来解决 DTN 路由问题.文献[63]根据开销和对邻居节点的知识,提出 5 种适用于车辆无线 Ad Hoc 网络的机会式消息转发算法.文献[64]从避免网络拥塞的角度,提出一种基于 ParaNets 网络体系结构的云路由(cloud routing)策略,根据连接效用重排(connection utility reordering)和云等级重排(cloud rank reordering)两种机制及其组合机制将 bundle 重新排序进行传输.另外,单播路由还有 DHR(DTN hierarchical routing)算法^[65]、MORA(multi-objective robotic assistance)协议^[66]、BLOB 协议^[67]和 SocialCast 协议^[68].

2.2 组播路由协议

针对 DTN 组播路由协议,本文从基于域内的组播路由协议和基于域间的组播路由协议两个方面分类阐述.

2.2.1 基于域内的组播路由协议

为区分 DTN 组播组成员与目的接收节点(intended receiver),文献[69]定义了 3 种组播语义模型(semantic model),分别为时间成员(temporal membership,简称 TM)模型、时间传输(temporal delivery,简称 TD)模型和当前成员传输(current-member delivery,简称 CMD)模型.图 6 给出了 3 种组播语义模型间的关系,其中,CMD 模型是适用最广泛的语义模型,TD 和 TM 模型都在 CMD 模型的基础上加入了一些限制条件,尤其是 TM 模型,其适用范围比较小,

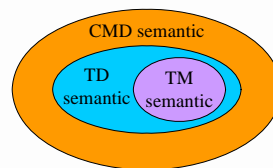


Fig.6 DTN multicast semantic models

图 6 DTN 组播语义模型

对传输信息的组播过程有较多的限制.为抽象描述对网络状态的信息量,借鉴了文献[18]提出的知识 ORACLE 集,建立了组成员知识 ORACLE,提出 4 种组播路由策略,分别为基于单播的路由(unicast-based routing,简称 UBR)、基于广播的路由(broadcast-based routing,简称 BBR)、基于树的路由(tree-based routing,简称 TBR)和基于转发组的路由(group-based routing,简称 GBR),如图 7 所示.在不同的知识 ORACLE 下,4 种路由策略表现出不同的性能,如图 8 所示,BBR 不需要 ORACLE 且具有相同的传输率,其他 3 种策略随着知识量的增加,其传输率也有所增加.根据路由策略和知识 ORACLE,文献[69]提出 5 种路由算法,分别为基于静态树的组播路由(static tree-based routing,简称 STBR)、基于动态树的组播路由(dynamic tree-based routing,简称 DTBR)、基于转发组的组播路由(GBR)、基于广播的组播路由(BBR)和基于单播的组播路由(UBR).STBR 与 DTBR 算法都是基于转发树的,前者为静态的,后者为动态的.

OS-Multicast(on-demand situation-aware multicast)算法^[70]是一种基于动态树的按需式情形(situation)感知组播路由算法.图 9 给出了该算法适用的网络模型,依图可知,DTN 层可被看成是架构在底层网络(如移动 Ad Hoc 网络)之上的网络,DTN 节点实现 DTN 功能,其他节点为常态(normal)节点.在初始阶段,通过向源节点知识库查询到每个目的节点的最短路径,建立以源节点为根的组播树.当中间节点接收到 bundle 时,该节点根据当前网络状况,动态地重建以本节点为根的组播树.该算法包含成员管理、bundle 存储、转发状态维护、消息转发和 bundle 重传 5 部分.与 DTBR 算法相比,OS-multicast 算法采用优先利用属性,改进了 DTBR 算法不能很好地动

态利用当前可行路径的问题,仿真结果表明,在相同的时延条件下,OS-multicast 算法比 DTBR 算法具有更高的传输率.文献[71]综述和比较了多种 DTN 组播路由算法,将 DTN 描述为一个时变网络,在时刻 t 时表示为有向图 $G(t) = (V, E(t))$,其中, V 表示 DTN 节点集, $E(t)$ 表示时刻 t 时的 DTN 链路集. DTN 组播路由问题可抽象为在 $G(t)$ 的链路连接性和存储空间约束条件下,在时间 $[T_s, T_e]$ 内,找到一个组播结构集 $\{MS(t_0), MS(t_1), \dots, MS(t_L)\}$, 将 bundle 从源节点传输到目的接收节点.文献[71]表明,OS-multicast 算法通过引入更多的冗余,改善了组播可靠性,该算法适用于流量负荷(即单位时间内传输的 bundle 数目)小的情形,而 DTBR 算法在流量负荷大的情形下,具有更高效的传输率.

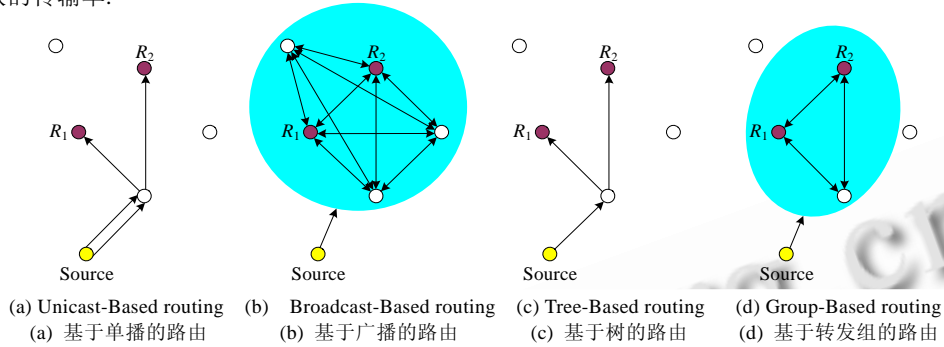


Fig.7 Multicast routing approaches in DTN

图 7 DTN 组播路由策略

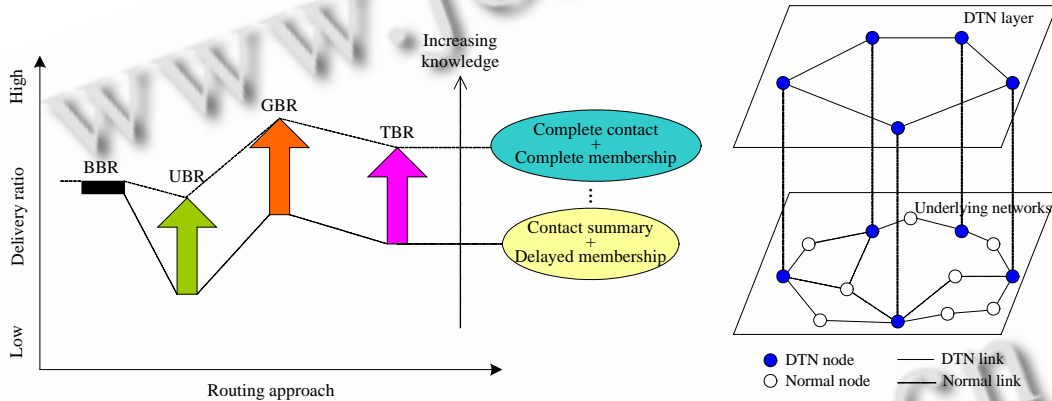


Fig.8 Performance comparison of various multicast routing approaches under different levels of knowledge

图 8 不同知识量条件下组播路由策略性能比较

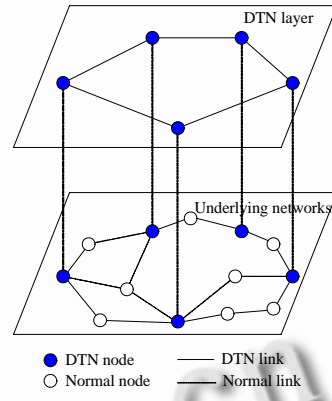


Fig.9 Network model

图 9 网络模型

CAMR(context aware multicast routing)协议^[72]是一种基于节点密度的自适应组播路由协议.该协议包含 5 部分,分别为① 本地节点密度估计,② 2-跳邻居接触概率估计,③ 路由发现,④ 路由修复,⑤ 数据传输.部分①通过节点以 20s 为周期广播邻居发现报文和接收邻居响应报文,获得对平均邻居节点数的估计;部分②通过节点的邻居响应报文的接收情况和因子 β 获得对 2-跳邻居接触概率的估计;若源节点不能与目的节点建立链路,则源节点发起部分③,且节点可以通过调节发射功率来完成路由发现过程;若由于节点的移动性导致破坏组播树结构,则发起部分④;部分⑤采用 bundle 中封装额外首部信息的方式,该首部包含目的接收节点的标识信息,中间节点通过 message ferry 进行数据传输.

EBMR(encounter-based multicast routing)算法^[73]继承了 PROPHET 协议的传输可预测性,是一种基于相遇的 DTN 组播路由算法.该算法规定节点 A 转发 bundle 到节点 B 需满足以下条件之一:① 节点 A 与 B 相遇,且节点 B 的传输可预测性高于传输门限 P_{thresh} ;② 等待时间 WT 超时.若 WT 超时, bundle 还未转发,则节点 A 简单地

选择一个具有更高传输可预测性的节点,并将 bundle 转发给该节点. EBMR 算法的特点是在较少的跳数下实现较高的传输率. 文献[74]提出 EBMR2(encounter based multicast routing with replication)算法,该算法同样采用了基于相遇的 DTN 组播路由算法,对于每个目的接收节点来说,EBMR2 算法将 bundle 复制了 w 次,因此,EBMR2 算法可称为带有冗余的 EBMR 算法.

RelayCast 算法^[75]扩展了文献[20]提出的 2 跳中继 1 次复制路由策略,实现了 DTN 组播路由策略. 图 10 给出了该算法的工作流程,分为两个阶段:① 中继阶段,组播源节点发送数据包到中继节点(中继节点可为目的节点);② 传输阶段,通过数据包复制,中继节点将传输到不同目的节点的数据包存储在不同的队列中,并将数据包最终传输至目的节点. 该算法的吞吐量上界为 $\Theta(\min\{1, n/(n_s n_d)\})$,其中, n 表示总节点数, n_s 表示源节点数, n_d 表示目的接收节点数.

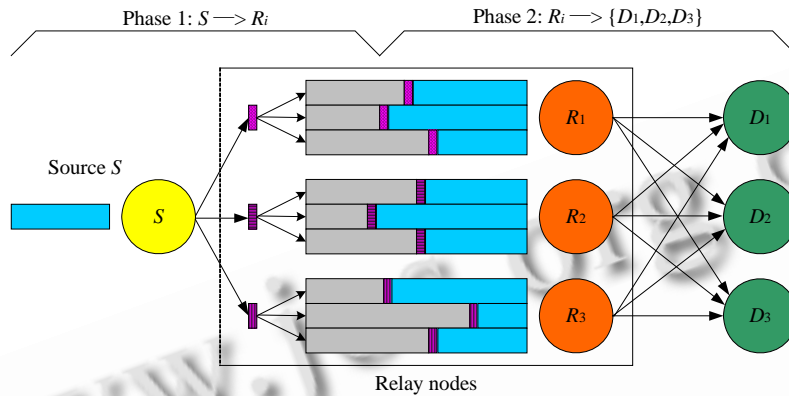


Fig.10 Overall procedure of RelayCast

图 10 RelayCast 算法工作流程

2.2.2 基于域间的组播路由协议

SHIM(scalable hierarchical inter-domain multicast)协议^[76]是一种可扩展的分级域间 DTN 组播路由协议. 假设每个 DTN 区域至少有一个特殊节点,称为域首(domain leader). 如图 11 所示,整个 DTN 网络可划分为两层:上层(域首层)和下层(域层),前者由所有 DTN 区域的域首和组播源节点组成,后者由所有 DTN 区域的其他节点组成. 域首有 4 个角色,分别为源节点域首 SL(source leader)、接收节点域首 RL(receiver leader)、转发节点域首 FL(forwarder leader)和常态节点域首 NL(normal leader). SHIM 协议中 bundle 组播传输采用以下 3 步:① 通过单播路由协议, bundle 由源节点传输到 SL;② 通过域间组播路由协议,在域首层, bundle 由 SL 传输到 RL;③ 通过域内组播路由协议,在域层, bundle 由 RL 传输到目的接收节点. 仿真结果表明,在域间组播环境下,相比于 OS-multicast 算法和 DTBR 算法, SHIM 协议可获得更高的传输率.

FBIMR(ferry-based interdomain multicast routing)算法^[74]是一种基于 message ferry 的域间 DTN 组播路由算法. 该算法的系统模型借鉴了文献[76]提出的 DTN 两层模型结构,综合了 CAMR 协议和 EBMR 算法. 具体来说, FBIMR 算法由 3 部分组成:① 组(或称为域)预订与成员维护;② 域间组播传输;③ 域内组播传输. FBIMR 算法采用 message ferry 进行域间的组播消息转发,采用 EBMR2 算法进行域内的组播消息转发. 域间组播传输的关键是依靠 message ferry 和组首(group leader),当组首与 message ferry 接触时,组首首先检查其是否存储足够多的 bundle,若是,则将 bundle 传输给 message ferry;否则,组首开启 100s 计时器,超时之前,组首周期性地判断其收集的 bundle 数,并随时终止计时器转发 bundle;若超时,则组首直接转发其现有的 bundle.

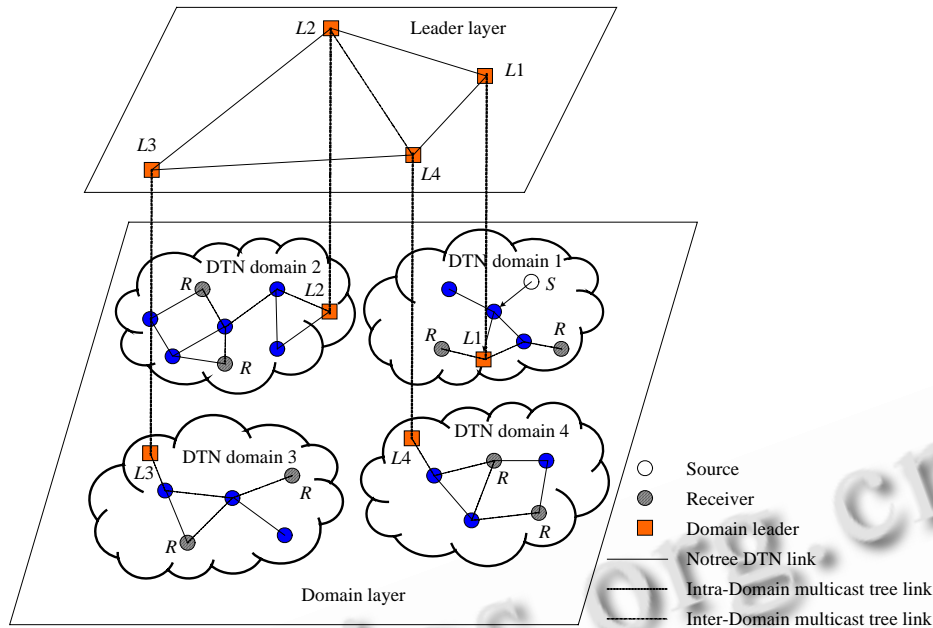


Fig.11 Two layers architecture of DTN

图 11 DTN 的两层模型结构

2.3 选播路由协议

目前,国内外学术领域针对 DTN 选播路由协议的研究还处于起步阶段,本文根据现有的主要文献对该领域作一简要阐述.

文献[77]提出一种基于选播期望多目标时延(expected multi-destination delay for anycast,简称 EMDDA)的选播路由算法.将 DTN 建模为一个有向图 $G=(V,E)$,其中, V 表示节点集, E 表示边集.如图 12 所示,图 G 中源节点 u 与目的节点 v 之间的一条边表示为源节点 u 与目的节点 v 之间存在移动设备, $b(u)$ 与 $b(v)$ 分别表示源节点 u 与目的节点 v 的存储容量.假设在源节点 u 与目的节点 v 之间的移动设备具有相同的移动速度,即具有相同的时延 $d(u,v)$.移动设备的离开时间服从概率分布 $w(u,v)$,移动设备的存储容量为 $c(u,v)$,移动设备的作用相当于节点间信息传输的中继.由于 DTN 选播组成员的动态性特点,文献[77]提出 3 种选播语义模型以进一步具体化消息的目的接收节点,语义模型分别为当前成员(current membership)模型、时间间隔成员(temporal interval membership)模型和时间点成员(temporal point membership)模型.为了刻画从一个节点到与目的选播组中最近成员间的时延,提出一种新的度量标准,即 EMDDA,采用实际期望时延(practical expected delay,简称 PED)表示任意两个节点间的时延,则节点 s 到目的节点集 D 的选播期望多目标时延为

$$EMDDA(s, D) = \min\{PED(s, d_0), PED(s, d_1), \dots, PED(s, d_{L-1})\} \tag{9}$$

其中,节点 $s \in V$,目的节点集 $D = \{d_0, d_1, \dots, d_{L-1}\}$, PED 可由文献[18]提出的 MED 算法求出.

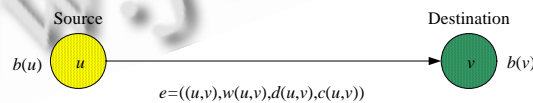


Fig.12 An edge between source and destination nodes in directed graph of DTN

图 12 DTN 有向图中源节点与目的节点间的一条边

文献[78,79]研究了选播组大小对 DTN 选播路由的影响,提出一种基于接收机转发(receiver base forwarding)的选播路由算法,该算法根据路径长度和下一跳可到达的接收机数目进行 bundle 转发.

3 DTN 路由协议比较

通过从单播路由、组播路由和选播路由这 3 个方面对 DTN 路由协议进行分析和讨论,每个协议都有相应的应用条件和研究背景,很难说哪种协议更优越,为了对目前 DTN 路由协议有一个整体的直观认识,本文根据 DTN 路由协议评估指标,分析和比较现有的路由协议优缺点,有助于我们更加全面、深入地理解现有的路由协议,在此基础上,进一步发现和解决相关问题.根据分析结果,可在实际应用环境中选取合适而有效的路由协议,也为设计新的路由协议提供参考.通过第 2 节对 DTN 路由协议的全面分析,无论是单播路由、组播路由还是选播路由,其路由机制均未考虑到安全性指标,故本文暂且不计安全性指标,从能量消耗、存储空间、可扩展性、时延、复杂性和传输率 6 个方面,采用列表的方式对主要路由协议进行分类比较,在表 2 中,A 表示协议;B 表示能量消耗;C 表示存储空间;D 表示可扩展性;E 表示时延;F 表示复杂性;G 表示传输率.

Table 2 Comparison of routing protocols in DTN

表 2 DTN 路由协议比较

A	B	C	D	E	F	G
epidemic ^[19]	Large	Large	Normal	High	Low	High
Ref.[20]	Low	Normal	Normal	High	Low	Low
Ref.[22]	Normal	Large	Normal	High	Low	Low
PREP ^[23]	Limited	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
MRP ^[24]	Large	Large	Normal	Normal	Low	Normal
MaxProp ^[28]	Normal	Normal	Normal	Low	High	High
RAPID ^[29]	Normal	Normal	Bad	Normal	High	Normal
MV ^[30]	Large	Normal	Bad	Normal	High	Normal
Ref.[31]	Low	Normal	Good	Low	Low	Normal
SWIM ^[32,33]	Large	Normal	Normal	High	Low	Normal
FC ^[18]	Low	Normal	Bad	High	Low	Low
MBD ^[18]	Low	Normal	Bad	High	Low	Normal
ED ^[18]	Normal	Normal	Bad	Normal	Normal	Low
EDLQ ^[18]	Normal	Normal	Normal	Low	Normal	Normal
EDAQ ^[18]	Normal	Normal	Normal	Low	Normal	High
LP ^[18]	Normal	Normal	Normal	Low	High	High
MEED ^[35]	Low	Large	Bad	Normal	Low	Normal
Data MULEs ^[37,38]	Large	Normal	Normal	High	Low	Normal
Ref.[40]	Low	Low	Normal	Normal	Normal	Normal
Ref.[41]	Large	Large	Normal	High	Low	High
CAR ^[42]	Normal	Low	Good	Normal	Normal	Normal
Ref.[43]	Normal	Normal	Normal	High	High	Normal
SEPR ^[44]	Normal	Low	Normal	Low	High	Normal
Ref.[46]	Normal	Large	Normal	High	High	High
EBEC ^[48]	Normal	Large	Normal	Normal	High	High
Ref.[50]	Normal	Large	Normal	Normal	High	High
Ref.[52]	Normal	Normal	Bad	High	High	Normal
MF ^[53]	Low	Normal	Normal	Normal	Normal	High
EZF ^[54]	Low	Normal	Normal	Normal	Normal	High
Ref.[55]	Normal	Normal	Bad	Normal	High	Normal
PROPHET ^[56]	Normal	Normal	Normal	Low	Normal	Normal
PD ^[57]	Normal	Normal	Good	Low	Normal	High
BDPBR ^[58]	Normal	Normal	Normal	Low	Normal	Normal
SimBet ^[59]	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	High
STBR ^[69]	Normal	Large	Normal	High	Normal	High
DTBR ^[69]	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	High
GBR ^[69]	Large	Large	Bad	Normal	High	High
BBR ^[69]	Large	Large	Bad	Normal	Low	Normal
UBR ^[69]	Large	Large	Bad	High	Low	Low
OS-Multicast ^[70]	No metric	Normal	Normal	Normal	High	High
CAMR ^[72]	Normal	Normal	Normal	Normal	High	High
EBMR ^[73]	No metric	Large	Normal	Low	Normal	High
EBMR2 ^[74]	No metric	Large	Normal	Normal	Normal	High
RelayCast ^[75]	No metric	Normal	Good	Normal	Normal	High
SHIM ^[76]	No metric	Normal	Good	High	High	High
FBIMR ^[74]	No metric	Large	Normal	High	Normal	High
Ref.[77]	No metric	Small	Bad	Low	Normal	Normal
RBF ^[78,79]	No metric	High	Normal	Low	Normal	High

4 总结与展望

DTN 是未来无线网络技术研究的一个前沿热点领域,路由是 DTN 的一个核心问题.本文在简要分析 DTN 基本特性及路由设计面临挑战的基础上,对近年来国内外在 DTN 路由协议上取得的主要研究成果从单播路由、组播路由和选播路由 3 个方面逐类进行了全面的分析和讨论.通过对各主要协议的比较和分析,并结合我们已开展的研究工作,我们认为,DTN 路由协议在以下几个方面还有待进一步深入研究:

(1) 针对部署在恶劣环境中的 DTN,如深空条件下的空间容迟与容断传感网、海洋湖泊条件下的水声容迟与容断传感网、战场条件下 Ad Hoc 网络等,此类应用场景的最大特点即为节点能量自我供给且十分有限、节点存储和计算处理能力有限,其路由协议应着重考虑:

- 能量效率问题.设计合理、有效的路由协议可极大地降低节点的能量消耗,从而延长节点寿命,进一步延长网络生命周期.因此,研究基于能量优化的路由协议尤为重要,需要从路由机制本身考虑 DTN 能量管理问题,同时,可以从 DTN 各层进一步研究跨层协同的能量保护机制.
- 复杂性问题.由于节点的资源有限和能量限制,使得节点的计算能力和处理功能都十分有限,需要路由协议具有复杂性低的特点.另外,路由协议需要适应网络规模的变化,具有一定的可扩展性.并且,路由协议应具备自适应和容错能力,即部分节点的失效不应影响整个网络的性能.
- 传输率问题.节点存储空间有限性导致数据包丢失,此外,DTN 具有间歇连接的特点,使得网络传输率往往较低,因此,传输率高的路由协议更受到青睐,同时更具有实际应用需求.

(2) DTN 节点都是暴露的设备且缺少物理安全保护,通信方式采用无线传输,容易受到 DoS 攻击、虚假路由信息、确认欺骗、选择性转发等安全威胁,需要解决路由信息的保密性、完整性、可用性、认证以及入侵检测等问题.针对 DTN 路由面临的信息安全问题,可采用有效的密钥管理技术、设计有效的安全路由协议以及建立实用的攻击检测机制、认证机制等路由安全策略,进一步地从更底层提供路由协议的安全性.

(3) 现有 DTN 路由协议缺乏多项评估指标的综合考虑,往往在个别指标上性能优越,但无法优化多项指标,网络整体性能难以获得极大的提升.因此需要利用新的分析工具研究 DTN 路由,同时考虑多个设计目标进行优化,建立基于多目标优化的高效 DTN 路由协议.例如,以节点能量消耗、时延、传输率以及安全性为目标,进行多目标决策,设计出最优路由协议.

(4) 针对 DTN 在高速网络中多媒体应用的需求,如高速行驶下的车辆组成的车辆网络、偏远地区及发展中国家 Internet 接入基础设施建设等,此类应用场景需要路由协议能够提供端到端的服务质量(quality of service, 简称 QoS)控制和保证,如时延、丢包率、带宽、吞吐量等 QoS 指标.DTN 路由协议应当满足特定的 QoS 需求,要与资源管理共同配合,以提供端到端的 QoS 需求.但是,计算满足多 QoS 约束指标的路由是一个 NP 完全问题,因此,需要借助于启发式算法或新的优化工具来计算满足多项 QoS 指标的次优化路由.

(5) 针对 DTN 网络拓扑动态变化和节点随机接入以及节点较强的接入自私性和转发自私性的特点,需要利用新的分析工具研究具有随机动态特性的 DTN 路由问题.关于下一跳节点选择,可采用博弈论作为分析工具,在节点选择间做出某种决策,进而优化某项指标.随机微分博弈(stochastic differential game)理论^[80]更有利于解决随机动态资源分配问题,因此,建立随机微分博弈模型解决 DTN 路由问题是进一步的研究方向.

(6) 针对未来网络应用中频谱利用率低和日益增长的频谱需求间的矛盾,未来网络应用中采用动态频谱接入(dynamic spectrum access)的认知无线电(cognitive radio)技术是必然的发展趋势,这就要求将认知无线电与 DTN 有机地结合,进一步研究认知无线电辅助 DTN(cognitive radio aided DTN)的网络层问题,实现频谱感知和路由相结合的跨层 DTN 路由协议,从而提高频谱利用率.

致谢 在此,我们衷心感谢本文评审专家中肯而有益的修改意见和编辑老师们严谨、热情的工作.同时,向对本文的工作给予支持和提出宝贵建议的同行专家以及北京科技大学信息工程学院移动计算与智能通信实验室和项目组的老师和同学表示诚挚的谢意.

References:

- [1] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets. In: Feldmann A, Zitterbart M, Crowcroft J, Wetherall D, eds. Proc. of the 2003 ACM SIGCOMM. Karlsruhe: ACM Press, 2003. 27–34.
- [2] Burleigh S, Hooke A, Torgerson L, Fall K, Cerf V, Durst B, Scott K, Weiss H. Delay-Tolerant networking: An approach to interplanetary Internet. *IEEE Communications Magazine*, 2003,41(6):128–136.
- [3] Fan XM, Shen ZG, Zhang BX, Chen H. State-of-the-Art of the architecture and techniques for delay-tolerant network. *Acta Electronica Sinica*, 2008,36(1):161–170 (in Chinese with English abstract).
- [4] Cerf V, Burleigh S, Hooke A, Torgerson L, Durst B, Scott K, Fall K, Weiss H. Delay-Tolerant networking architecture. Internet Engineering Task Group (IETF), Request for Comment (RFC): 4838, 2007. <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4838.txt>
- [5] Fall K, Farrell S. DTN: An architectural retrospective. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008,26(5):828–836. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080609]
- [6] Wood L, Eddy WM, Holliday P. A bundle of problems. In: Proc. of the 2009 IEEE Aerospace Conf. Big Sky: IEEE Press, 2009. 1–17. <http://info.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/publications/wood-ieee-aerospace-2009-bundle-problems.pdf>
- [7] Tang Y, Zhou MT, Zhang X. Overview of routing protocols in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006,17(3):410–421 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/410.htm> [doi: 10.1360/jos170410]
- [8] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2005,3(3):325–349. [doi: 10.1016/j.adhoc.2003.09.010]
- [9] Qin L, Kunz T. Survey on mobile ad hoc network routing protocols and cross-layer design. Technical Report, SCE-04-14, Ottawa: Carleton University, Systems and Computer Engineering, 2004.
- [10] Liu CL, Kaiser J. A survey of mobile ad hoc network routing protocols. Technical Report, TR-4, Magdeburg: University of Magdeburg, 2005.
- [11] Zhang ZS. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: Overview and challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2006,8(1):24–37. [doi: 10.1109/COMST.2006.323440]
- [12] Jones EPC, Ward PAS. Routing strategies for delay-tolerant networks. *Computer Communication Review*, 2006. <http://cng.uwaterloo.ca/~pasward/Publications/dtn-routing-survey.pdf>
- [13] Shen J, Moh S, Chung I. Routing protocols in delay tolerant networks: A comparative survey. In: Proc. of the 23rd Int'l Technical Conf. on Circuits/Systems, Computers and Communications. Shimomoseki City: IEICE Press, 2008. 1577–1580. http://www.ieice.org/proceedings/ITC-CSCC2008/pdf/p1577_P2-46.pdf
- [14] Mundur P, Seligman M. Delay tolerant network routing: Beyond epidemic routing. In: Proc. of the 3rd Int'l Symp. on Wireless Pervasive Computing (ISWPC 2008). Santorini: IEEE Press, 2008. 550–553. <http://www.umiacs.umd.edu/~pmundur/iswpc08.pdf>
- [15] Pelusi L, Passarella A, Conti M. Opportunistic networking: Data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 2006,44(11):134–141. [doi: 10.1109/MCOM.2006.248176]
- [16] Zhang ZS, Zhang Q. Delay/Disruption tolerant mobile ad hoc networks: Latest developments. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2007,7(10):1219–1232. [doi: 10.1002/wcm.518]
- [17] Xiong YP, Sun LM, Niu JW, Liu Y. Opportunistic networks. *Journal of Software*, 2009,20(1):124–137 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03467]
- [18] Jain S, Fall K, Patra R. Routing in a delay tolerant network. In: Yavatkar R, Zegura EW, Rexford J, eds. Proc. of the 2004 ACM SIGCOMM. Portland: ACM Press, 2004. 145–158.
- [19] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks. Technical Report, CS-2000-06, North Carolina: Duke University, 2000.
- [20] Grossglauser M, Tse DNC. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2002,10(4):477–486. [doi: 10.1109/TNET.2002.801403]
- [21] Conan V, Leguay J, Friedman T. Fixed point opportunistic routing in delay tolerant networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008,26(5):773–782. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080604]
- [22] Groenevelt R, Nain P, Koole G. The message delay in mobile ad hoc networks. *Performance Evaluation*, 2005,62(1-4):210–228. [doi: 10.1016/j.peva.2005.07.018]
- [23] Ramanathan R, Hansen R, Basu P, Rosales-Hain R, Krishnan R. Prioritized epidemic routing for opportunistic networks. In: Proc. of the 1st Int'l Workshop on Mobile Opportunistic Networking. San Juan: ACM Press, 2007. 62–66.
- [24] Nain D, Petigara N, Balakrishnan H. Integrated routing and storage for messaging applications in mobile ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications*, 2004,9(6):595–604. [doi: 10.1023/B:MONE.0000042498.60917.e8]
- [25] Zhang XL, Neglia G, Kurose J, Towsley D. Performance modeling of epidemic routing. *Computer Networks*, 2007,51(10):2867–2891. [doi: 10.1016/j.comnet.2006.11.028]

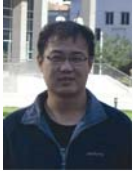
- [26] Jindal A, Psounis K. Performance analysis of epidemic routing under contention. In: Proc. of the 2006 Int'l Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Vancouver: IEEE Communication Society, 2006. 539–544.
- [27] Matsuda T, Takine T. (p,q) -Epidemic routing for sparsely populated mobile ad hoc networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008,26(5):783–793. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080605]
- [28] Burgess J, Gallagher B, Jensen D, Levine BN. MaxProp: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In: Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2006). Barcelona: IEEE Communication Society, 2006. 1–11. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.80.272&rep=rep1&type=pdf>
- [29] Balasubramanian A, Levine BN, Venkataramani A. DTN routing as a resource allocation problem. In: Murai J, Cho K, eds. Proc. of the 2007 ACM SIGCOMM. Kyoto: ACM Press, 2007. 373–384.
- [30] Burns B, Brock O, Levine BN. MV routing and capacity building in disruption tolerant networks. In: Proc. of the 24th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2005), Vol.1. Miami: IEEE Communication Society, 2005. 398–408. <http://prisms.cs.umass.edu/brian/pubs/bburns.infocom.2005.pdf>
- [31] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In: Guerin R, Govindan R, Minshall G, eds. Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM. Philadelphia: ACM Press, 2005. 252–259.
- [32] 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 and Computing. Annapolis: ACM Press, 2003. 233–244. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.3.4776&rep=rep1&type=pdf>
- [33] Small T, Haas ZJ. Resource and performance tradeoffs in delay-tolerant wireless networks. In: Guerin R, Govindan R, Minshall G, eds. Proc. of the 2005 SIGCOMM. Philadelphia: ACM Press, 2005. 260–267.
- [34] Zhu JQ, Liu M, Gong HG, Chen GH, Xu FL, Song C. Selective replication-based data delivery for delay tolerant mobile sensor networks. Journal of Software, 2009,20(8):2227–2240 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3323.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03323]
- [35] Jones EPC, Li L, Schmidtke JK, Ward PAS. Practical routing in delay-tolerant networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2007,6(8):943–959. [doi: 10.1109/TMC.2007.1016]
- [36] Zhou XB, Lu HC, Li JS, Hong PL. AED: Advanced earliest-delivery algorithm used in DTN. Journal of Electronics & Information Technology, 2007,29(8):1956–1960 (in Chinese with English abstract).
- [37] Shah RC, Roy S, Jain S, Brunette W. Data mules: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. In: Proc. of the 1st IEEE Workshop on Sensor Network Protocols and Applications. Anchorage: IEEE Communication Society, 2003. 30–41.
- [38] Jain S, Shah R, Brunette W, Borriello G, Roy S. Exploiting mobility for energy efficient data collection in wireless sensor networks. Mobile Networks and Applications, 2006,11(3):327–339. [doi: 10.1007/s11036-006-5186-9]
- [39] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C. Single-Copy routing in intermittently connected mobile networks. In: Proc. of the 1st IEEE Int'l Conf. on Sensor and Ad hoc Communications and Networks. Santa Clara: IEEE Communication Society, 2004. 235–244. <http://people.ee.ethz.ch/~spyropot/papers/secon.pdf>
- [40] Juang P, Oki H, Wang Y. 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 (ASPLOS 2002). San Jose: ACM Press, 2002. 96–107.
- [41] Davis JA, Fagg AH, Levine BN. Wearable computers as packet transport mechanisms in highly-partitioned ad-hoc networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Semantic Web Conf. (ISWC 2003). Berlin: Springer-Verlag, 2003. 141–148.
- [42] Musolesi M, Hailes S, Mascolo C. Adaptive routing for intermittently connected mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 2005 IEEE Int'l Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Taormina: IEEE Computer Society, 2005. 183–189.
- [43] Shen CC, Borkar G, Rajagopalan S, Jaikao C. Interrogation-Based relay routing for ad hoc satellite networks. In: Proc. of the 2002 IEEE GLOBECOM. Taipei: IEEE Communication Society, 2002. 2920–2924.
- [44] Tan K, Zhang Q, Zhu WW. Shortest path routing in partially connected ad hoc networks. In: Proc. of the 2003 IEEE GLOBECOM. San Francisco: IEEE Communication Society, 2003. 1038–1042. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01258396>
- [45] Chen H, Fan XM, Shan ZG. Forwarded history-based asynchronous routing for challenged networks and research of the number of relays. Chinese Journal of Computers, 2008,31(10):1687–1694 (in Chinese with English abstract).
- [46] Wang Y, Jain S, Martonosi M, Fall K. Erasure-Coding based routing for opportunistic networks. In: Guerin R, Govindan R, Minshall G, eds. Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM. Philadelphia: ACM Press, 2005. 229–236.
- [47] Jain S, Demmer M, Patra R, Fall K. Using redundancy to cope with failures in a delay tolerant network. In: Guerin R, Govindan R, Minshall G, eds. Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM. Philadelphia: ACM Press, 2005. 109–120.

- [48] Liao Y, Tan K, Zhang ZS, Gao LX. Estimation based erasure-coding routing in delay tolerant networks. In: Proc. of the 2006 Int'l Wireless Communications and Mobile Computing Conf. Vancouver: IEEE Communication Society, 2006. 557–562.
- [49] Chen LJ, Yu CH, Tseng CL, Chu HH, Chou CF. A content-centric framework for effective data dissemination in opportunistic networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008,26(5):761–772. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080603]
- [50] Widmer J, Le Boudec JY. Network coding for efficient communication in extreme networks. In: Guerin R, Govindan R, Minshall G, eds. Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM. Philadelphia: ACM Press, 2005. 284–291.
- [51] Lin YF, Li BC, Liang B. Stochastic analysis of network coding in epidemic routing. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008,26(5):794–808. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080606]
- [52] Harras K, Almeroth K. Inter-Regional messenger scheduling in delay tolerant mobile networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Buffalo: IEEE Computer Society, 2006. 93–102.
- [53] Zhao WR, 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. Tokyo: ACM Press, 2004. 187–198.
- [54] Chuah MC, Yang P. A message ferrying scheme with differentiated services. In: Proc. of the 2005 Military Communication Conf. (MILCOM 2005). Atlantic City: IEEE Press, 2005. 1521–1527.
- [55] Leguay J, Friedman T, Conan V. DTN routing in a mobility pattern space. In: Guerin R, Govindan R, Minshall G, eds. Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM. Philadelphia: ACM Press, 2005. 276–283.
- [56] Lindgren A, Doria A, Schelen O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. *Mobile Computing and Communications Review*, 2003,7(3):19–20. [doi: 10.1145/961268.961272]
- [57] Xue JF, Lu HM, Shi L. Design of DTN routing algorithm based on probabilistic delay. *Trans. of Beijing Institute of Technology*, 2008,28(8):687–691 (in Chinese with English abstract).
- [58] Li XN, Zhou XW. Bounded-Delay, probability-based routing in intermittently connected mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 28th Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2008). Beijing: IEEE Computer Society, 2008. 210–215.
- [59] Daly E, 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 Press, 2007. 32–40.
- [60] Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998,393(4):400–412.
- [61] Wu J, Yang SH. Small world model-based polylogarithmic routing using mobile nodes. *Journal of Computer Science and Technology*, 2008,23(3):327–342. [doi: 10.1007/s11390-008-9136-9]
- [62] Hu FL, Xiao HJ. A small world routing protocol in wireless networks. *Computer Engineering & Science*, 2008,30(8):30–35 (in Chinese with English abstract).
- [63] LeBrun J, Chuah C, Ghosal D, Zhang M. Knowledge-Based opportunistic forwarding in vehicular wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE 62nd Semiannual Vehicular Technology Conf. (VTC 2005). Stockholm: IEEE Press, 2005. 2289–2293.
- [64] Wittie MP, Harras KA, Almeroth KC, Belding EM. On the implications of routing metric staleness in delay tolerant networks. *Computer Communications*, 2009,32(16):1699–1709. [doi: 10.1016/j.comcom.2009.02.006]
- [65] Liu C, Wu J. Scalable routing in delay tolerant networks. In: Proc. of the 8th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad hoc Networking and Computing. Montreal: ACM Press, 2007. 51–60.
- [66] Burns B, Brock O, Levine BN. MORA routing and capacity building in disruption-tolerant networks. *Ad Hoc Networks*, 2008,6(4):600–620. [doi: 10.1016/j.adhoc.2007.05.002]
- [67] Thomas M, Phand S, Gupta A. Using group structures for efficient routing in delay tolerant networks. *Ad Hoc Networks*, 2009,7(2):344–362. [doi: 10.1016/j.adhoc.2008.04.001]
- [68] Costa P, Mascolo C, Musolesi M, Picco GP. Socially-Aware routing for publish-subscribe in delay-tolerant mobile ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008,26(5):748–760. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080602]
- [69] Zhao WR, Ammar M, Zegura E. Multicasting in delay tolerant networks: Semantic models and routing algorithms. In: Guerin R, Govindan R, Minshall G, eds. Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM. Philadelphia: ACM Press, 2005. 268–275.
- [70] Ye Q, Cheng L, Chuah MC, Davison BD. OS-Multicast: On-Demand situation-aware multicasting in disruption tolerant networks. In: Proc. of the IEEE 63rd Semiannual Vehicular Technology Conf. (VTC 2006). Melbourne: IEEE Press, 2006. 96–100.
- [71] Ye Q, Cheng L, Chuah MC, Davison BD. Performance comparison of different multicast routing strategies in disruption tolerant networks. Technical Report, LU-CSE-08-009, Bethlehem: Lehigh University, 2008.
- [72] 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.
- [73] Xi Y, Chuah MC. An encounter-based multicast scheme for disruption tolerant networks. *Computer Communications*, 2009,32(16):1742–1756. [doi: 10.1016/j.comcom.2008.09.031]

- [74] Yang P, Chuah MC. Efficient interdomain multicast delivery in disruption tolerant networks. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN 2008). Wuhan: IEEE Press, 2008. 81–88.
- [75] Lee U, Oh SY, Lee KW, Gerla M. RelayCast: Scalable multicast routing in delay tolerant networks. In: Proc. of the 16th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP 2008). Orlando: IEEE Press, 2008. 218–227.
- [76] Ye Q, Cheng L, Chuah MC, Davison BD. SHIM: A scalable hierarchical inter-domain multicast approach for disruption tolerant networks. In: Proc. of the Int'l Wireless Communications and Mobile Computing Conf. (IWCMC 2007). Honolulu: IEEE Communication Society, 2007. 170–175. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.120.4494>
- [77] Gong YL, Xiong YQ, Zhang Q, Zhang ZS, Wang WJ, Xu ZW. Anycast routing in delay tolerant networks. In: Proc. of the 2006 IEEE GLOBECOM. San Francisco: IEEE Communication Society, 2006. 1–5.
- [78] Hadi F, Shah N, Syed AH, Yasin M. Effect of group size on anycasting with receiver base forwarding in delay tolerant networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Electrical Engineering (ICEE 2007). Hong Kong: IEEE Press, 2007. 1–4.
- [79] Hadi F, Shah N, Syed AH, Yasin M. Adaptive anycast: A new anycast protocol for performance improvement in delay tolerant networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Integration Technology (ICIT 2007). Shenzhen: IEEE Press, 2007. 185–189.
- [80] Yeung DWK, Petrosyan LA. Cooperative Stochastic Differential Games. New York: Springer-Verlag, 2005.

附中文参考文献:

- [3] 樊秀梅,单志广,张宝贤,陈辉.容迟网络体系结构及其关键技术研究.电子学报,2008,36(1):161–170.
- [7] 唐勇,周明天,张欣.无线传感器网络路由协议研究进展.软件学报,2006,17(3):410–421. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/410.htm> [doi: 10.1360/jos170410]
- [17] 熊永平,孙利民,牛建伟,刘燕.机会网络.软件学报,2009,20(1):124–137. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.00124]
- [34] 朱金奇,刘明,龚海刚,陈贵海,许富龙,宋超.延迟容忍移动传感器网络中基于选择复制的数据传输.软件学报, 2009,20(8): 2227–2240. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3323.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03323]
- [36] 周晓波,卢汉成,李津生,洪佩琳.AED:一种用于DTN的增强型Earliest-Delivery算法.电子与信息学报,2007,29(8):1956–1960.
- [45] 陈辉,樊秀梅,单志广.受限网络中基于转发历史异步路由及中继数量研究.计算机学报,2008,31(10):1687–1694.
- [57] 薛静锋,陆慧梅,石琳.基于概率延迟的DTN路由算法的设计.北京理工大学学报,2008,28(8):687–691.
- [62] 胡福林,肖海军.无线网络中的一种基于小世界模型的路由协议.计算机工程与科学,2008,30(8):30–35.



张龙(1983—),男,河北邯郸人,博士生,主要研究领域为容迟与容断网络,认知无线电,空间通信,未来信息网络.



邓宇(1982—),男,博士,研究员,主要研究领域为无线通信,MIMO,分布式通信系统,认知无线电.



周贤伟(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为认知无线电,通信网安全,下一代网络,通信中的调度理论.



吴启武(1981—),男,博士生,主要研究领域为无线网络,安全路由,密钥管理,智能光网络.



王建萍(1974—),女,博士,副教授,主要研究领域为光纤通信,微波光子学,下一代网络,智能光网络.