

# 物联网环境下数据转发模型研究\*

李继蕊<sup>1,2</sup>, 李小勇<sup>1,2</sup>, 高雅丽<sup>1,3</sup>, 高云全<sup>1,2</sup>, 方滨兴<sup>1,2</sup>



<sup>1</sup>(可信分布式计算与服务教育部重点实验室(北京邮电大学),北京 100876)

<sup>2</sup>(北京邮电大学 网络空间安全学院,北京 100876)

<sup>3</sup>(北京邮电大学 软件学院,北京 100876)

通讯作者: 李小勇, E-mail: lxyxjtu@163.com

**摘要:** 随着 5G 移动通信技术、软件定义网络、命名数据网、移动边缘计算或雾计算等新兴技术或方法的出现及深入研究,物联网应用得到进一步升华.在这种应用场景多样化、服务质量高要求、参与对象普及化的环境下,隶属物联网子范畴的传统无线传感器网络数据转发模型已经不能完全适应这种时代需求,更加适合物联网应用的数据转发模型成为物联网连续性服务保障的基础性问题及研究热点.首先对物联网架构及其应用环境下的数据转发的关键问题进行了分析;其次,对目前具有代表性的物联网数据转发相关研究成果进行了分类总结;然后,选取不同物联网场景下典型的数据转发模型及其使用的数学方法进行评述、分析和对比;最后,指出目前研究中存在的问题及相应的解决方案,并对未来的发展方向进行了展望.研究表明:5G 等新兴技术的出现,为物联网环境下数据转发模型的研究带来了新的机遇和挑战,今后的工作重点是对物联网环境下数据转发的节能模型和方法进行攻关,为实际应用提供坚实的理论基础.

**关键词:** 物联网;数据转发;无线传感网;移动机会网络;命名数据网络;移动边缘计算

**中图法分类号:** TP393

中文引用格式: 李继蕊,李小勇,高雅丽,高云全,方滨兴.物联网环境下数据转发模型研究.软件学报,2018,29(1):196-224.  
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/5373.htm>

英文引用格式: Li JR, Li XY, Gao YL, Gao YQ, Fang BX. Review on data forwarding model in Internet of Things. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2018,29(1):196-224 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5373.htm>

## Review on Data Forwarding Model in Internet of Things

LI Ji-Rui<sup>1,2</sup>, LI Xiao-Yong<sup>1,2</sup>, GAO Ya-Li<sup>1,3</sup>, GAO Yun-Quan<sup>1,2</sup>, FANG Bin-Xing<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(Key Laboratory of Trustworthy Distributed Computing and Service of Ministry of Education (Beijing University of Posts and Telecommunications), Beijing 100876, China)

<sup>2</sup>(School of Cyberspace Security, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

<sup>3</sup>(School of Software, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** With the in-depth researches of new technologies or methods such as 5G, software defined networking (SDN), named data networks (NDN), and mobile edge computing or fog computing, Internet of Things (IoT) applications undergo further advancement. In an environment of variety of application scenarios, high quality of service and universal participation of objects, data forwarding models based on traditional wireless sensor networks (WSN) that is the subset of IoT cannot fully adapt to meet the needs. Therefore, in order to guarantee the successive of IoT services, it is the most basic problem and research interest to develop data forwarding mechanism more

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61370069, 61672111); 北京市自然科学基金(4162043); 国家重点研发计划(2016QY03D0605)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61370069, 61672111); Natural Science Foundation of Beijing, China (4162043); National Key Research and Development Program of China (2016QY03D0605)

收稿时间: 2017-05-12; 修改时间: 2017-07-17; 采用时间: 2017-08-23; jos 在线出版时间: 2017-10-09

CNKI 网络优先出版: 2017-10-09 16:20:50, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20171009.1620.001.html>

suitable for IoT. First, in this paper, the architecture of IoT and the key problems of data forwarding in IoT are analyzed. Second, a number of representative studies of data forwarding for IoT are classified. Then, for the chosen typical data forwarding models in different IoT scenarios, their mathematic methods, merits and shortcomings are reviewed along with a comparison of the models in many aspects. Finally, the research problems are analyzed in detail and some future development directions are suggested. In summary, this study shows that the emergence of the new technologies, such as 5G, brings the opportunities and challenges for the research of data forwarding model in IoT. Thus, the key emphasis in future work will be the theoretical research of the model and method of energy-efficient of data forwarding in IoT in providing a solid foundation for the practical applications.

**Key words:** Internet of Things; data forwarding; wireless sensor network; mobile opportunity network; named data network; mobile edge computing

目前,几乎所有的智能设备和物体都嵌入了传感器,这使得它们能够实时感知环境信息,如:汽车、可穿戴设备、笔记本、传感器、工业和公用事业组件等智能设备都通过网中网相连,并且具有一定的可改变人们工作和娱乐等各种生活方式的数据分析能力,使绝大多数人通过互联网完成他们的需求或工作,甚至业务或交易.这一过程的实现,要求人们与连接上网络的许多设备或物体进行互动或通信,由 Gubbi 等人<sup>[1]</sup>提出的物联网(Internet of Things,简称 IoT)模式反映了整个世界当前和未来的这种场景.而且,物联网研究者们曾声明<sup>[2]</sup>:到 2020 年,物联网将明显地增长至覆盖我们生存环境中的所有物体,创建一个所谓的万联网(Internet of everything,简称 IoE).这种现象已经激起一些关于物联网的有趣应用概念,比如智能家居或家庭、智能城市、环境监测、智能医疗、食品溯源、国防军事、智能交通和智能环境等,其中,几乎所有概念的实际应用场景都要求实时响应或及时转发数据给用户,否则,数据就会失效,服务会产生中断,用户体验质量下降.因此,数据转发性能的提高,是实现物联网服务连续性的有力保障<sup>[3]</sup>.

尽管过去许多领域的研究工作者已经致力于提高物联网数据转发的性能,但因物联网环境的复杂多变性,许多亟待解决的技术问题依然存在.本文在介绍物联网体系结构和数据转发关键性问题的基础上,分析了当前一些典型的物联网数据转发应用模型,包括近些年出现的新兴技术或概念(比如 5G 网络、D2D 技术、命名数据网络、软件定义网络、雾计算或移动边缘计算等)对物联网数据转发策略研究带来的变化和影响,并在可靠性、扩展性和鲁棒性等方面进行对比分析.最后,对物联网数据转发未来的研究趋势进行展望和总结.

## 1 物联网数据转发问题

### 1.1 物联网体系结构

物联网技术是以能够提供灵活有效资源的云计算为根基的,它主要依靠感知层技术(如射频识别、短距离无线通信、传感器等)、网络层技术(有线或无线接入方式)、业务及应用层技术(信息发现、智能处理、中间件、分布式计算等)等按照协议约定将世界万物全部连入信息系统,达到缩小信息系统与物理世界距离的目的<sup>[4]</sup>.分布式的物联网设备产生的巨大数据业务可以通过互联网被传输到称为“智能大脑”的远程云来处理<sup>[5,6]</sup>,其体系结构如图 1 所示.

无线通信技术的发展,促使物联网应用模式变得更加丰富多彩.为了研究海洋生物或陆地野生动物的生活习性,可以在它们身上装备传感器以便收集相关数据进行分析;在商场、公园等人群密集的地方,可以借助人手机等智能设备收集或转发温度、湿度、尘粒浓度等数据以便进行 PM2.5 的监测,为人类提供户外活动的实时信息指导;为了便于人们出行,在城市交通网络中安装各种智能无线传输设备,能够进行实时路况监测,实现安全、可靠的高效率智能交通运输.除此之外,对其他具有挑战性的特殊领域(比如军事等)应用无线通信技术实现实时信息监测也具有重大意义,这些情形充分展现了物联网应用的泛在性.文献[7]将物联网的网络架构、通信技术、数据融合、异构网络融合等 8 个方面归结为其领域的主要研究内容,其中蕴含着物联网实现的整个过程,即:在物联网应用过程中,要遵循相关标准,在其网络架构的基础上,通过智能设备感知并采集数据,利用通信技术传递信息数据,完成数据融合和异构网络融合的任务,为其应用和开发服务,并且整个过程要保障信息安全和保密.显然,通过人或/和物互连实现信息共享,是物联网应用研究的核心.而信息共享的过程需要对数

据进行感知、转发和处理等一系列操作,其中,数据转发就是将各类感知节点采集到的数据通过一跳或多跳的方法传递到网关或汇聚节点,实现物联网信息及时处理的过程.多年来,众多国内外研究者致力于实现各种物联网环境下高效节能的数据转发,比如:针对低占空比的无线传感网,文献[8]提出了一种基于最优前导码(发送有用信号之前发送的一系列信号)长度的轻量级数据转发策略;文献[9]针对机会水下传感网提出一种数据传播可控制的策略以提高转发性能;基于本地活跃度和社会相似性,文献[10]提出一个适用于移动社交网络的数据转发策略;文献[11]针对具有社区特征的车载网络提出了一种考虑旅行信息的数据转发策略;文献[12-18]也是有关物联网各种应用服务下的数据转发研究等等.由此可见,信息传递或数据转发是物联网应用实现的一个至关重要的关键步骤.

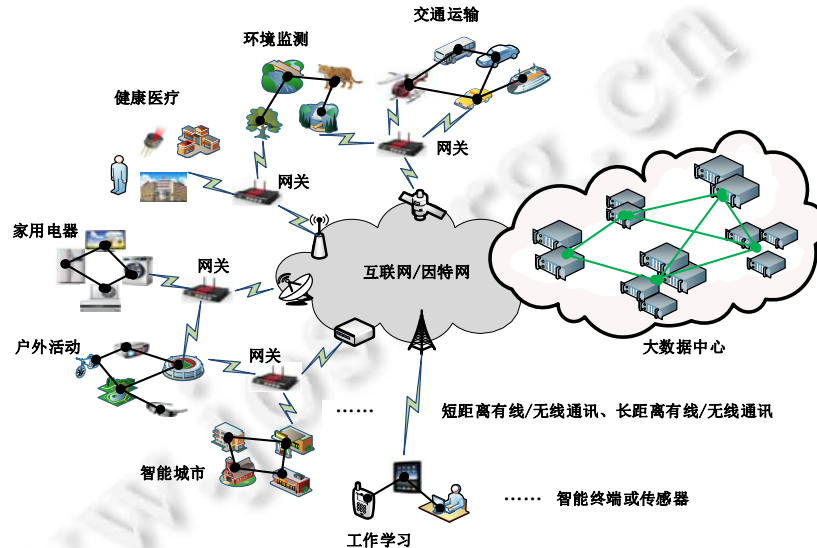


Fig.1 IoT architecture

图 1 物联网体系结构

## 1.2 物联网数据转发机制

物联网数据转发主要依靠网络技术完成.在物联网应用的发展历程及模式中,其网络技术主要包括传统无线传感网络和移动机会网络两种表现形式.传统无线传感网络是物联网概念早期的主要应用方式,它属于有意主动部署传感网,目前在很多领域依然占据主导地位.传统无线传感网络在绝大多数情况下是以固定网络拓扑结构为基础、按实际需求添加部分动态节点进行各种相关研究的,其中,所有固定传感器节点基本上是事先按随机或有意撒播的方式部署,而动态传感器节点数目较少,仅起到辅助作用,可作为中间转发媒介节点对固定节点收集的数据进行二次收集,以达到整个无线传感网络节能的目的.这种情况下的数据转发主要依靠转发数据本身信息、节点实时状态或事先设定好的转发方式(如周期转发、传染病模式等)完成数据从传感器收集节点经系列中间传输节点(固定传感器节点或移动传感器节点)以高速度、高质量、低能耗为目标传送到 sink 节点,其网络拓扑结构的动态性变化主要由节点有限能量的丧失引起,显然,这种节点能量的不稳定性很容易导致传递数据的丢失,引起收集数据的不完整性.再者,节点硬件节能技术又难以有实质性的提升,这些都成为提高传统无线传感网络数据转发性能的主要障碍.

移动智能设备的出现使物联网的应用模式发生了很大的变化,其数据转发的机制研究也随之有了进一步的突破([Http://vdisk.weibo.com/s/dGCJpMRG5imI](http://vdisk.weibo.com/s/dGCJpMRG5imI)).思科公司曾预测:到 2019 年,连入互联网的设备将每年产生 507.5ZB 的数据量;欧洲委员会也曾提出:到 2020 年,将有 500~1 000 亿的智能设备接入互联网<sup>[19]</sup>.显然,连网智能设备数量在急剧增长,由其产生的数据流是高容积和高速度的.同时,通信技术的发展,促使如 GPS、距离传感器、摄像头、陀螺仪等各种类型的传感器应运而生,集成传感器的各种高性能移动智能终端或便携式智能设备

具有越来越强的计算和通信能力,它们可以组成移动感知机会网络,也可以融入无线传感网,充当无线传感网中的数据收集或传递节点,采用逐跳的方式完成数据传输,两者构成互补<sup>[20]</sup>。“存储-携带-转发”是移动感知机会网络节点的特点,它能满足间歇式连网的需要,其拓扑结构具有随上下文、时间和空间的动态变化性。作为机会网络节点的智能设备的移动或部署与人类行为特性密切相关,并且后者会对前者产生一定的影响,所以在移动机会网络数据转发研究中,其节点具有人性化特征,即,持有者或实施者的许多特性或行为在数据转发过程中将被考虑作为主要因素,这使得机会网络数据转发研究相对于传统无线传感网下的数据转发研究更加贴近实际。虽然机会网络的节点资源也是受限的,但其中很多节点的能量易于获取,可再次循环利用,因此,可通过提高机会数据转发性能为物联网应用服务连续性提供进一步的可靠保障。目前,机会网络数据转发在各个领域均有广泛的应用研究,比如车载网络、水下传感网络、社交网络、无线体域网、路网等,其转发机制常见的有基于编码的、基础设施帮助的、冗余或复制的、节点主动运动的、效用的、节点间社会关系的等。

物联网应用在传统无线传感网的基础上借助各种智能设备的传感器感知一切事物信息,这种新模式改变了传统无线传感网的运作方式,能够降低其网络部署成本,为全连通网络提供更多的数据传输机会,在很大程度上提高了数据收集和融合的性能,也为无线传感网带来新的机遇和挑战,满足随处感知和泛在互联的物联网基本需求。显然,高效率、低能耗的数据转发是保障物联网连续性服务的一个研究重点,值得深入探究。

### 1.3 挑战性问题

根据文献[9,21]和其他相关研究成果,物联网数据转发的挑战性问题主要包括以下6个方面。

#### (1) 能耗问题

节点的电池具有很短的寿命,某些情况下,电池通常是难以替换的,并且太阳能也难以利用,比如环境监测、水下传感网、视频共享等。因此,数据转发的目的之一就是要降低能耗。

#### (2) 传播时延

传播时延指的是数据从源节点发出并传输到目标节点所耗费的时间。电磁波和光波是物联网数据转发的主要通信媒介,但这两种技术并非适用于所有物联网应用,比如:监测海洋生物活动的传感网络主要依靠声波,它是一种典型的物理层技术。尽管如此,传播时延仍然是物联网数据传输的一个重要性能衡量指标。因此,在不同的物联网应用场景中,减少传输时延是提升数据转发性能的一项重要措施。

#### (3) 投递率

数据转发应用于物联网的各种场景中,比如间歇性连接的网络,投递率指的是目标节点成功收到的总数据包数与源节点一共发出的总数据包数的比值。即使采用传染病模型进行数据转发,也不能保证从源节点到目标节点具有很高的投递率。因此,提升投递率仍然是数据转发的一项重要任务。

#### (4) 网络动态拓扑模型

在复杂的物联网环境中,智能终端总是在不规则地运动,节点间的连接可能随时产生或消失,网络的拓扑结构也随之不断地变化,因而,转发数据不可能总是沿一条事先设定好的路径进行传输。所以,网络环境的高性能动态拓扑模型构建也成为了提高数据转发效率的途径之一。

#### (5) 转发代价

通常,物联网数据从源节点借助  $n(n \geq 0)$  个中间节点将单个或多个副本采用一跳或多跳的方式传输到达目标节点。转发代价指的是整个传输过程中转发的总数据包数与目标节点成功收到的总数据包数的比值。为了满足整个社会绿色计算的需求,转发代价的高低也可以作为衡量转发效率的一项重要指标。

#### (6) 实验结果的可靠性

数据转发模型或算法是否正确有效,需要通过大量的实验进行验证。在复杂的物联网环境中,同一个数据转发模型在不同应用场景下的实验结果可能存在一定差别,在同一场景下的实验结果也可能会有所不同。因此,为了提高实验结果与预测数据或真实数据结果的一致性,必须遵循现实情境设计转发模型,尽量采用实地测试,或者在现实条件达不到的情况下尽可能地采用真实、有效的多个数据集进行多次测试。显而易见,在物联网转发模型研究中,真实、可靠的实验结果是其追求的一项核心目标。

#### 1.4 新兴技术及其对物联网数据转发的影响

物联网的形成和发展,使得分布在各处的大量数据需要协调和处理.物联网的数据处理需要云计算的大力支持,离开云计算,所有的信息或数据就类似于大海中的一个一个孤岛,物联网就此失去意义,成为“物离网”.

移动云计算是一项丰富的移动计算技术,随着各种移动智能终端的广泛普及,作为云计算的一个重要分支,它目前已成为物联网应用的主要计算模式之一.移动云计算主要利用各种云中统一的弹性资源和网络技术,在任何地方、任何时候基于随时支付原则,无关于异构环境和平台,通过以太网或互联网服务于众多的移动设备,以达到功能、存储和移动等方面的随意扩充<sup>[22]</sup>.移动云计算能为物联网应用带来一系列的好处<sup>[23]</sup>:第一,可卸载移动设备上的任务到云端,延长电池寿命;第二,能够使移动设备运行复杂的应用程序,还能提供更高的数据存储能力;第三,提高可靠性,因为移动设备的数据能够在以存储为目的的一系列可靠的固定设备上存储及从其返回.显而易见:在物联网环境下的数据转发应用中,移动云计算模式能够提供更多的机会使移动设备参与其中;而且移动云计算核心通信技术的发展或计算模式的完善也能促使物联网数据转发性能得到进一步提升,从而提高数据转发的成功率.

5G 作为移动云计算的一项核心技术,其主要目标是让终端用户不脱离网络覆盖,始终与网络保持连接状态.它具有密集型小区部署、微波连接、大规模多输入多输出、多个小区协作以及认知无线电等<sup>[23,24]</sup>重要的特征.随着 5G 的到来,移动云计算服务预计将达到一个快速发展的时期,并将成为移动服务中一个全新的研究热点<sup>[25]</sup>.在物联网应用中,5G 系统未来支持的设备不止是移动手机,它还要支持其他智能设备,比如手表、健身腕带、家用电器(如远程可控式空调及热水器)等.5G 未来侧重于实现与其他移动无线通信技术的无缝连接,并将提供随处可用的基础性业务,以适应快速发展的物联网服务及其他社会需求<sup>[26]</sup>.显然,未来高性能 5G 技术的普及能够尽量避免移动智能设备经常丧失连接的情况发生,为物联网环境下借助移动设备而进行的数据转发任务提供高效、可靠的通信技术保障.

为了适应移动无线网络的业务需求,5G 在无线传输技术和无线网络技术方面都有新的突破<sup>[27]</sup>.软件定义网络(software defined network,简称 SDN)技术在 2014 年已成为被电信和 IT 领域普遍接受的网络架构概念,它是将网络虚拟化的一种技术,实现了数据转发与控制的分离,将作为 5G 的一种更加智能和灵活的组网技术或网络架构而存在.在 SDN 中,受控的转发设备组成了转发平面,运行在控制面板上的控制应用决定了业务逻辑及转发方式,网络流量的灵活控制就是由这种逻辑上的集中控制实现的,为物联网的核心网络及应用创新提供了良好的平台.目前,SDN 涉及的范围在逐渐扩大,涵盖核心网、回程网、传输网及边缘网等领域,这些都体现了 SDN 具有极好的适应性.SDN 终结了传统网络,其架构打破了传统路由协议的局限,可以更加方便地将各种新的路由协议或路由策略引入网络.作为一种新型网络架构,它势必会处于未来网络架构的核心位置,为物联网应用(比如数据转发)提供了极大的便利.

移动边缘计算(mobile edge computing,简称 MEC)是基于 5G 演进的架构,它将云计算和云存储拉近到网络边缘后,可以创造出一个具备高性能、低延迟与高带宽的电信级服务环境,加速网络中各项内容、服务及应用的分发和下载,让消费者享有更高质量的网络体验.MEC 设备所应具备的一些特性包括网络功能虚拟化、SDN、边缘计算存储、绿色节能等.MEC 把无线网络和互联网两种技术有效地融合在一起,并在无线网络方面增加计算、存储、处理等功能,构建了开放式平台以植入应用,并通过无线 API 开放无线网络与业务服务器之间的信息交互,对无线网络与业务进行融合,将传统的无线基站升级为智能化基站.面向物联网、视频、医疗、零售等业务层面,MEC 可向行业提供定制化、差异化服务,进而提升网络利用效率和增值价值.同时,MEC 的部署策略可以实现低延迟、高带宽的优势,MEC 也可以实时地获取无线网络信息和更精准的位置信息来提供更加精准的服务.MEC 的以上优势,明显地能为物联网环境下的数据转发研究带来极大的好处.

另外,作为一种基于信息和内容的全新网络体系结构,相较于传统的以主机为中心的互联网络体系结构,命名数据网络(named data networking,简称 NDN)能够更好地满足人们对数据内容本身的强烈需求,并支持和适应其动态拓扑变化.数据转发是路由机制的一个关键操作步骤,NDN 在路由过程中屏蔽有关主机地址的任何信息,不管数据包的来源和获取方式,只关注用户需求数据,并采用命名数据名称代替 IP 数据包,在整个路由算法

中使用名称解析机制.同时,为了提高请求的反馈速率,NDN 将缓存机制应用到路由中,希望通过利用广泛分布的缓存备份采用“空间换时间”的方式实现这一目的.总之,以全新的路由寻址方式和数据包封装结构为基础,NDN 从本质上改变了网络的路由策略,促使了物联网数据转发性能的提升.

综上所述,这些新兴技术分别在服务计算模式、通信技术、网络体系架构等方面对物联网环境下的数据转发产生重要的影响.

## 2 数据转发模型关键技术及构建标准

### 2.1 关键技术

节点的易丧失性或智能终端的移动性决定了数据转发是一个随时间和/或空间变化而变化的量.节点  $A$  可以将数据转发给节点  $B$  并不意味着下一次依然可以转发给  $B$ ,节点位置的随时变换或其他一些行为,极有可能导致未来节点  $A$  和/或  $B$  不会出现在这样的路由中.数据转发模型要能够反映出这种动态进化性,也要具有随上下文、时间和空间变化而重新评估的功能.数据转发的动态模型构建一般需要考虑以下几个技术问题.

#### (1) 数据转发网络空间模型

首先要确定数据转发应用的网络空间模型,这个模型依据应用场景一般采用凸空间、有向图或无向图、树形结构、平面空间等形式.比如,水下传感网<sup>[9]</sup>的网络空间模型易采用凸空间结构: $D \in R^3, |D| = L \times W \times H, L, W, H$  分别代表立体空间的 3 个坐标轴.它采用概率方式生成节点间的连接,使用幂律分布动态生成节点的度,从而构建一个随时间变化的网络动态拓扑结构.车载网络<sup>[11]</sup>、社交网络<sup>[28]</sup>等大多采用有向或无向图的形式: $G = (V, E), V$  是图  $G$  的节点集合, $E$  是图  $G$  边的集合,即,代表节点间存在一定的关系.瞬时子网节点间关系的建立可以使用高斯函数,它可以是一个时间函数.在占空比无线传感网<sup>[8]</sup>数据转发研究中,通常采用  $L \times W(m^2)$  的区域作为节点的网络空间模型,其中, $L$  和  $W$  代表区域的长和宽.由此可见,数据转发研究的基础是针对不同的场景建立一个正确而适当的网络空间模型.

#### (2) 数据转发度量因子的选择与计算

物联网包含各种智能终端或节点,并通过四大网络技术接入互联网:短距离有线通信(包括 10 多种现场总线)、短距离无线通信(包括 10 多种频段及标准)、长距离有线通信(互联网、电信和广电以及三网融合)以及长距离无线通信(包括基于蜂窝技术的伪长距离),属于复杂网络应用,其应用研究场景具有多样性,比如传统无线传感器网络、社交网络、车载网络、路网、无线体域网等.因此,针对不同的应用场景,度量数据转发的因子也有所区别.如社交网络中,会注重考虑设备拥有者的瞬时或累积社会关系分析;车载网络会侧重于某些车辆可预测的移动路线分析、车辆间的交互关系及乘客的作用;无线体域网主要用于智能医疗系统,侧重考虑携带者行为对转发的影响分析,如坐、立、行、走、阴影等引起节点拓扑结构或信号强度的变化,从而引起转发节点随时间和空间变化的动态性选择.但即使是在同样的应用场景下,度量因子的计算方式也不尽相同,比如移动社交网络中节点社会相似性的计算,不同于其他成果,文献[10]依据节点本地活跃度构建相似性度量.因此,数据转发度量因子要紧密结合实际场景进行选择,其计算方式要科学、严谨.

#### (3) 数据转发总体度量值的获取

显然,无论是哪一种应用场景下的物联网数据转发,其考虑的转发因素一般都不止一个,这些因素应该如何集成才能取得各方面的均衡,是一个至关重要的问题.可以将整个传输路线的预测能耗最小、传播延时最短、投递率最高、转发代价最小等中的一个或多个作为衡量转发的目标函数,对其中各项指标可以采用线性和或加权线性和、信息熵、指标参数递进迭代方式、泊松分布测量排序方法、社区划分基础上的节点间余弦距离最小值方法、向量内积计算、哈夫曼特征距离、欧式距离等各种机器学习的方法计算转发总体度量值.

#### (4) 数据转发算法的设计

数据转发流程与各种实际应用场景基本无关,仅依赖于网络空间模型、节点转发衡量因子和转发度量值,以目标节点和中间节点的关系以及参数度量为基准,一般情况下,采用分情况条件判断方式.通常先计算中间节点是否为目标节点:若是,一跳转发;否则,再使用各种智能方法计算各个度量因素或总体度量值,分步骤比大小

采用多跳形式进行,整个过程采用迭代方式直至完成后续转发操作.在整个算法设计过程中,在追求系统性能提高的同时,还要注意兼顾时间及空间复杂度的问题.

#### (5) 数据转发模型的评估

根据上下文、时间和空间的动态变化进行转发节点度量值的动态更新,转发完成后可以选择性记录最新度量值,这主要取决于转发衡量因素是否依赖于历史信息.比如,社交网络将节点间联系的次数作为转发因素,则需要保存到节点的缓存中;而在占空比无线传感网中,如果利用低功耗侦听 MAC(media access control)协议中的前导码来衡量是否转发,那么信息无需保存.整个数据转发模型优劣的判断是基于不同的目标函数通过与类似的模型对比,然后进行参数分析,总体度量值基本上不影响下一跳转发节点的选择.

## 2.2 转发模型构建标准

按照不同的划分标准,可将物联网数据转发模型构建研究归结为以下几种类别.

- (1) 按转发判决时是否需要额外信息辅助划分.不需要,则属于盲目转发类型,比如洪泛机制;另一种是感知转发,可以是一跳感知,也可以是提供者感知,即:转发源节点感知,按照辅助信息的来源主要包括基于节点数据、数据属性、数据融合及网络拓扑等;
- (2) 按节点的作用划分.数据转发协议最初是为具有动态拓扑结构的移动无线 Ad-Hoc 网络而提出的,目的是要实现数据包投递率的提升和数据包传输延迟的下降.为了确定最好的转发者,根据他们采用的方法的不同,这些协议被分成两种:一种类型使用传输者方面决定转发决策的本地网络信息,即,基于传送者的数据转发;另一种类型是指在接收者方面通过竞争机制选择一个转发者的过程,即,基于接收者的数据转发;
- (3) 按是否考虑社交环境因素划分.传感器节点或具有传感功能的多数智能终端通常都离不开动物或人类的参与,比如智能手机、动物野外生存研究等,这些人或动物都有一定的社会活动,因此,社交因素也会对物联网数据转发应用有一定的影响,尤其是机会数据转发;
- (4) 按转发副本个数划分.按照转发的数据包数量分为两种:多副本转发模式和单副本转发模式;
- (5) 按节点个数划分.考虑以最小功耗为目标的网络中节点的合作,比如在无线传感网/无线体域网中的应用,可针对单个节点或簇节点展开数据转发研究;
- (6) 按转发路径条数划分.很多研究成果会从整个网络的吞吐量出发,考虑数据的转发、收集和传输,比如无线混合网,它们聚焦在利用网络的多个方面(如拥塞缓解<sup>[29,30]</sup>、速率调整<sup>[31,32]</sup>、调度<sup>[33,34]</sup>、信道分配<sup>[35]</sup>和路由<sup>[32]</sup>)提高无线混合网的吞吐量,这些方面可以单独使用也可联合使用.在源节点和目标节点间存在多跳路径,业务转发模式可以选择单路径也可选择多路径转发.

详情见表 1.

除此之外,也有根据其领域研究发展历程中关于数据转发度量因子的考量进行阶段性划分的,比如物联网中的车载网络应用,详情见表 2.

**Table 1** Researches of data forwarding model in IoT according to the different division standard

**表 1** 根据不同标准划分的物联网数据转发模型研究

划分标准	类别	描述	优缺点	相关成果	
是否需要 额外信息 辅助	盲目转发	最早的转发策略,不考虑任何额外辅助信息,比如网络拓扑、参与节点、传输数据等	思路简单,易于实现,但效率低下且性能不好	[36-39]	
	感知 转发	一跳感知	只考虑当前节点的一跳邻居节点,通过节点间的距离等信息判断	其目标明确,便于实现,但传送成功率没有保障	[15,40-43]
		提供者感知	以当前节点为中心,根据其自身历史信息或上下文信息,如存储的距离表、联系表等,寻找最优转发节点	可降低传输时延和转发代价,提高投递率,但因信息维护等原因使能耗增大	[44-46]

**Table 1** Researches of data forwarding model in IoT according to the different division standard (Continued)**表 1** 根据不同标准划分的物联网数据转发模型研究(续)

划分标准	类别	描述	优缺点	相关成果	
节点作用	基于传送者的数据转发	传送者基于历史网络信息(如地理位置、工作周期、邻居节点的连接概率)或者瞬时探测信息,在数据转发前传送者选择一个节点作为数据包的转发者	系统可靠性高,容易实现,但因目标不明确,可能增加时延和能耗	[47-53]	
	基于接收者的数据转发	接收者利用基于定时器的竞争过程执行转发决策.当节点有要转发的数据包时,它将广播一个消息声明转发需求.每个活跃的邻居节点将根据其自身地理位置等信息决定回退时间以回复这个需求.具有最短回退时间的节点将被选出作为转发节点	依托真实数据,实验结果可靠,投递率高,转发代价小,但因每步复杂的转发判断,会增加时延和额外的能量消耗	[54-65]	
社交环境因素	不考虑	基于周期性的转发	设定固定时间间隔,周期性地 进行信息广播的转发模式	可以提高投递率和数据包接收的成功率,但会增加网络负担和能耗	[8,47,66-70]
		基于机会的转发	以网络中的移动节点为主,利用节点间的机会连接进行数据转发	网络资源利用率高,转发代价低;节点或链接的易丧失性导致数据易丢失	[18,71-78]
	考虑社交环境因素	将各种与之相关的社交因素(如人或动物的移动速度和轨迹、节点个性化、社区结构、社会网络的中心性和相似性等)作为数据转发的度量因子	结果更贴近实际情形,但网络模型构建较为复杂	[10,16,36,79-84]	
转发副本个数	多副本转发	以数据包投递率或数据包传送延迟为目标函数,通过转发数据包的多个副本到其他节点以求最大化系统利用率	可提高数据包被成功接收的几率,缺点:容易引起严重的拥塞现象,阻碍数据包到达目标节点	[47,85-87]	
	单副本转发	可考虑多个度量因子作转发决策,但每次只能转发一个副本到最优邻居节点	系统能耗较少,但数据因易超时而容易丢失	[48,88-91]	
节点个数	单一节点	针对某个特定节点作为潜在中继,着重考虑节点间的无线电频率(radio frequency,简称 RF)	可延长节点寿命,提高网络性能,但数据易丢失	[92-97]	
	节点聚簇	多节点协作方式,可通过不同无线路径提高 RF 通信的传递增益,改善可靠性和能耗	可节省系统资源,避免信道拥塞,但易增加时延	[98-103]	
转发路径数目	单路径转发	可将邻居干扰、弱信道条件、有限带宽和网络拥塞等作为转发度量因素,但源节点到目标节点只有一条路径	可避免网络拥塞,降低系统能耗,但数据包传送成功率较低	[104]	
	多路径转发	源节点能够利用多条替换路径上可用的聚合带宽提高吞吐量和缩短传输延时等	系统利用率和数据包投递率高,但因对路径的判断和维护可使能耗增加	[9,16,29,31-35,105-110]	

**Table 2** Researches of data forwarding in vehicle sensor network**表 2** 车载网络数据转发模型研究

阶段	描述	优缺点	相关成果
基于地理位置的方法	以 GPS 信息为度量因素,常以源节点与目标间的欧式 GPS 距离最短为目标函数	测试数据客观、真实可靠,但这种方法易引起“死胡同道路”问题,因为欧式通信路径不总是与最短物理路径相匹配	[48,111]
基于轨迹的方法	以 GPS 信息和其他道路信息(如道路交叉点位置 <sup>[112-114]</sup> 、路长 <sup>[115,116]</sup> 、目标节点方向 <sup>[91]</sup> 、交通密度、数字地图 <sup>[117]</sup> 等)为度量因素	车辆移动模型符合真实环境下的车辆移动规律.但是大多数移动模型都是针对固定路线的车辆建模,对模型特性分析较少	[16,118,119]



Table 2 Researches of data forwarding in verhicle sensor network (Continued)

表 2 车载网络数据转发模型研究(续)

阶段	描述	优缺点	相关成果
基于 contact 的方法	每个节点要维持相遇历史信息,基于相遇概率制定路由决策.可用马尔可夫链,根据相遇历史信息预测未来相遇概率,也可从车辆的宏观移动或微观移动方式预测该车辆将要行走的未来区域	完全依赖车辆区域移动历史,可避免跟踪相遇历史过度存储;缺点就是需要耗费一定的能量或代价维持车辆移动历史记录	[71,120-122]
基于 social 的方法	考虑社区结构、节点中心性等作为度量因素.可采用联系级别的移动性结合社会级别移动性(通过计算社会自我中心性获得)制定转发决策 <sup>[123]</sup>	该方法依据特别人性化的车载网络场景,可信度相对较高;但度量因素随环境变化太快,实验的可靠程度相对较低	[13,81,123-125]

### 3 典型模型及其评述

物联网具有复杂的网络应用环境,如环境监测、智能城市、交通运输及健康医疗等.从最初的传统无线传感网到如今参与设备种类多样化的万联网,物联网数据转发技术或模型也在随之逐步进化.目前,物联网中关于数据转发的研究主要涉及两个领域.

- 一个是对数据转发支撑技术的研究,比如基于信道、干扰、无线电频率或 MAC 等通信技术或协议的数据转发模型的构建,这一领域的研究虽然与具体应用关联不大,但在传统无线传感网数据转发中占有主导地位,并且对在智能物联网中更加有效地利用数据转发技术具有指导和实践意义.尤其是随着 5G 等新兴技术的出现及飞速发展,物联网数据转发研究已经随之产生了质的飞跃,非常值得关注;
- 另一个领域是对数据转发算法本身的研究,这一领域与具体应用密切相关,例如在移动物联网(社交网络或车载网络等)数据转发研究中,算法会更多地关注特定物联网环境下节点位置的动态变化、节点间的交互时长或联系次数等一些随时间变化的社交因素.尤其是随着大量智能移动设备的加入或参与,这一领域的的数据转发研究更加符合实际物联网应用环境的需求,是当前与未来物联网数据转发的另一个研究重点.

迄今为止,许多学者致力于各种物联网应用环境下的数据转发研究,并使用不同的工具和数学方法建立了数据转发的模型,这在表 1 和表 2 中均有体现.本节受文献[126]的启发,将根据其采用网络情形和数学方法的不同,选取一些新的、具有代表性的、常见物联网环境下的转发模型进行分析和评述.

#### 3.1 无线传感器网络(wireless sensor network,简称WSN)数据转发

LWOF(light-weight opportunistic forwarding)<sup>[8]</sup>是一种适用于低占空比 WSN 环境下的数据转发模型.对于转发节点的选择,LWOF 并不依赖于历史网络信息和节点间的竞争,而是首先考虑限制转发候选节点到一个最优化区域,然后利用低功耗侦听(low-power-listening,简称 LPL)MAC 协议中的前导码和双信道协作通信从当前节点的下行节点集合(朝向目标节点)中挑选最优转发节点.其中,每个节点装备有两个无线电接口,支持双信道通信:一个是用于传输语音消息的低速率信道,即信号信道;另一个是用于传输感知数据的较高速率信道,即数据信道.这两个信道的通信范围是相同的.在每个周期中,整个转发判断由信号信道开始,在其空闲的前提下才考虑是否进行数据信道转发判断.在对数据信道监听的过程中,一旦发现多于 1 个的前导码出现,那么根据前导码长度计算公式求得具有最短前导码的节点作为最优转发节点.

在占空比无线传感网中,处于睡眠阶段的节点是不参与数据转发筛选的,而节点苏醒的序列可以看作一个泊松分布,所以,在周期  $t$  内至少一个节点苏醒的概率  $P_t(i>1)$  为

$$P_t(i > 1) = 1 - P_t(i = 0) - P_t(i = 1) = 1 - e^{-\frac{N_f t}{T_s}} - \frac{N_f}{T_s} \times t \times e^{-\frac{N_f t}{T_s}} = 1 - \left( 1 + \frac{N_f}{T_s} \times t \right) \times e^{-\frac{N_f t}{T_s}},$$

其中,  $T_s$  是时间单位.如果规定当前节点的优化转发面积为其与目标节点连线两侧各  $30^\circ$  的扇形,那么此扇形内的节点个数  $N_f = \pi r^2 D / 6$ .其中,  $D$  是节点密度,  $r$  是在数据信道中节点的通信范围.显然,在低占空比无线传感网中,

$P_{i \rightarrow 0}(i > 1) \rightarrow 0$ . 同理,在一个周期或前导码  $T_p$  中至少唤醒一个节点的转发概率  $P_f$  为

$$P_f = P_{i=T_p}(i > 1) = 1 - P_{i=T_p}(i = 0) = 1 - e^{-\frac{N_f}{T_s} T_p}.$$

通过对前导码长度与每跳包的投递率、节点密度、睡眠周期之间的关系进行系统分析,最短前导码  $T_p$  为

$$T_p = \min\left(-\ln(1 - P_f) \frac{6T_s}{\pi r^2 D}, T_s\right).$$

LWOF 是一种不用考虑也不必保存节点历史状态信息的数据转发模型.对比 LWOF 策略下的 LWOF-LPL (low-power-listening MAC 协议)与 LWOF-LWMAC(用缩短了的前导码优化后的 LPL MAC 协议)两个协议和 ROF 协议<sup>[58]</sup>,在单传感数据流环境下,它们的平均投递率基本持平,LWOF-LWMAC 最低;LWOF-LPL 的平均时延最长,LWOF-LWMAC 稍微逊色于 ROF,两者基本保持一致;LWOF-LWMAC 的单数据包能耗最低,大约是 ROF 平均能耗的四分之一,LWOF-LPL 次之.在多传感数据流环境下,ROF 平均投递率最高,LWOF-LWMAC 稍优于 LWOF-LPL,但三者也基本持平;LWOF-LPL 的平均时延最长,ROF 和 LWOF-LWMAC 分别大约是它的五分之四和五分之三;ROF 的单数据包能耗依然最高,LWOF-LWMAC 最低,且稍低于 ROF 平均能耗的四分之一.由此可见: LWOF-LWMAC 在取得最低能耗的同时,在投递率和时延方面也付出了一定的代价.LWOF 的主要优点是:(1) LWOF 模型选择节点具有信号和数据双信道协作通信的优势尤其明显,信号信道初步判断信道是否被占用,数据信道专用于符合条件的数据传输,这在极大程度上避免了转发冲突的发生;(2) 选择转发节点之前,优先限制转发区域为源节点-目标节点连线两侧各  $30^\circ$  的扇形区域,极大地缩小了搜寻转发节点的范围,提高了数据转发的速度和成功率;(3) 每个周期内,LWOF 算法只有简单的基本信道信息判断和从数据信道中获取具有最短前导码的转发节点,该算法的空间和时间复杂度均为  $O(1)$ ,因此,对于计算和存储资源有限的传感器节点来说,LWOF 模型确实是轻量级的且是可行的.但 LWOF 还存在以下不足:忽略了节点周边的建筑物或其他物体的存在或分布的不均匀性以及信号强度造成的衰减,因为 LWOF 认定一个节点的通信能力在所有方向上是一样的,这极有可能引起测试结果与实际情况存在较大差别.

类似于 LWOF,在综合考虑网络编码机制和数据包传输数量及动态传输功率的基础上,Tian 等人<sup>[127]</sup>提出了一个适用于工业无线传感网的可靠的、高效的数据转发模型 NCPCR(network coding and power control based routing).除了最优传输功率外,在成功解码一个被编码数据包的概率被提取之后,NCPCR 模型首先获得网络编码增益,然后以能耗最小化为目标,利用这个网络编码增益去智能决策是否应用网络编码判断数据转发.该转发算法在线性网络编码和伽罗华域的基础上进行建模,其时间复杂度为  $O(n^2)$ , $n$  是网络中的节点数量.通过与 COPE<sup>[128]</sup>和 DCAR<sup>[129]</sup>两个路由协议对比:当节点个数和数据流的数目不变、传输功率发生变化时,NCPCR 的每数据包平均能耗分别比 COPE 和 DCAR 减少 68.7%和 30.3%;当传输功率和数据流数目不变时,随着节点个数的递增,这 3 个路由协议的平均能耗呈递减趋势,此时,NCPCR 比 COPE 和 DCAR 分别减少 67.6%和 29.9%;而当节点个数和传输功率不变、数据流数目发生变化时,NCPCR 又比它们分别减少 67.4%和 29.2%.显然,NCPCR 是高效的数据转发模型,它的最大优点就是能够支持网络中更多的数据流,以使节点有更多的网络编码机会,最终能够通过减少数据包传送数量和让节点自己选择最优传输功率的方式来降低能耗.

### 3.2 移动社交网络(mobile social network,简称MSN)数据转发

在 MSN 中,作为选择中继节点的度量因素,社会相似性的定义决定了机会转发模式的性能.如果两个节点拥有越多的共同兴趣,则它们的社会相似性就越高,联系的概率就越大,就越有可能被选为中继节点.但存在一些研究成果忽视了一个事实的情况:在同一个社区,具有相同兴趣的节点会有不同的本地活跃度.这将可能导致低效的数据转发.因此,Zhong 等人<sup>[10]</sup>提出了 LASS(local-activity and social-similarity based data forwarding)数据转发模型,它首先将 MSN 看作一个随时间变化的动态加权图,在每个时刻  $t$ ,这个图都有  $k$  个称为网络社区的结构组成,且不同社区间存在共同的交集.节点本地活跃度反映了该节点在每个社区内活跃度的不同级别,即节点在某个社区中相遇概率的统计.那么, $t$  时刻节点  $u$  在社区  $i$  上的本地活跃度即为

$$a_{u,i}^t = \begin{cases} \frac{\sum_{(u,v) \in C_i^t} w_{uv}^t}{\sum_{(v',v'') \in C_i^t} w_{v'v''}^t}, & i \in Com_t(u) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中,  $w_{uv}^t$  代表  $t$  时刻前节点  $u$  和  $v$  间的总联系次数与所有节点间联系次数的比值,  $C_i^t$  代表  $t$  时刻的第  $i$  个社区,  $Com_t(u)$  是指  $t$  时刻所有包含节点  $u$  的社区标签的集合. 然后, 根据社区检测结果, 节点  $u$  在  $t$  时刻的全局活跃度表示为  $A_t(u) = (a_{u,1}^t, a_{u,2}^t, \dots, a_{u,i}^t, \dots, a_{u,k}^t)$ . 而  $t$  时刻节点  $u$  和  $w$  的社会相似性则使用它们各自全局活跃度的内积度量, 即:  $SS_t(u, w) = A_t(u) \cdot A_t(w)$ .

相较于 Epidemic<sup>[130]</sup>、PROPHET<sup>[71]</sup>、Simbet<sup>[131]</sup>、BUBBLE RAP<sup>[81]</sup>和 Nguyen's routing<sup>[124]</sup>, LASS 的平均投递率大约分别是它们的 1.37 倍、1.82 倍、1.98 倍、1.43 倍和 1.35 倍; 而平均时延大约分别是它们的 1.36 倍、1.22 倍、1.25 倍、1.31 倍和 1.07 倍; 在平均代价比方面, LASS 与 Nguyen's routing 一样, 大约分别是 Epidemic、PROPHET、Simbet 和 BUBBLE RAP 的一万四千分之一、七千八分之一、六千六分之一和四千分之一. 显然, LASS 在时延方面表现稍差一些, 但在投递率和代价比方面都有很大的优势, 尤其是突出了 LASS 模式的节能效果. 总之, LASS 整体性能表现良好, 值得推广. 与目标节点具有较高社会相似性的节点将作为转发节点, LASS 转发模型引入节点本地活跃度来提高节点间的社会相似性度量性能, 其主要优点是: (1) LASS 使用时间序列的动态加权图作为网络拓扑模型, 可以更直观地表达出节点间联系的重要程度; (2) LASS 使用传播临界值和 WDE(weighted density embryo) 辅助发现社区, 这两种方法有利于避免低权重的边形成无意义的社区; (3) 应用内积方法求解社会相似性, 有助于区分不同的社会特征, 保证节点间共同兴趣的数量和节点的高本地活跃度; (4) 内积方法还可以处理向量中均匀和不均匀的本地活跃度分布, 能够减少衡量数据转发的度量因子数目, 使其仅仅依赖节点间共同兴趣的数量. 尽管 LASS 有很多的优势, 但依然存在有待完善之处: 某时刻节点本地活跃度仅依靠该时刻前节点  $u$  和  $v$  间的总联系次数与所有节点的联系次数的比值的度量方式, 存在不能完全正确反映实际场景应用的情况, 应从客观的角度全面地对本地活跃度进行测量, 比如考虑节点在某社区中的倾向性、复杂性、唯一性、积极性和稳定性等.

针对人群密集网络, 以覆盖社区结构和节点自身相对重要性为度量因素, Yuan 等人<sup>[28]</sup>提出了一个 RIM (relative importance) 数据转发模型. 该模型使用衰退聚合图模拟网络拓扑的时间动态变化, 利用衰退和问题计算节点间的联系强度. 节点的相对重要性包括相对某个社区的重要性和相对整个社区的重要性, 它主要利用衰退聚合图的协方差矩阵求解, 并利用主成分分析法和 K-means 算法检测覆盖社区结构. 在 RIM 中需注意两点: 第一, 对于不同社区, 同一个节点会有不同的社交作用, 因此, 与目标节点社区有更高相对重要性的节点更容易被选为中继, 即, RIM 的一个决定因素是当前节点到目标节点所在社区的相对重要性度量值; 其次, 同一个节点在同一个社区也会有不同的社会行为, 比如, 一些节点在它们的社交生活中易于形成小集团, 而另一些节点喜欢加入多个小集团. 节点有 3 种类型: 强类型节点(仅仅属于一个社区)、桥接类型节点(隶属于多个社区)和噪声节点(不属于任何社区), 因此, RIM 也要依赖节点类型作转发决策. 如果为噪声节点, 该节点将不转发消息; 如果是噪声节点, 同时也是强类型节点或桥接类型节点, 则可以执行转发操作; 如果不是噪声节点, 当消息还未传送到目标节点所在社区时, 那么就将其转发到比当前节点有更高相对重要性的节点, 直到传送到目标节点所在的社区, 然后, 该消息只在目标节点所在社区进行转发, 直至目标节点接收或消息过期. 同等条件下, 通过与 PROPHET 和 BUBBLE RAP 相比较, RIM 的平均投递率分别比它们提高了 70% 和 40%, 而代价分别降低了 3 个系数和 2 个系数. 显然, RIM 模型在数据转发算法中存在很大的优势.

### 3.3 车载传感网络(vehicular sensor network, 简称 VSN)数据转发

VSN 近些年已成为促进物联网应用的新的解决方案, 引起了广大学者的关注<sup>[132]</sup>. 它使用 V2V(vehicle-to-vehicle)或 vehicle-to-infrastructure 的无线通信方式传递数据到监测中心, 与传统延迟容忍网络存在很大的区别. (1) 车载网中的节点(车辆)沿一定的路线移动, 而后的节点移动具有随意性; (2) 多数情况下, 车载网使用多播路由, 后者常常使用单播路由; (3) 车载网节点运行轨迹可预测, 后者在此方面存在很大的困难. Choi 等人<sup>[15]</sup>在具

有一定运行规律路线的车辆(比如公交车)轨迹的基础上提出了一个 OVDF(optimal VSN data forwarding)转发模型,它对传统车载网络模型  $G=(I,R)$ ( $I$  是交叉点集合, $R$  是原始路段集合)进行了边的扩展(新边集合为  $L$ ),即  $G'=(I,R')$ (其中, $R'=R\cup L$ ),如图 2 所示。

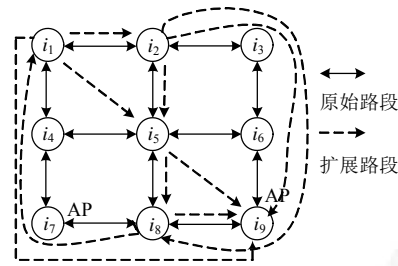


Fig.2 Augmented road network graph

图 2 扩展道路网络图

限定时延,结合预定未来轨迹、多播路由、车辆密度及速度等因素的影响,通过建模马尔可夫决策过程(Markov decision process,简称 MDP)解决图 2 中网络模型的数据转发问题。

在 OVDF 中,设定  $V=\{0,1,\dots,M\}$  是车辆类型的集合,向量  $u_i=[u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^{K_i}]$  代表交叉点  $i$  上的路由决策,  $u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^{K_i} \in R'$  是交叉点  $i$  的所有外出边,且按时延递增的顺序排列。 $u=[u_i, \forall i \in I]$  为一个路由策略,  $P_{ij}^v(u_i)$  是指在  $u_i$  下通过类型为  $v$  的车辆从交叉点  $i$  转发数据包到交叉点  $j$  的概率,  $d_{ij}^v$  为边  $e_{ij}^v$  上的期望数据时延,则从交叉点  $i$  到任意 AP(access point)的数据传递时延  $D_i(u) = \sum_{v \in V} \sum_{j \in I} P_{ij}^v(u_i) \cdot (d_{ij}^v + D_j(u))$ ,从而,交叉点  $i$  上的数据转发决策条件为:  $\min_u D_i(u), \forall i$ 。显然,  $P_{ij}^v(u_i)$  和  $d_{ij}^v$  是求解  $D_i(u)$  的关键。立足于交叉点  $i$ ,根据车载网实际运行场景分情况加以分析,建立了  $P_{ij}^v(u_i)$  与类型为 0 和  $v$  的车辆相遇概率的函数关系;当  $v$  型的车辆选择图 2 中原始路段进行转发数据时,  $d_{ij}^v$  采用文献[91]中的模型进行计算;否则,当选择扩展路段时,  $d_{ij}^v = \sum_{e_{mn} \in B(e_{ij}^v)} (l_{mn} / s_{mn}^v)$ , for  $v > 0$ , 其中,  $B(e_{ij}^v)$  是类型为  $v$  的公交线路上交点  $i$  和  $j$  之间的路段集合;  $l_{mn}$  是指交叉点  $m$  和  $n$  之间的路段长度,  $s_{mn}^v$  代表  $v$  型车辆在该路段的平均速度。

OVDF 是应用于车载网的一个典型模型。在车辆数目、传感数据产生速率及与 AP 间隔不同距离的情况下,对 OVDF 和已存在的路由算法 VADD<sup>[91]</sup>、TBD<sup>[88]</sup>进行多个方面的实验对比,结果显示:同等条件下,OVDF 传递总数据量比它们大约分别至少多出 20%和 15%;对于同一传感范围内的数据投递率,OVDF 分别至少比它们高出 24%和 13%;OVDF 的平均时延分别比它们能少 20%和 23%。由此可见,OVDF 在各个指标方面都具有优越的性能。其主要优点是:(1) 基于一定条件下的实际车流量统计和预定未来轨迹制定机会转发策略,能够适应不同的城市道路结构和交通方式,实用价值高;(2) 该模型除了通过最小化时延保存能量外,在其他方面也尽量实现绿色计算,比如数据包一旦被转发,就从原来的车辆中删除,确保整个网络中每个数据包只有一个备份;(3) 通过对网络模型进行边的扩展,能够使其更好地适应现实车载网应用场景。OVDF 模型存在的明显不足是:实验数据主要使用公交车类型的统计信息,并未包含出租车或私家车之类的数据,而且认为所有车辆都能使用数字道路图和它们的 GPS 信息,且配备有 IEEE 802.11 的设备用于与其他车辆或 AP 通信,这些都可能与实际场景数据存在一定的差别。

另外,ZOOM<sup>[123]</sup>也是一个经典的车载网数据转发模型,它利用集成的方法完美地对车辆接触水平和社会分层两个等级的移动性进行管理,其核心理念即每个车辆本地维持一个与其他相遇车辆最近接触的列表。根据过去的接触信息,一部车辆首先为其他每辆车训练出一个  $K$  阶马尔可夫链,这个马尔可夫链能被用来预测它与其他车的下一次接触。另外,一部车辆也能通过利用基于它的自我接触图的自我中介中心性去评估它在网络中的位置。然后,根据预测的未来接触信息和自我中介中心性的数值,当两车相遇时,携带数据包的那辆车要先计算

它们分别和目标节点间的预测接触延迟,具有最短接触延迟的车辆将作为下一跳数据中继;如果两辆车和目标节点都不存在接触预测,则在网络中有更重要位置的车辆将被选为中继.ZOOM 的最大缺点就是每辆车要付出一定的代价或能量来本地维持一个包含相遇车辆的近期接触列表.与同等条件下的 Markov、SimBet、BUBBLE RAP 和 Epidemic 相比,在投递率方面,24 小时内,ZOOM 能成功传递 60%还多,而 Markov、SimBet 和 BUBBLE RAP 分别才能达到 35%、37%和 24%;Epidemic 的传输时延最短,ZOOM 大约分别比 Markov、SimBet 和 BUBBLE RAP 少 33%、50%和 60%.此外,在每个数据包的网络流量和数据包效用方面,ZOOM 也表现得非常好.总之,在城市车载网环境中,ZOOM 是一个速度快且成本效益高的机会转发模式.

### 3.4 无线体域网(wireless body area network,简称WBAN)数据转发

在生化和健康医疗领域,WBAN 作为一种特殊的无线传感网,已引起学术、工业和政府等领域或部门的广泛关注<sup>[133,134]</sup>.Wu 等人<sup>[18]</sup>提出一种 EDFS(energy-efficient data forwarding strategy)机会转发模型来平衡传感能耗,并提高异构 WBAN 的网络寿命和协同操作性能.EDFS 中的网络模型是一个根节点为汇聚节点的树,选择转发节点总共需要 6 步.第一,汇聚节点  $s$  广播初始信息,为每个身体传感节点分配初始参数值,如剩余能量阈值  $E_\theta$  和采样频率、剩余能量、节点重要程度的影响因子  $\gamma_j, \rho_j, \eta_j$ ;第二,传感节点  $i$  广播转发请求(包括 ID 和位置信息),每个节点使用已知参数计算当前能量  $E_{rej} = E_{oj} - E_{total}^j$ ,  $E_{oj}$  为节点  $j$  的初始能量,  $E_{total}^j$  为之前操作过程中消耗的能量.如果节点  $j$  满足  $E_{rej} \leq E_\theta$ ,则忽略  $i$  的转发请求,否则接受,最终形成转发接受节点集合  $F_i$ ;第三,  $F_i$  中的每个节点根据  $\gamma_j, \rho_j, \eta_j$  计算各自的决策值  $Dec_j = \gamma_j \times \rho_j \times \eta_j$ ;第四,  $F_i$  中每个节点响应各自的 ID、位置信息和  $Dec_j$  传递给  $i$ ;第五,同时使用条件  $d_{ij} < d_{js}$  和  $d_{is} < d_{is}$  对节点间间距进行比较,满足条件的节点形成候选转发节点集合  $F'_i$ ;最后,  $F'_i$  中决策值  $Dec_j$  最高的即为最合适的转发节点.另外,如果  $F'_i$  是空集的话,  $i$  直接与  $s$  通信.

显然,EDFS 模型决策的关键在于  $E_{total}^j$  和  $\gamma_j, \rho_j, \eta_j$  的计算.运行过程中的能耗包括 3 部分:传输  $E_t$ 、接收  $E_r$  和处理  $E_p$ ,  $E_{total}^j$  与传输数据量  $n$ 、传输每比特数据能耗  $E_e$ 、放大电路能耗  $E_{amp}$ 、传输距离  $d$ 、传输功率损失系数  $\alpha$  相关,即  $E_{total}^j = E_t + E_r + E_p = n \times E_e + n \times (E_e + E_{amp} d^\alpha) + E_p = n \times (2E_e + E_{amp} d^\alpha) + E_p$ ; 而  $\gamma_j = (1/f_j) / \sum_{j=1}^N 1/f_j$ ,  $\rho_j = E_{rej}/E_{oj}$ ,  $\eta_j$  要满足  $\sum_{j=1}^N \eta_j = 1$ , 其中,  $f_j$  是节点  $j$  的采样频率,与转发决策成反比.  $\eta_j$  的赋值原则是:值越大,反映了该节点具有较低的重要程度,越有可能作为转发节点,其值可以为 0.

针对是否使用 EDFS 算法,且利用一个人的躺下、站立、静坐、行走这 4 种姿势对各个传感器节点协作完成数据传递的效果分别进行测试,无论哪个传感器在何种人体姿势下,使用 EDFS 后,节点作用过程中的满能量消耗时长几乎是不使用 EDFS 的 1.6 倍;在躺下和站立时,EDFS 的平均跳数相同,保持最高,静坐的平均跳数稍低一些,但它们的平均跳数均大于 2 跳;而行走时的平均跳数最低,少于 2 跳;在这 4 种姿势的平均时延方面,不使用 EDFS 是使用 EDFS 的 2.24 倍.显然,EDFS 非常适合拓扑动态变化的传感网,其应用能为 WBAN 增添巨大的利益.其主要优点是:(1) 选择转发节点前,预先使用压缩感知(compressed sensing,简称 CS)技术对收集到的数据进行处理,可以减少数据传输量,降低能耗,并利用稀疏二元随机测量矩阵和离散余弦变换(discrete cosine transform,简称 DCT)使矩阵乘法转换为矩阵加法,加速算法运行;(2) 密切关注节点自身能耗,利用采样频率、剩余能量和传感节点的重要性作为度量因素,可以平衡传感器能耗,延长网络寿命;(3) 采用网络能源协同式应用,能有效避免重要传感器的能量快速耗尽,比较适合拓扑结构动态变化的应用.其不足之处在于:(1) 反映节点重要程度的参数  $\eta_j$  是主观赋值,会对实验效果造成一定的影响,有待改进;(2) 该模型是建立在汇聚节点知道 WBAN 中传感器的采样频率基础上,这个获取过程可能导致能耗增加.

考虑到人体阴影对 WBAN 中节点和网关间通信能力的不良影响,Argyriou 等人<sup>[43]</sup>提出一个节点具有双通信技术的 WBAN 框架,即 ODF(optimizing data forwarding for WBAN in the presence of body shadowing)模型.它包含两个网络分支:一个由身体上的节点组成,使用电容体耦合通信(body-coupled communication,简称 BCC);另一个是 IEEE 802.15.4 无线电频率(radio frequency,简称 RF)网络,存在一定的工作周期,包括睡眠和工作两种状态,工作时转发数据到网关,而且每个节点都要计算直接 RF 传输的平均时延和能量,并通知给其他节点.这两个分支均是单跳的,使用不同的 MAC 协议,相互协作完成中继节点的选择和数据转发.且候选中继节点  $n$  是否转

发请求节点  $i$  上的数据的判断条件为  $\mathbb{E}[E_{rf}(i)] \geq \mathbb{E}[E_{bcc}] + \mathbb{E}[E_{rf}(n)]^2 / \mathbb{E}[t_{rem}(n)]$  或  $\mathbb{E}[D_{rf}(i)] \geq \mathbb{E}[D_{bcc}] + \mathbb{E}[D_{rf}(n)]$ ,  $\mathbb{E}$  为期望值,  $E_{rf}, D_{rf}$  分别是节点的本地 RF 传输的能耗和时延,  $E_{bcc}$  和  $D_{bcc}$  是随机变量, 分别代表 BCC 网络中传输一个数据包的能量和时延. 无论是在 RF 还是 BCC 中, 基于 MAC 工作周期, 时延计算都与这两个网络在活跃、空闲信道评估、传输、接收等状态下的耗时相关, 基本上是各项的线性之和, 而能耗是在对不同状态下时延分析的基础上, 考虑单位功耗后的各项线性之和.

通过与只使用 RF 通信的 Baseline 系统相比较, 在节点数与中继节点数均为 4 的前提下, 当时延约束为 1s 时, OFD 的数据包丧失率大约是 Baseline 系统的一半, 而当时延约束为 50ms 时, 前者约是后者的十分之一; 而无论时延约束是 1s 还是 50ms, 当节点总数不变时, OFD 归一化后的能量都将随着中继节点数目的增加和系统装载量的增长而呈递减趋势. 当时延约束为 1s、节点总数为 4、中继节点数目由 1 递增到 4 时, OFD 的归一化时延值随着系统装载量的增长而递减. 此时, 不同系统装载量下, Baseline 的平均数据包丧失率大约是 OFD 的 2.4 倍. 同时, 在真实的 RF 追踪测试中, OFD 在数据包延时、能耗和数据包丧失率方面都比使用 RF 中继、Pocket 和 Torso 等方法的转发模型做得要好很多. 因此, OFD 在 WBAN 应用中性能表现良好. OFD 模型仅依靠网络自身信道条件决定转发策略, 与文献[8]相似, 其主要优点是: (1) 具有 BCC 和 RF 两种通信技术的节点, 当遇到 RF 拥塞时, 可通过 BCC 借助其他节点完成请求的监听、判断、转发到网关等工作, 分工明确, 避免信道拥塞, 节省资源, 很大程度上降低了网络能耗; (2) 当 WBAN 中的节点之间不能通过 RF 通信时, RF 传输被降到绝对最小, 这有益于 RF 连接负载最小且对周围的 RF 设备干扰影响也最小; (3) 该模型使用节点本身的实际数据作为转发判断条件, 更贴近现实需求, 实用价值高. 其明显的不足在于: 尽管对转发条件(时延和能耗)的分析相当详细, 但计算过程非常复杂, 整个转发实现算法的时间和空间复杂度也较高, 这些都会导致瞬时转发决策性能的下降, 从而增加时延和网络能耗, 因而有待进一步改善.

### 3.5 无线混合网络(wireless mesh network, 简称 WMN)数据转发

相较于车载网、社交网等, WMN 是一种更贴近物联网概念的应用模式. 由于代价低、易于部署和安装, WMN 已成为无线互联网基础设施发展的热门技术之一<sup>[78]</sup>. 通过改善各种措施, 可以提高整个无线混合网络的吞吐量. 考虑到链接质量、干扰和拥塞的动态变化对 WMN 数据传递吞吐量的影响, Islam 等人<sup>[15]</sup>将 WMN 建模成无向图, 提出一个 O-DTE(optimization framework for dynamic traffic engineering)框架模型, 基于其 NP 难问题, 首先利用贪婪启发式变换方法对 O-DTE 进行优化, 形成 G-DTE(greedy heuristic alternate solution for dynamic traffic engineering). G-DTE 从传输节点的一跳下行节点中选取转发节点, 转发节点应具有更高的数据传输速率和更低的干扰. 然后, 利用 G-DTE 将动态流量工程分割成多个流, 通过以上选取的转发节点组成的多条路径进行数据转发. 在每一跳中, G-DTE 仅仅使用节点的邻居信息, 因此具有很强的扩展性.

G-DTE 模型立足于某个传输源节点, 通过以下方法判断转发分配方案  $s$  是否最优:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize} \left\{ \frac{\sum_{(vw) \in s} \omega_{(vw)}}{\delta_v(s) + \varepsilon} \right\}, \\ & \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} x_{(vw)} \in \{0, 1\}, \quad \forall (vw) \in E \\ 0 \leq \delta_v(s) \leq 1, \quad \forall v \in V \\ p^{\min} \leq p_{(vw)} \leq p^{\max}, \quad \forall (vw) \in E \\ 0 \leq r_{(vw)} \leq r_{(vw)}^p \leq r_{(vw)}^0 \leq r^{\max}, \quad \forall (vw) \in E \\ \sum_{(uv) \in \mathcal{L}_v^u} r_{(uv)} \geq \sum_{(vw) \in s} r_{(vw)}, \quad \forall v \in V \end{array} \right. \end{aligned}$$

其中,  $v$  和  $w$  分别是传输源节点和接收节点,  $(vw)$  代表节点间存在一定关系,  $\omega_{(vw)}$  是指该边权重,  $\mathcal{S}_v$  是节点  $v$  的所有分配方案集合,  $\delta_v(s)$  是分配方案下转发者的节点级别拥塞, 设定  $\varepsilon=0.0001$ , 以免分母为 0,  $\mathcal{L}_v^u$  代表节点  $v$  的上行连接的集合,  $x_{(vw)}$  是该连接在任意给定时刻的激活状态,  $p_{(vw)}$  和  $r$  是为该连接分配的传输功率和数据速率, 它们均是事先给定的离散实数集合.

显然, 在上式取最大值的分配方案中, 所有参与节点即为转发节点. 与 O-DTE、MRA<sup>[105]</sup>、MRT<sup>[33]</sup>和 CLC<sub>-</sub>

DGS<sup>[34]</sup>比较,在网络吞吐量、端到端的平均时延和数据包的投递率这 3 个方面,G-DTE 表现得都较为平稳:在前半部分,O-DTE 比 G-DTE 表现得要好.但到中间时,两者形成交叉点.随后,G-DTE 性能在这 3 个方面都优于 O-DTE.而且无论是哪个方面的比较,G-DTE 和 O-DTE 都比另外 3 个优越许多.G-DTE 框架模型的主要优点是:(1) 使用 DTE 动态确定当前节点的流量分配向量,并为其每个元素分配适当的功率和速率,同时考虑连接质量、邻居拥塞、节点拥塞和路径拥塞,可以保证流保护约束,更具客观性;(2) 利用多元化路径容量将流量分割到设定的多个转发连接,可以满足流的需求,提供了实现大数据传输的机会,比如传输视频等;(3) 为了避免拥塞,每个 DTE 节点本地监测它的积压流量强度和转发能力,目的是为了以一种公平的方式调节上行流速率,可以达到从宏观上控制流的传输的目的,保证网络吞吐量最大化;(4) 这是一种综合优化整个网络多个元素的框架,如最大化聚合转发速率、最小化邻居干扰和各等级阻塞等,可扩展性强,实用价值高,极其符合物联网应用的需求.但是,G-DTE 模型也存在明显的不足:(1) 使用静态方式对混合网中转发节点间通信连接上的信道进行分配,会导致实验数据与实际应用存在一定的误差,违背客观现实;(2) 它没有考虑某个节点不存在合适的转发方案时的处理情况,这可能会使数据传输失败,网络服务得不到保障.

针对多传输/接收 WMN 环境,Wang 等人<sup>[110]</sup>结合链路调度和数据转发提出了一个最小化数据转发调度模型 MDIFS(minimizing data forwarding schedule),其环境模型是将以网关节点为树根而形成的森林模型.该路由由森林的构造采用启发式算法,它不断地将一个节点及其子孙从具有最高装载量的网关树迁移到装载量相对较低的网关树上,该算法具有较低的复杂度,最终能形成一个接近最优化的均衡森林.MDIFS 在计算过程中将干扰消除和空间复用等多输入多输出通信技术作为判断转发的依据,路由者能在它的链路上同时传输或接收不同的数据包,也能同时将多个数据包传递给一个邻居节点.与文献[110]提出的另一个构造森林的整数线性规划算法对比,当网关数目和节点度数均为 4、网络节点数目从 10 增到 70 时,在业务量最重的网关上,MDIFS 较之多出至少 8.6%的装载量;当每个节点有 6 个邻居时,MDIFS 较之多出至少 9.1%的装载量,前者的计算时长为 58.8s,而 MDIFS 为 0.36s;当网关个数为 5 时,MDIFS 较之多出至少 6.7%的装载量,此时,前者的计算时长为 14.6s,而 MDIFS 为 0.48s.由此不难看出,MDIFS 在很多方面都展现出了良好的性能.

### 3.6 命名数据网络(named data networking,简称NDN)数据转发

以主机为中心的传统互联网络体系结构已难以满足人们对数据内容本身的强烈需求,NDN 顺应这种时代需求而出现,它是一种基于信息和内容的全新网络体系结构,将作为互联网下一步研究的基础.

在最初的车载命名数据网(vehicle NDN,简称VNDN)中,消费者 pull 机制时延长且不支持 push 关键数据进入网络,因此,Majeed 等人<sup>[135]</sup>提出一种积极的数据转发模式 EPBC(enabling push-based critical data forwarding),以便 push 关键内容到一跳邻居节点.Push-Based VNDN 将数据内容分为关键和非关键两部分,允许有需求(比如求救)的节点主动传播信标消息(如内容名字和大小)给它的一跳邻居节点.其内容转发流程如图 3 所示.

由图 3 可知,Push-Based VNDN 数据转发判断的流程非常简单,且遵循 NDN 工作机制,其主要优点是:(1) 有需求的节点采用积极主动的方式向网络发送请求信标,触发图 3 中的数据转发流程,显然,该转发算法的复杂度与 PIT(pending interest table)的大小紧密相关,这种通过键值(请求)寻找内容的方式能够提高算法运算速度,节省能源,非常适合像车载网这种高速移动下对瞬时决策要求也较高的应用;(2) 相较于传统的 Pull-Based VNDN,Push-Based VNDN 的总块传输时延只有它的一半或三分之一,且 Push-Based VNDN 模型中生产者(信息服务节点)发送信标后立即推送数据内容,通过消除等待一个请求到达的时间大大降低了传输代价,限于文章篇幅,该证明过程可参见原文;(3) 这是第一个尝试使用 NDN 分类处理内容并允许推送内容到需要的地方的模型,为研究者们进一步对 NDN 或其他应用中的数据转发研究提供了坚实的理论基础和应用依据.该模型的唯一不足之处在于:只在时延上进行了对比验证,优化目标单一,不能突显其优良性能.

由于物联网中存在大量资源受限的弱网络设备,当前的 NDN 采用的数据转发模式产生了大量的通信代价和无效的缓存命中率,已经不适合物联网的需求.针对这个问题,文献[136]提出了一个缓存感知的命名数据转发模式.

- 首先是对 PIT 中兴趣的处理.考虑到无线传感网数据时效性和有效性的敏感程度,不同于以往的 NDN 数据转发,当一条新的兴趣到来时,文献[136]不删除 PIT 中同名的兴趣,而是设置不同的标志进行区别,每个兴趣在进入 CS(content store)处理管道前要先计算出其节点上传感数据兴趣的泊松分布输入值.一旦在内容存储中发现需要的兴趣数据,那么兴趣输入值和输出值就被载入即将返回的数据包.然而,没有被命中的兴趣将会创建一个新的 PIT 入口,并被转发到上游接口.在发出或删除原来的兴趣输出值后,其值再一次根据兴趣被重新计算;
- 其次是关于数据的处理.该模式构建了一个随机缓存时间模型,它能表征个体数据包的缓存过程并评估该数据包在下一跳节点上的缓存时间.当一个新的数据到来时,兴趣的输入值和输出值从数据头中被取出,根据缓存时间模型计算这个数据的缓存时间.如果这个节点已经存储了下一个上游的缓存时间,那么这个新的时间将被删除.在通过已存在的 PIT 入口传送数据包后,它会更新兴趣的输入值和输出值,而且该数据内容的 PIT 入口立刻被删除,CS 也被更新;
- 最后是关于数据转发判断.当一个兴趣在 PIT 或 CS 中没有匹配项时,第 1 个要寻找的部分就是 FIB(forwarding information base)的名称前缀,下一个要寻找的部分是 FIB 的名称后缀,如果一个名字的后缀存在,这个兴趣选择一个接口转发它自己,即通过平等概率随机选择一个上游节点发送.整个过程貌似后缀信息不存在一样,使用多播路由选择所需数据.

本文提出的缓存感知转发与 NDN 多播转发及概率转发相比较,在单节点转发兴趣的数量方面,前者分别大约是后两个的 2 倍和 2.4 倍;在平均有效命中率方面,缓存感知转发为 95.65%,稍微低于 NDN 概率转发(96.98%),但远远高于 NDN 多播转发(28.75%);在平均时延方面,缓存感知转发为 62.93ms,NDN 概率转发为 67.43ms,而 NDN 多播转发为 61.68ms.显然,缓存感知转发模式在各个方面的性能表现都很突出,值得关注.

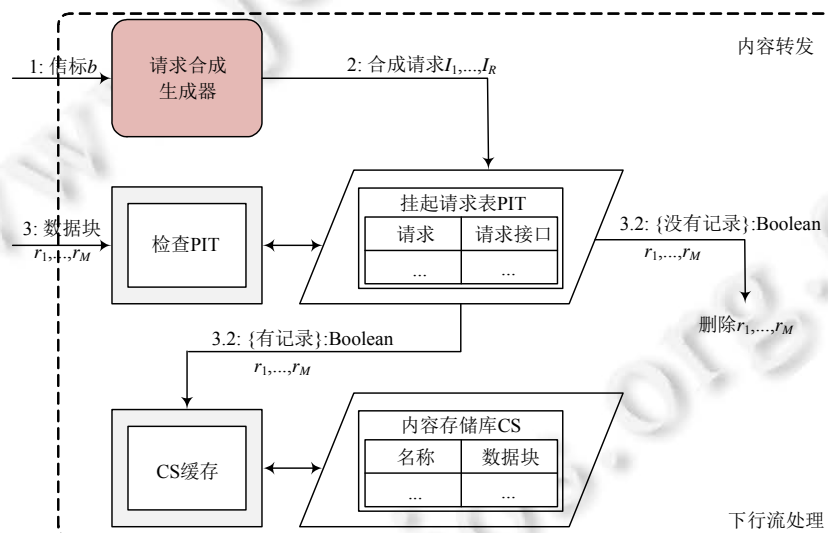


Fig.3 Content store (CS) data flow graph

图3 内容存储库数据流图

### 3.7 多跳蜂窝网络(multi-hop cellular network,简称MCN)数据转发

随着移动通信系统及技术的发展,未来的 5G 无线网络服务模式的改变使 D2D 或 M2M(machine-to-machine)等通信得到广泛应用,这也将为物联网应用带来新的机遇和挑战.针对 MCN,Coll-Perales 等人<sup>[77]</sup>结合 D2D 通信技术以两跳转发为研究背景提出了一种高效、节能的基于上下文的机会 MCN 转发策略(energy-efficient opportunistic forwarding,简称 EEOF),如图 4 所示.



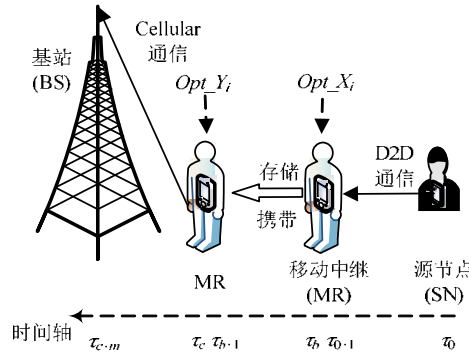


Fig.4 2-Hop opportunistic forwarding

图 4 两跳机会转发

两跳机会转发的最优化条件是

$$\min \left( \sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_{b-1}} (E_{D2D}(d_{SN-MR}, \tau) + \tau \cdot (P_R + P_W)) + \sum_{\tau=\tau_b}^{\tau_{c-1}} \tau \cdot P_{IDLE} + \sum_{\tau=\tau_c}^{\tau_{c+m}} (E_{cell}(d_{SN-BS}, \tau) + \tau \cdot P_W) \right),$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_{b-1}} TR_{D2D}(d_{SN-MR}) \cdot \tau \geq F \\ \sum_{\tau=\tau_c}^{\tau_{c+m}} TR_{cell}(d_{MR-BS}) \cdot \tau \geq F \\ 0 \leq \tau_0 < \tau_{b-1} < \tau_b < \tau_{c-1} < \tau_c < \tau_{c+m} \leq T \end{cases}$$

$T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_f\}$  是离散化形式的时间约束,  $F$  代表传输数据大小,  $TR_{D2D}$  和  $TR_{cell}$  分别表示 D2D 和 Cellular 通信的速率,  $E_{D2D}$  是 D2D 通信单位时间功耗,  $P_R$  和  $P_W$  分别表示 D2D 传输过程中 SN 传输信息时、MR 接收信息时的单位时间存储功耗,  $P_{IDLE}$  代表 MR 向 BS 移动过程中存储和携带信息时的单位时间功耗. 显然, 能耗最小即寻找最优位置的 MR ( $Opt\_X_i$ ) 及 MR 在哪个位置 ( $Opt\_Y_i$ ) 转发, 用  $\theta$  表示最小化处理过程, 则有:

$$[\tau_0, \tau_{b-1}, \tau_b, \tau_{c-1}, \tau_c, \tau_{c+m}, Opt\_X_i, Opt\_Y_i] = \text{argmin}(\mathcal{A}(F, T, TR_{D2D}, TR_{cell}, E_{D2D}, P_R, P_W, P_{IDLE})).$$

EEOF 模型的主要优点是:

- (1) 在 MCN 中同时使用 D2D 通信技术和蜂窝技术, 很大程度上改善了传统 MCN 中因使用间歇式 Ad hoc 连接移动中继而导致的端到端的传输延迟情况, 提高了系统服务的性能;
- (2) 整个应用运作期间的场景设置合理, 流程清晰, 作为移动中继节点选择的度量因素, 源节点与移动中继节点通信、中继移动过程中、中继向基站转发过程中的存储、携带和转发等操作能耗已作了比较全面而充分的考虑, 计算方式选择也较恰当, 为实验结果更加贴近实际应用场景提供了保障;
- (3) 在节点空间密度分别为 0.1 和 0.05 时, 节点均匀分布情况下, EEOF 模型比一跳蜂窝网配置下的平均能耗可降低 95% 和 94%; 而节点不均匀分布时, 平均能耗减少量分别为 61% 和 51%;
- (4) 将经过理论验证后的 EEOF 模型应用到基于上下文环境的延迟容忍网络机会转发中, 性能优良, 为今后的相应研究提供了可靠的理论指导和应用保障.

该模型存在的唯一不足之处是: 实验仅仅验证了两跳通信的场景, 但对于目前各种网络通信应用模式并存的物联网, 其效果不得而知, 建议从多跳转发开始, 逐步尝试扩展应用.

### 3.8 各种模型的比较

表 3 是对本节介绍的不同场景下的部分模型在一些参数方面进行的对比, 总共适用 18 个指标.

- 前 8 个指标是根据文献[21]对机会转发策略分类所提及的各项候选度量因子的比较, 其中, 接触信息是指转发过程中两个节点相遇时的交换信息; 上下文信息是指数据转发网络环境信息; 社会关系和社会地位根据节点携带者的特性来确定, 前者反映携带者的社交关系, 后者代表携带者在某个社交关系范围内的活跃度; 网络拓扑信息指的是转发模型的网络环境模型; 数据属性代表转发数据本身的特征; 时

间因素和空间因素指的是数据转发过程中是否考虑判断节点在不同时刻、不同位置的转发能力.以上这8个指标都是构建转发模型时通常需要考虑的因子;

- 第9个指标是评价是否对所采用模型进行实时动态性能评估;
- 第10~15个指标代表对比测试该模型时是否使用到的评估度量因子;
- 第16~18个指标是指数据转发模型是否已经运用到实际环境中、所使用到的主要数学模型以及所适用的实际场景.

**Table 3** Comparison of representative work on partial data forwarding model in IoT

**表 3** 物联网中部分典型数据转发模型的比较

模型	LWOF	LASS	OVDf	EDFS	ODF	G-DTE	EPBC	EEOF
接触信息	否	是	是	否	否	是	是	否
上下文信息	是	是	是	是	是	是	否	是
社会关系	否	是	否	否	否	否	否	否
社会地位	否	是	是	否	否	否	否	否
网络拓扑信息	否	是	是	是	否	是	否	是
数据属性	是	否	是	是	是	是	是	否
时间因素	是	是	否	否	是	否	是	是
空间因素	是	是	是	否	否	否	是	是
动态评估	是	是	是	是	是	是	是	是
投递率	是	是	是	否	是	是	否	否
时延	是	是	是	是	是	是	是	是
代价比	否	是	否	否	否	是	否	否
跳数	否	否	否	是	否	否	否	否
能耗	是	否	否	是	是	否	否	是
网络吞吐量	否	否	否	否	否	是	否	否
实施	否	否	否	否	否	否	否	否
数学方法	欧氏距离,泊松分布	加权密度,内积	马尔可夫决策	压缩感知,离散余弦变换	泊松分布	贪婪启发式变换	循环方法	分析,线性和
应用场境	无线传感器网络	移动社交网络	车载网络	无线体域网	无线体域网	无限混合网络	车载命名数据网	多跳蜂窝网络

由表3可知:物联网数据转发模型的构建并非要考虑所有度量因子,它与实际应用场景及转发方式密切相关,并且,不同模型间在很多性能方面也存在较大差别.比如LWOF、EDFS、ODF和EEOF这4个模型,LWOF适用于一般的无线传感网环境,EDFS和ODF应用在无线体域网环境,EEOF是针对移动蜂窝网络中D2D通信条件下的两跳转发场景而设定的转发策略,在它们的数据转发模型的构建过程中,都主要依靠网络上下文环境的通信信道条件时刻进行转发判断,这种依据网络环境实际参数数据制定的转发策略在模型的鲁棒性方面都具有相对最好的效果.而在移动社交网络中,大量的节点与其携带者的行为关联紧密,因此,携带者的移动轨迹、社会关系、社会地位及携带者间的接触信息将会作为数据转发模型构建的主要度量因子.例如LASS模型和OVDf模型.显然,这些模型下的度量因子随机性比较大,对转发判断提供人性化效果的同时,也会引起判断结果与现实情况之间产生一定的误差,所以它们在鲁棒性方面表现一般.但考虑到人类参与物联网应用的广泛性,这类模型的适用于各种物联网环境的性能较强.新兴的命名数据网络技术应用到车载网络环境中,实现了EPBC数据转发模型,根据命名数据网络的工作机制,EPBC暂时仅将节点间的接触信息、时空因素作为度量因子,这些因子同样也是具有很大的不稳定性,因此,其鲁棒性相对较低.但由于有作为未来互联网变革主体之一的命名数据网络的参与,该模型在可扩展性方面会展现出相对最好的效果.G-DTE模型是基于无线混合网络环境而设计的,无线混合网是一种综合以上各类特定网络环境的泛在应用场景,主要以提高整个网络的吞吐量、降低整体能耗为目标,其中,节点类型和节点间的能力等存在很大差别.另外,其网络环境最为复杂,因此,一般情况下无法将节点携带者的信息、时空因素作为转发衡量因子,其转发模型构建主要考虑网络上下文信息、节点间的接触情况以及网络空间的模型情况等.所以,相对于其他模型,该模型的可扩展性效果较好,而适用于各种物联网环境的能力和鲁棒性性能一般.

## 4 存在的问题及展望

### 4.1 存在的问题及解决方案

作为物联网子范畴的无线传感网,已存在大量与其数据转发研究相关的成果,但是,随着与物联网有关的各项全新的概念、技术、思想和方法的出现,比如命名数据网络、5G 移动通信网络、(无线)软件定义网络、D2D 通信技术、移动边缘计算或雾计算等,原来已有的数据转发模型或处理过程已不能完全满足当前物联网应用的需求,而集成新出现技术的物联网研究还处于起始阶段,存在一些明显的问题.

#### (1) 物联网应用场景网络空间模型构建多样化的问题.

环境网络模型构建是研究数据转发机制的最基础的工作,有的采用无向图或有向图,也有的使用向量,有的使用平面图表述,有的采用凸空间形式,还有的使用树形结构等等.雾计算等新技术的出现使得传统物联网的体系结构发生了变化,如果网络空间模型构建不随之改变,可能会严重影响到后续数据转发的建模效果.

#### (2) 数据转发度量因子定义的混乱性.

物联网应用中,不同的环境可能会选择不同的度量因子,同一名称的度量因子在不同的环境中会具有同样的意义,但在不同的研究中对它的定义或计算有可能不同,具有一定的主观人为性,比如社会关系、接触信息、社会相似性等的定义及计算方式,这将导致数据转发模型的性能难以准确测量.

#### (3) 数据转发模型的多样性.

物联网应用场景具有多样性,比如传统无线传感网络、车载网络、移动社交网络、水下传感网络、无线体域网、无线混合网络等.各种数据转发模型都是基于一定的应用背景,比如车载网络和移动社交网络应用下的数据转发易依赖于社会关系和地位、历史轨迹、接触信息、时空因素等进行建模,而无线体域网更加依赖数据属性,几乎不考虑空间因素.所以,不同的数据转发模型适用于不同的应用场景,这一点导致模型难以统一,性能不易评估.

#### (4) 模型性能评价标准的不一致性且评价困难.

不同的物联网应用情形对数据转发模型的性能要求存在差别,比如无线混合网络比较注重整个网络的吞吐量最优化,而移动社交网络会过多地考虑网络服务提供给使用者的数据质量,因此,不同模型间功能效果的对比评估是一个相当不容易的工作,而且大多数模型性能的评价都是通过模拟实验完成的,没有对实际性能进行验证,可能会与现实情况存在较大偏差.

#### (5) 从表 3 中可以看出,几乎所有模型都没有综合考虑各种可能的度量因子.

比如:大多数模型没有考虑社会关系和地位、时空因素,这些在机会网络应用中起着极其重要的作用.而且,由于物联网数据转发应用中存在许多不确定因素,模型的实现存在一定的难度.

#### (6) 新兴技术或方法为物联网数据转发研究注入了生机和活力.

相较于传统的物联网来说,移动边缘计算或雾计算模式提高了物联网边缘设备的计算能力,拉近了物联网设备与数据中心之间的距离,5G 可增强物联网设备间的通信能力,SDN 和 NDN 能简化物联网数据转发的设计或开发.这些新兴技术的应用,总体上能使物联网数据转发的延迟减少、投递率增加、通信代价和能耗降低,可以让我们将更多的注意力放在转发算法本身性能的优化上.但到目前为止,其中很多技术并不成熟,相关方面的研究成果也相对较少,会存在各种各样的问题.比如,尽管雾计算能为物联网应用带来巨大的好处,但是由于物联网设备具有移动性和异构性的特点,很难使雾计算节点的部署达到最优化.例如,可穿戴设备和移动电话的位置随时间不断在变化,不同的物联网设备有不同的传输需求等等.一些能量不敏感的设备(如移动电话和监控设备)需要很高的数据速率,而一些能量敏感型的设备(如传感器节点)要求低速率、低能耗的数据传输.因此,物联网设备中这种异构的数据传输需求需要不同的设备采用不同的无线访问技术,从而导致在物联网硬件、技术标准及维护等方面都增加了一定的难度和负担.而且,目前已存在的物联网数据转发模型几乎都没有考虑设备间性能参数上的这些差异,最终导致测试结果与实际存在较大的误差,模型或算法的可靠性降低.

由于物联网应用环境本身的复杂性,不可能使用一种高效、可靠、统一的标准来解决以上问题.因此,为了

提高物联网数据转发性能:首先,我们在设计转发模型时应尽量详细、全面地考虑以上决定转发性能的度量因素,采用正确、合理的方法构建或获取它们的模型,针对每一个指标逐项突破;其次,网络是物联网的神经系统,数据转发的成功与否主要由网络性能决定,因此,除了以上传统保守的解决方案之外,我们还可以利用 5G、移动云计算、移动边缘计算、NDN 等新兴网络模式或技术对物联网应用的影响.针对特定物联网环境下数据转发研究存在的问题,分别从以下 3 个方面提出相应的解决方案.

### (1) 移动通信技术

5G 作为新一代移动通信系统,它的一些技术、方法或措施可以决定 5G 的性能和物联网应用的效果.比如,以采用 D2D 通信技术辅助的或以 5G 信道环境、干扰模型等为判断依据的移动物联网数据转发效果就主要依赖于这些技术的性能高低.D2D 作为无线通信自组织网络的一项主要通信技术,具有发射功率低、频谱利用率高、低时延以及高速率等优点.它能够复用小区资源进行直接通信,可使终端发射频率降低,蜂窝网频谱效率提高,在一定程度上提升了无线通信系统频谱资源的利用率.显然,D2D 可以辅助蜂窝网完成在某些网络覆盖较差环境下的任务,比如利用附近移动智能设备(手机或智能腕表等)作为协作中继进行数据采集或转发,使源点与基站时刻保持通信.然而,蜂窝频谱资源在被 D2D 复用的同时,蜂窝用户、基站和 D2D 用户之间也会互相干扰,影响了 D2D 通信和蜂窝通信.因此,为了提高物联网环境下数据转发的性能,消除干扰或降低干扰影响势在必行,我们可以从以下方面对 5G 中的干扰或信道等技术进行改进.首先,可以对特定物联网环境下干扰产生的原因进行分析并分类总结,寻求降低干扰带来的性能损伤方法,构建符合其应用的合理干扰模型,优化干扰协调技术或设计高效的干扰协调算法;其次,对于信道,可以从其容量、模型、传输方案以及天线抵消技术等方面去改善大规模多输入多输出的频谱效率和功效,合理分配移动网络频谱资源,以适应物联网大规模数据转发复杂业务的基本需求.所以,深入研究最优信道信息获取方式、无线传输方法、多用户共享空间无线资源的联合调配方法,以及研究贴合实际物联网应用环境的信道模型,分析它对信道容量的影响,分析实际信道模型在适度的导频开销和一定实现复杂度下可达到的频谱效率及功效等,均可以作为研究提升物联网数据转发性能的潜在领域.

### (2) 服务计算模式

传统的物联网处理大数据时没有足够的可扩展性和有效性,而且大数据转换会消耗巨大的能量、带宽和时间,代价太高;而且物联网大数据流必须以高容积、快速度传递到云,其中,用户隐私还依然是一个未被解决的挑战性问题.大规模多输入多输出天线阵列和超密集异构网络部署方式等是 5G 的重要特征,它们使得“宏基站提供覆盖范围,小区或小基站提供容量”成为目前或未来互联网的主要服务部署模式.密集型小区部署使得 D2D 通信在物联网应用中无处不在,也使得物联网服务计算模式从移动云计算向“移动边缘计算”或“雾计算”“微云计算”逐渐扩展.雾计算是一个分布式计算框架,它包含了大量互相连接的高性能物理机,是一种可使分布式物联网设备具有较强计算能力的计算模式.因此,在网络中部署大量雾节点可以进行本地收集、分类、分析原始物联网数据流,而不用将它们传输到云,这样可以极大地减轻核心网络的负担,潜在地加速物联网大数据的处理.显然,雾计算等新的计算模式可以使数据中心尽可能地接近物联网物理设备,从而减少数据的传输和延迟,降低网络通信代价,为物联网应用注入了生机和活力.因此,设计符合新计算模式下的物联网数据转发模型或算法也可以成为一种提升或改进传统数据转发性能的手段或方法.另外,为了支持新计算模式下物联网数据转发的顺利进行,也必须在技术上很好地解决以下问题,如良好的信号模型、高效率的认知无线电技术或干扰消除技术、充足的频谱资源、智能的回传网络、实时的移动性以及良好的网络节点动态部署、自动配置和维护效果等等,都需要选择或设计符合实际需求的、正确的算法或模型.

### (3) 网络体系架构

一定物联网环境下的数据转发研究会严格受到物联网体系架构的影响.在现有且成熟的网络架构上进行数据转发研究,可以达到事半功倍的效果.作为一种新型网络体系架构,NDN 是以数据内容和信息为中心的,它给数据资源建立索引,利用虚拟的控制和转发分离实现高效率的物联网数据转发效果.相较于传统的 IP 网络架构,NDN 能够更好地支持和适应物联网环境的动态拓扑变化.NDN 中的通信是由接收端驱动的,它已完善地解

决了可控制性转发策略、路由策略和链路协议等一系列关键性的问题.类似于 NDN,SDN 把一个软件层置于网络管理员和实体网络组件之间,使网络管理员不必手工配置物理的接入网络设备和硬件,而只需通过软件接口调整网络设备.它类似于虚拟化服务器和存储,目的在于简化维护和配置操作.资源分片和信道隔离、监控与状态报告、切换等关键技术是当前 SDN 在无线网络中应用的技术挑战,这些挑战直接影响到数据转发的效果.比如:资源分片不合理,可能会导致有些资源被多个任务排队抢占,引起系统拥塞,致使转发数据停留时间过长而失效,最终转发失败;信道隔离效果差,信道间干扰严重,会引起以信道信息作为判断条件的物联网数据转发性能的下降等.这些研究刚刚开始,还需要深入进行.另外,SDN 和 NDN 都可作为物联网数据转发研究的一个基础性架构存在,因此,我们还可以以现有 SDN 架构(如 OpenFlow)或 NDN 架构为基础,通过使用各种措施提升它们的自身性能或改进路由策略等来提高物联网数据转发的性能.

## 4.2 展 望

结合上节中提到的问题及相应的解决方案,我们认为可以从以下几个方面对物联网环境下的数据转发模型做进一步的工作.

- (1) 进一步构建合理的网络场景模型.综合各方面的需求,选择的元素要尽量能够充分展现实际的物联网应用场景.比如,对于车载网动态场景模型的构建,除了要考虑固定路线车辆和随机路线车辆的相辅相成特性、车辆间关联的主要因素个数及值(如权重)、关联是否有向等,还要考虑因雾计算、5G 等新技术出现引起的路边基站的部署结构变化及通信技术进化的情况.这也是开始进行数据转发研究的最基础的工作;
- (2) 深入研究数据转发模型中各度量因子的定义,尤其要注意它的获取方式和测量方法等的正确性、合理化,这对数据转发的建模非常重要,是其建模的基础工作.比如,在移动社交网络环境下,当采用节点间社会相似性作为转发度量条件时,对于度量因子“相似性”的定义,有的研究利用两个节点间共同邻居的个数衡量,而有的借助社团分区和节点间的相遇频率来衡量.显然,后者更符合实际物联网社交网络场景;
- (3) 研究尽可能通用的物联网数据转发模型.物联网几乎综合了当前的各种应用,要想实现数据转发模型的完全统一是绝对不可能的,但可以针对相同或相似的应用场景构建通用的数据转发模型.比如,在车载网和移动社交网中,节点位置都是随时间不断变化的,节点间都会存在一定的相遇概率,每个节点也都会有它所属的小社团等等,这些共同因素的存在,能够促使同一个数据转发模型在它们之间通用;
- (4) 数据转发模型性能评价问题.如何客观地对各种数据转发模型进行性能评测,是下一步值得认真研究的问题,可以考虑对相似或相同物联网场景下的数据转发模型建立一个实验场景进行比较研究.比如,对于适合同时车载网和移动社交网环境下应用的转发模型,评估其性能将不会是一件太困难的工作;
- (5) 对已经应用到物联网的新兴技术作深入研究.比如,移动边缘计算或雾计算的出现改变了传统物联网的服务计算模式,并在很大程度上改变了物联网的基本体系架构<sup>[137]</sup>,可以考虑在构建一个边缘物联网服务模式的基础上进行数据转发研究;5G 系统使物联网网络通信方式或技术性能得以提升,可以考虑利用新特性的网络通信方法构建高效率的数据转发模型;SDN 和 NDN 作为新型网络架构,为物联网应用研究,尤其是路由研究,提供了便利的框架结构,在此基础上,可以考虑改进其性能或路由算法,以提升数据转发的能力.以上这些技术都有助于加速物联网应用中物体全智能化的实现,值得关注和深入;
- (6) 结合如人工智能、随机几何理论、神经网络、数据挖掘、深度学习等其他学科的知识,继续探索适合物联网环境下数据转发的新模型、新方法.比如,在具有分布式、无控制中心等特性的无线 Ad Hoc 网络环境下构建数据转发模型时,可以利用随机几何理论作为数学分析工具,构建 SINR/SIR(signal to interference plus noise ratio/signal to interference ratio)分析模型,推导节点的中继概率;也可以通过改

进机器学习中的支持向量机、核学习机或小波神经网络等算法提升通信系统的信道性能,以便适应以 5G 下信道模型或干扰计算为判断依据的数据转发算法;还可以利用博弈论、贝叶斯分类器、马尔可夫链等智能算法构建物联网数据转发模型;除此之外,也可以考虑在移动边缘计算等新兴技术对物联网架构改变的基础上实现上述方法,寻求在物联网数据转发性能方面有进一步的突破。

## 5 总 结

多年来,数据转发应用场景、算法、模型的研究从针对无线传感网静态节点到关注动态节点的作用、从基于一种通信技术的传感器到多种通信技术并存的智能设备、从比较单一的度量因子模型到多个度量因子的模型、从传统无线传感器网络环境到无处不在的智能生活环境、从单一的目标优化实现到多目标联合优化实现、从集中式数据转发模型到转发与控制分离的模型、从专一的应用场景模型到多场景混合的模型等,都可以说明,高性能的数据转发模型研究是促进物联网应用快速普及的一个非常活跃的方向。文献[7]指出,2015 年~2020 年是物联网发展的第 3 个阶段,目标是实现物体的半智能化,在应用和服务方面要实现全球化的应用、自适应的系统及代码的分布式执行、存储和处理,在能耗方面要实现恶劣条件下的发电、多种能量的捕获以及能源可再生等问题。结合本文研究工作可知,物联网环境下的数据转发性能仍需进一步提升,还需要广大研究者的不懈努力。

## References:

- [1] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 2013,29(7):1645–1660. [doi: 10.1016/j.future.2013.01.010]
- [2] Jararweh Y, Al-Ayyoub M, Benkhelifa E, Vouk M, Rindos A. Sdiot: A software defined based Internet of things framework. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2015,6(4):453–461. [doi: 10.1007/s12652-015-0290-y]
- [3] Li YL, Chen H, Mo SF. Novel query-driven real-time data forwarding in Internet of Things. *Chineses Journal of Computers*, 2012,35(3):464–476 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2012.00464]
- [4] Haller S, Karnouskos S, Schroth C. The Internet of Things in an enterprise context. In: *Proc. of the Future Internet Symp.* 2008. 14–28. [doi: 10.1007/978-3-642-00985-3\_2]
- [5] Truong HL, Dustdar S. Principles for engineering IoT cloud systems. *IEEE Cloud Computing*, 2015,2(2):68–76. [doi: 10.1109/MCC.2015.23]
- [6] Wang L, Ranjan R. Processing distributed Internet of Things data in clouds. *IEEE Cloud Computing*, 2015,2(1):76–80. [doi: 10.1109/MCC.2015.14]
- [7] Zhu HB, Yang LX, Qi Z. Survey on the Internet of Things. *Journal of Nanjing University of Posts & Telecommunications*, 2011, 297(6):949–955 (in Chinese with English abstract).
- [8] Chen HM, Cui L, Zhou G. A light-weight opportunistic forwarding protocol with optimized preamble length for low-duty-cycle wireless sensor networks. *Journal of Computer Science and Technology*, 2017,32(1):168–180. [doi: 10.1007/s11390-017-1712-4]
- [9] Liu L, Wang P, Wang R. Propagation control of data forwarding in opportunistic underwater sensor networks. *Computer Networks*, 2017,114:80–94. [doi: 10.1016/j.comnet.2017.01.009]
- [10] Li Z, Wang C, Yang S, Jiang C, Li X. LASS: Local-Activity and social-similarity based data forwarding in mobile social networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2015,26(1):174–184. [doi: 10.1109/TPDS.2014.2308200]
- [11] Li Z, Wang C, Shao L, Jiang C, Wang C. Exploiting traveling information for data forwarding in community characterized vehicular networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2016,PP(99):1. [doi: 10.1109/TVT.2016.2633431]
- [12] 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. [doi: 10.1109/TPDS.2011.140]
- [13] Gao W, Cao G, La Porta T, Han J. On exploiting transient social contact patterns for data forwarding in delay-tolerant networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2013,12(1):151–165. [doi: 10.1109/TMC.2011.249]
- [14] Yuan P, Ma H, Fu H. Hotspot-Entropy based data forwarding in opportunistic social networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 2015,16:136–154. [doi: 10.1016/j.pmcj.2014.06.003]

- [15] Islam M, Razzaque MA, Mamun-Or-Rashid M, Hassan MM, Almogren A, Alelaiwi A. Dynamic traffic engineering for high-throughput data forwarding in wireless mesh networks. *Computers & Electrical Engineering*, 2016,56:130–144. [doi: 10.1016/j.compeleceng.2016.08.004]
- [16] Choi O, Kim S, Jeong J, Lee H, Chong S. Delay-Optimal data forwarding in vehicular sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2016,65(8):6389–6402. [doi: 10.1109/TVT.2015.2478937]
- [17] Xia Y, Chen W, Liu X, Zhang L, Li X, Xiang Y. Adaptive multimedia data forwarding for privacy preservation in vehicular ad-hoc networks. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2017,PP(99):1–13. [doi: 10.1109/TITS.2017.2653103]
- [18] Wu D, Yang B, Wang H, Wu D, Wang R. An energy-efficient data forwarding strategy for heterogeneous WBANs. *IEEE Access*, 2016,4:7251–7261. [doi: 10.1109/ACCESS.2016.2611820]
- [19] Sundmaeker H, Guillemin P, Friess P, Woelfflé S. Vision and challenges for realising the Internet of Things. *Cluster of European Research Projects on the Internet of Things*, European Commission, 2010,3(3):34–36. [doi: 10.2759/26127]
- [20] Ma HD, Zhao D, Yuan PY. Opportunities in mobile crowd sensing. *IEEE Communications Magazine*, 2014,52(8):29–35. [doi: 10.1109/MCOM.2014.6871666]
- [21] Ma HD, Yuan PY, Zhao D. Research progress on routing problem in mobile opportunistic networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2015,26(3):600–616 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4741.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004741]
- [22] Sanaei Z, Abolfazli S, Gani A, Buyya R. Heterogeneity in mobile cloud computing: Taxonomy and open challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014,16(1):369–392. [doi: 10.1109/SURV.2013.050113.00090]
- [23] Barbarossa S, Sardellitti S, Di Lorenzo P. Communicating while computing: Distributed mobile cloud computing over 5G heterogeneous networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014,31(6):45–55. [doi: 10.1109/MSP.2014.2334709]
- [24] Kaur T, Chana I. Energy efficiency techniques in cloud computing: A survey and taxonomy. *ACM Computing Surveys*, 2015,48(2):1–46. [doi: 10.1145/2742488]
- [25] Buyya R, Beloglazov A, Abawajy J. Energy-Efficient management of data center resources for cloud computing: A vision, architectural elements, and open challenges. *Eprint Arxiv*, 2010,12(4):6–17.
- [26] You XH, Pan ZW, Gao XQ, Cao SM, Wu HQ. The 5G mobile communication: The development trends and its emerging key techniques. *China Science: Information Science*, 2014,5(16):551–563 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.1360/N112014-00032]
- [27] Wang CX, Haider F, Gao XQ, You XH, Yang Y, Yuan DF, Aggoune H, Haas H, Fletcher S, Hepsaydir E. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 2014,52(2):122–130. [doi: 10.1109/MCOM.2014.6736752]
- [28] Yuan PY, Liu P, Tang S. RIM: Relative-Importance based data forwarding in people-centric networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016,62:100–111. [doi: 10.1016/j.jnca.2015.12.007]
- [29] El Masri A, Sardouk A, Khoukhi L, Hafid A, Gaiti D. Neighborhood-Aware and overhead-free congestion control for IEEE 802.11 wireless mesh networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2014,13(10):5878–5892. [doi: 10.1109/TWC.2014.2349898]
- [30] Mamun-Or-Rashid M, Alam MM, Razzaque MA, Hong CS. Congestion avoidance and fair event detection in wireless sensor network. *IEICE Trans. on Communications*, 2007,90(12):3362–3372. [doi: 10.1093/ietcom/e90-b.12.3362]
- [31] Ding Y, Yang Y, Xiao L. Multi-Path routing and rate allocation for multi-source video on-demand streaming in wireless mesh networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*. 2011. 2051–2059. [doi: 10.1109/INFOCOM.2011.5935013]
- [32] Passos D, Albuquerque CVN. A joint approach to routing metrics and rate adaptation in wireless mesh networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking (TON)*, 2012,20(4):999–1009. [doi: 10.1109/TNET.2011.2170585]
- [33] Qureshi J, Foh CH, Cai J. Maximum multipath routing throughput in multirate wireless mesh networks. In: *Proc. of the 80th IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC Fall)*. 2014. 1–5. [doi: 10.1109/VTCFall.2014.6966047]
- [34] Zhou A, Liu M, Li Z, Dutkiewicz E. Cross-Layer design with optimal dynamic gateway selection for wireless mesh networks. *Computer Communications*, 2015,55:69–79. [doi: 10.1016/j.comcom.2014.08.011]

- [35] Jang S, Lee CY. Multipath selection and channel assignment in wireless mesh networks. *Wireless Networks*, 2011,17(4): 1001–1014. [doi: 10.1007/s11276-011-0330-2]
- [36] Wu J, Xiao M, Huang L. Homing spread: Community home-based multi-copy routing in mobile social networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*. 2013. 2319–2327. [doi: 10.1109/INFOCOM.2013.6567036]
- [37] Amadeo M, Campolo C, Molinaro A. Enhancing content-centric networking for vehicular environments. *Computer Networks*, 2013, 57(16):3222–3234. [doi: 10.1016/j.comnet.2013.07.005]
- [38] Wang L, Afanasyev A, Kuntz R, Vuyyuru R, Wakikawa R, Zhang L. Rapid traffic information dissemination using named data. In: *Proc. of the 1st ACM Workshop on Emerging Name-Oriented Mobile Networking Design-Architecture, Algorithms, and Applications*. 2012. 7–12. [doi: 10.1145/2248361.2248365]
- [39] Zhang L, Afanasyev A, Burke J, Jacobson V, Claffy K, Crowley P, Papadopoulos C, Wang L, Zhang B. Named data networking. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014,44(3):66–73. [doi: 10.1145/2656877.2656887]
- [40] Angius F, Gerla M, Pau G. Bloogo: Bloom filter based gossip algorithm for wireless NDN. In: *Proc. of the 1st ACM Workshop on Emerging Name-Oriented Mobile Networking Design-Architecture, Algorithms, and Applications*. 2012. 25–30. [doi: 10.1145/2248361.2248369]
- [41] Lu Y, Zhou B, Tung LC, Gerla M, Ramesh A, Nagaraja L. Energy-Efficient content retrieval in mobile cloud. In: *Proc. of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Mobile Cloud Computing*. 2013. 21–26. [doi: 10.1145/2491266.2491271]
- [42] Yu YT, Dilmaghani RB, Calo S, Sanadidi MY, Gerla M. Interest propagation in named data Manets. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. 2013. 1118–1122. [doi: 10.1109/ICCNC.2013.6504249]
- [43] Argyriou A, Brea AC, Aoun M. Optimizing data forwarding from body area networks in the presence of body shadowing with dual wireless technology nodes. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2015,14(3):632–645. [doi: 10.1109/TMC.2014.2321768]
- [44] Amadeo M, Molinaro A, Ruggeri G. E-CHANET: Routing, forwarding and transport in information-centric multihop wireless networks. *Computer Communications*, 2013,36(7):792–803. [doi: 10.1016/j.comcom.2013.01.006]
- [45] Meisel M, Pappas V, Zhang L. Ad hoc networking via named data. In: *Proc. of the 5th ACM Int'l Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture*. 2010. 3–8. [doi: 10.1145/1859983.1859986]
- [46] Oh SY, Lau D, Gerla M. Content centric networking in tactical and emergency Manets. In: *Proc. of the IFIP Wireless Days (WD)*. 2010. 1–5. [doi: 10.1109/WD.2010.5657708]
- [47] 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. 1–11. [doi: 10.1109/INFOCOM.2006.228]
- [48] Karp B, Kung HT. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: *Proc. of the 6th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. 2000. 243–254. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=345910>
- [49] Seada K, Zuniga M, Helmy A, Krishnamachari B. Energy-Efficient forwarding strategies for geographic routing in lossy wireless sensor networks. In: *Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*, 2004. 108–121. [doi: 10.1145/1031495.1031509]
- [50] Lee S, Bhattacharjee B, Banerjee S. Efficient geographic routing in multihop wireless networks. In: *Proc. of the 6th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. 2005. 230–241. [doi: 10.1145/1062689.1062720]
- [51] Larsson P, Johansson N. Multiuser diversity forwarding in multihop packet radio networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf*. 2005. 2188–2194. [doi: 10.1109/WCNC.2005.1424856]
- [52] Keally M, Zhou G, Xing G. Sidewinder: A predictive data forwarding protocol for mobile wireless sensor networks. In: *Proc. of the 6th Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. 2009. 1–9. [doi: 10.1109/SAHCN.2009.5168972]
- [53] Hao J, Yao Z, Huang K, Zhang B, Li C. An energy-efficient routing protocol with controllable expected delay in duty-cycled wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*. 2013. 6215–6219. [doi: 10.1109/ICC.2013.6655601]
- [54] Zorzi M, Rao RR. Energy and latency performance of geographic random forwarding for ad hoc and sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking (WCNC)*. 2003. 1930–1935. [doi: 10.1109/VETECS.2003.1208897]



- [55] Fùbler H, Widmer J, Käsemann M, Mauve M, Hartenstein H. Contention-Based forwarding for mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2003,1(4):351–369. [doi: 10.1016/S1570-8705(03)00038-6]
- [56] He T, Blum BM, Cao Q, Stankovic JA, Son SH, Abdelzaher TF. Robust and timely communication over highly dynamic sensor networks. *Real-Time Systems*, 2007,37(3):261–289. [doi: 10.1007/s11241-007-9025-2]
- [57] Huang P, Chen H, Xing G, Tan Y. SGF: A state-free gradient-based forwarding protocol for wireless sensor networks. *ACM Trans. on Sensor Networks (TOSN)*, 2009,5(2):14. [doi: 10.1145/1498915.1498920]
- [58] Li L, Sun L, Ma J, Chen C. A receiver-based opportunistic forwarding protocol for mobile sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems Workshops*. 2008. 198–203. [doi: 10.1109/ICDCS.Workshops.2008.105]
- [59] Biswas S, Morris R. ExOR: Opportunistic multi-hop routing for wireless networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2005,35(4):133–144. [doi: 10.1145/1090191.1080108]
- [60] Gu Y, He T. Data forwarding in extremely low duty-cycle sensor networks with unreliable communication links. In: *Proc. of the 5th ACM Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. 2007. 321–334. [doi: 10.1145/1322263.1322294]
- [61] Cao Z, He Y, Liu Y. L2: Lazy forwarding in low duty cycle wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*. 2012. 1323–1331. [doi: 10.1109/INFCOM.2012.6195495]
- [62] Unterschütz S, Renner C, Turau V. Opportunistic, receiver-initiated data-collection protocol. In: *Proc. of the 9th European Conf. on Wireless Sensor Networks*. 2012. 1–16. [doi: 10.1007/978-3-642-28169-3\_1]
- [63] Landsiedel O, Ghadimi E, Duquennoy S, Johansson M. Low power, low delay: Opportunistic routing meets duty cycling. In: *Proc. of the 11th ACM Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks*. 2012. 185–196. [doi: 10.1109/IPSNS.2012.6920956]
- [64] Duquennoy S, Landsiedel O, Voigt T. Let the tree Bloom: Scalable opportunistic routing with ORPL. In: *Proc. of the 11th ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. 2013. 1–14. [doi: 10.1145/2517351.2517369]
- [65] Autenrieth M, Frey H. PaderMAC: A low-power, low-latency MAC layer with opportunistic forwarding support for wireless sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Ad-Hoc Networks and Wireless*. 2011. 117–130. [doi: 10.1007/978-3-642-22450-8\_9]
- [66] Kim H, Tang J, Anderson R, Mascolo C. Centrality prediction in dynamic human contact networks. *Computer Networks*, 2012, 56(3):983–996. [doi: 10.1016/j.comnet.2011.10.022]
- [67] Merugu S, Ammar MH, Zegura EW. Routing in space and time in networks with predictable mobility. Technical Report, GIT-CC-04-07, Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2004. 1–13.
- [68] Jain S, Fall K, Patra R. Routing in a delay tolerant network. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Conf. on Applications*. 2004. 145–158. [doi: 10.1145/1030194.1015484]
- [69] Liu C, Wu J. Routing in a cyclic mobispace. In: *Proc. of the 9th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. 2008. 351–360. [doi: 10.1145/1374618.1374665]
- [70] Acer UG, Giaccone P, Hay D, Neglia G, Tarapiah S. Timely data delivery in a realistic bus network. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2012,61(3):1251–1265. [doi: 10.1109/TVT.2011.2179072]
- [71] Lindgren A, Doria A, Schelen O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2003,7(3):19–20. [doi: 10.1145/961268.961272]
- [72] Musolesi M, Hailes S, Mascolo C. Adaptive routing for intermittently connected mobile ad hoc networks. In: *Proc. of the 6th IEEE Int'l Symp. on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. 2005. 183–189. [doi: 10.1109/WOWMOM.2005.17]
- [73] Leguay J, Friedman T, Conan V. Evaluating mobility pattern space routing for DTNs. In: *Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*. 2005. 1–10. [doi: 10.1109/INFCOM.2006.299]
- [74] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The multiple-copy case. *IEEE/ACM Trans. on Networking (ToN)*, 2008,16(1):77–90. [doi: 10.1109/TNET.2007.897964]
- [75] Erramilli V, Crovella M, Chaintreau A, Diot C. Delegation forwarding. In: *Proc. of the 9th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. 2008. 251–260. [doi: 10.1145/1374618.1374653]
- [76] Xiao M, Wu J, Liu C, Huang L. Tour: Time-Sensitive opportunistic utility-based routing in delay tolerant networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*. 2013. 2085–2091. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6567010]

- [77] Coll-Perales B, Gozálviz J, Friderikos V. Energy-Efficient opportunistic forwarding in multi-hop cellular networks using device-to-device communications. *Trans. on Emerging Telecommunications Technologies*, 2016,27(2):249–265. [doi: 10.1002/ett.2855]
- [78] Lall S, Maharaj BTJ, van Vuuren PAJ. Null-Frequency jamming of a proactive routing protocol in wireless mesh networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016,61:133–141. [doi: 10.1016/j.jnca.2015.10.009]
- [79] Yuan P, Ma H. Hug: Human gathering point based routing for opportunistic networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*. 2012. 3024–3029. [doi: 10.1109/WCNC.2012.6214323]
- [80] Daly EM, Haahr M. Social network analysis for information flow in disconnected delay-tolerant MANETs. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2009,8(5):606–621. [doi: 10.1109/TMC.2008.161]
- [81] Hui P, Crowcroft J, Yoneki E. Bubble Rap: Social-Based forwarding in delay-tolerant networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2010,10(11):1576–1589. [doi: 10.1109/TMC.2010.246]
- [82] Mtibaa A, May M, Diot C, Ammar M. Peoplerrank: Social opportunistic forwarding. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*. 2010. 1–5. [doi: 10.1109/INFCOM.2010.5462261]
- [83] Ochiai H, Esaki H. Mobility entropy and message routing in community-structured delay tolerant networks. In: *Proc. of the 4th ACM Asian Conf. on Internet Engineering*. 2008. 93–102. [doi: 10.1145/1503370.1503396]
- [84] Yuan P, Ma H. Opportunistic forwarding with hotspot entropy. In: *Proc. of the 14th IEEE Int'l Symp. and Workshops on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. 2013. 1–9. [doi: 10.1109/WoWMoM.2013.6583393]
- [85] Balasubramanian A, Levine B, Venkataramani A. DTN routing as a resource allocation problem. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2007,37(4):373–384. [doi: 10.1145/1282427.1282422]
- [86] Lee K, Yi Y, Jeong J, Won H, Rhee I, Chong S. Max-Contribution: On optimal resource allocation in delay tolerant networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*. 2010. 1–9. [doi: 10.1109/INFCOM.2010.5461932]
- [87] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking*. 2005. 252–259. [doi: 10.1145/1080139.1080143]
- [88] Jeong J, Guo S, Gu Y, He T, Du DHC. Trajectory-Based data forwarding for light-traffic vehicular ad hoc networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2011,22(5):743–757. [doi: 10.1109/TPDS.2010.103]
- [89] Liu C, Wu J. Practical routing in a cyclic mobispace. *IEEE/ACM Trans. on Networking (TON)*, 2011,19(2):369–382. [doi: 10.1109/TNET.2010.2079944]
- [90] Xu F, Guo S, Jeong J, Gu Y, Cao Q, Liu M, He T. Utilizing shared vehicle trajectories for data forwarding in vehicular networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*. 2011. 441–445. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5935200]
- [91] Zhao J, Cao G. VADD: Vehicle-Assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2008, 57(3):1910–1922. [doi: 10.1109/TVT.2007.901869]
- [92] Naveen KP, Kumar A. Optimal relay selection with channel probing in wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE ICC Workshop on Sensor Network Protocols & Applications*. 2011. 246–253.
- [93] Ehyai A, Hashemi M, Khadivi P. Using relay network to increase life time in wireless body area sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops (WoWMoM)*. 2009. 1–6. [doi: 10.1109/WOWMOM.2009.5282405]
- [94] Engel F, Abrão T, Hanzo L. Relay selection methods for maximizing the lifetime of wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*. 2013. 2339–2344. [doi: 10.1109/WCNC.2013.6554926]
- [95] Elias J, Mehaoua A. Energy-Aware topology design for wireless body area networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications*. 2012. 3409–3410. [doi: 10.1109/ICC.2012.6363949]
- [96] Braem B, Latre B, Moerman I, Blondia C, Reusens E, Joseph W, Martens L, Demeester P. The need for cooperation and relaying in short-range high path loss sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Sensor Technologies and Applications*. 2007. 566–571. [doi: 10.1109/SENSORCOMM.2007.4394980]
- [97] Nabi M, Geilen M, Basten T. MoBAN: A configurable mobility model for wireless body area networks. In: *Proc. of the 4th Int'l ICST Conf. on Simulation Tools and Techniques*. 2011. 168–177. [doi: 10.4108/icst.simutools.2011.245511]

- [98] Sadek AK, Su W, Liu KJR. Clustered cooperative communications in wireless networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). 2005. 3–5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2005.1577835]
- [99] Arrobo GE, Gitlin RD. New approaches to reliable wireless body area networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS). 2011. 1–6. [doi: 10.1109/COMCAS.2011.6105871]
- [100] Zhang P, Xiao G, Tan HP. Distributed relay scheduling for maximizing lifetime in clustered wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communication Systems (ICCS). 2012. 11–15. [doi: 10.1109/ICCS.2012.6406099]
- [101] Yun D, Kang J, Kim J, Kim D. A body sensor network platform with two-level communications. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Consumer Electronics. 2007. 1–6. [doi: 10.1109/ISCE.2007.4382186]
- [102] Fischione C, Ergen SC, Park P, Johansson KH, Sangiovanni-Vincentelli A. Medium access control analytical modeling and optimization in unslotted IEEE 802.15.4 wireless sensor networks. In: Proc. of the 6th Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. 2009. 1–9. [doi: 10.1109/SAHCN.2009.5168946]
- [103] Ma Y, Aylor JH. System lifetime optimization for heterogeneous sensor networks with a hub-spoke technology. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004,3(3):286–294. [doi: 10.1109/TMC.2004.27]
- [104] Song Y, Zhang C, Fang Y. Joint channel and power allocation in wireless mesh networks: A game theoretical perspective. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008,26(7):1149–1159. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080912]
- [105] Vieira FRJ, De Rezende JF, Barbosa VC, Fdida S. Local heuristic for the refinement of multi-path routing in wireless mesh networks. Computer Networks, 2013,57(1):273–285. [doi: 10.1016/j.comnet.2012.09.009]
- [106] Yi J, Adnane A, David S, Parrein B. Multipath optimized link state routing for mobile ad hoc networks. Ad Hoc Networks, 2011, 9(1):28–47. [doi: 10.1016/j.adhoc.2010.04.007]
- [107] Guo X, Wang F, Liu J, Cui Y. Path diversified multi-QoS optimization in multi-channel wireless mesh networks. Wireless Networks, 2014,20(6):1583–1596. [doi: 10.1007/s11276-014-0698-x]
- [108] Zhao P, Yang X, Wang J, Liu B, Wang J. Admission control on multipath routing in 802.11-based wireless mesh networks. Ad Hoc Networks, 2013,11(8):2235–2251. [doi: 10.1016/j.adhoc.2013.05.006]
- [109] Pióro M, Żotkiewicz M, Staehle B, Staehle D, Yuan D. On max-min fair flow optimization in wireless mesh networks. Ad Hoc Networks, 2014,13:134–152. [doi: 10.1016/j.adhoc.2011.05.003]
- [110] Wang H, Chin KW, Soh S. On minimizing data forwarding schedule in multi transmit/receive wireless mesh networks. IEEE Access, 2016,4:1570–1582. [doi: 10.1109/ACCESS.2016.2553048]
- [111] Khokhar RH, Noor RM, Ghafoor KZ, Ke CH, Ngadi MA. Fuzzy-Assisted social-based routing for urban vehicular environments. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011,2011(1):1–15. [doi: 10.1186/1687-1499-2011-1]
- [112] Naumov V, Gross TR. Connectivity-Aware routing (CAR) in vehicular ad-hoc networks. In: Proc. of the 26th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications. 2007. 1919–1927. [doi: 10.1109/INFCOM.2007.223]
- [113] Lee KC, Le M, Harri J, Gerla M. Louvre: Landmark overlays for urban vehicular routing environments. In: Proc. of the 68th IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC). 2008. 1–5. [doi: 10.1109/VETECF.2008.447]
- [114] Jerbi M, Senouci SM, Rasheed T, Ghamri-Doudane Y. Towards efficient geographic routing in urban vehicular networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2009,58(9):5048–5059. [doi: 10.1109/TVT.2009.2024341]
- [115] Jeong J, Guo S, Gu Y, He T, Du DHC. TSF: Trajectory-Based statistical forwarding for infrastructure-to-vehicle data delivery in vehicular networks. In: Proc. of the 30th IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS). 2010. 557–566. [doi: 10.1109/ICDCS.2010.24]
- [116] Jeong J, Guo S, Gu Y, He T, Du D. TBD: Trajectory-Based data forwarding for light-traffic vehicular networks. In: Proc. of the 29th IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS). 2009. 231–238. [doi: 10.1109/ICDCS.2009.11]
- [117] Xiang Y, Liu Z, Liu R, Sun W, Wang W. GeoSVR: A map-based stateless VANET routing. Ad Hoc Networks, 2013,11(7): 2125–2135. [doi: 10.1016/j.adhoc.2012.02.015]
- [118] Dua A, Kumar N, Bawa S. A systematic review on routing protocols for vehicular ad hoc networks. Vehicular Communications, 2014,1(1):33–52. [doi: 10.1016/j.vehcom.2014.01.001]
- [119] Basagni S, Conti M, Giordano S, Stojmenovic I. Mobile Ad Hoc Networking: The Cutting Edge Directions. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2013. 515–544. [doi: 10.1002/9781118511305]

- [120] Zhang L, Yu B, Pan J. GeoMob: A mobility-aware geocast scheme in metropolians via taxicabs and buses. In: Proc. of the 2014 IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM). 2014. 1279–1787. [doi: 10.1109/INFOCOM.2014.6848116]
- [121] Wu Y, Zhu Y, Li B. Infrastructure-Assisted routing in vehicular networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM). 2012. 1485–1493. [doi: 10.1109/INFOCOM.2012.6195515]
- [122] Wen H, Ren F, Liu J, Lin C, Li P, Fang Y. A storage-friendly routing scheme in intermittently connected mobile network. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2011,60(3):1138–1149. [doi: 10.1109/TVT.2011.2104378]
- [123] Zhu H, Dong M, Chang S, Zhu Y, Li M, Shen XS. ZOOM: Scaling the mobility for fast opportunistic forwarding in vehicular networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM). 2013. 2832–2840. [doi: 10.1109/INFOCOM.2013.6567093]
- [124] Nguyen NP, Dinh TN, Tokala S, Thai MT. Overlapping communities in dynamic networks: Their detection and mobile applications. In: Proc. of the 17th ACM Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. 2011. 85–96. [doi: 10.1145/2030613.2030624]
- [125] Qin J, Zhu H, Zhu Y, Lu L, Xue G, Li M. POST: Exploiting dynamic sociality for mobile advertising in vehicular networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2016,27(6):1770–1782. [doi: 10.1109/TPDS.2015.2467392]
- [126] Li XY, Gui XL. Research on dynamic trust model for large scale distributed environment. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2007,18(6):1510–1521 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/20070622.htm> [doi: 10.1360/jos.181510]
- [127] Tian X, Zhu YH, Chi K, Liu JJ, Zhang D. Reliable and energy-efficient data forwarding in industrial wireless sensor networks. IEEE Systems Journal, 2015. 1–11. [doi: 10.1109/JSYST.2015.2466696]
- [128] Katti S, Rahul H, Hu W, Katabi D, Médard M, Crowcroft J. XORs in the air: Practical wireless network coding. IEEE/ACM Trans. on Networking (ToN), 2008,16(3):497–510. [doi: 10.1109/TNET.2008.923722]
- [129] Le J, Lui JCS, Chiu DM. DCAR: Distributed coding-aware routing in wireless networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2010, 9(4):596–608. [doi: 10.1109/TMC.2009.160]
- [130] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks [MS. Thesis]. Lawrence: Google Inc., 2000. 1–14.
- [131] Daly EM, Haahr M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant Manets. In: Proc. of the 8th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. 2007. 32–40. [doi: 10.1145/1288107.1288113]
- [132] Lee U, Magistretti E, Gerla M, Bellavista P, Corradi A. Dissemination and harvesting of urban data using vehicular sensing platforms. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2009,58(2):882–901. [doi: 10.1109/TVT.2008.928899]
- [133] Chen M, Gonzalez S, Vasilakos A, Cao H, Leung VCM. Body area networks: A survey. Mobile Networks and Applications, 2011, 16(2):171–193. [doi: 10.1007/s11036-010-0260-8]
- [134] Movassaghi S, Abolhasan M, Lipman J, Smith D, Jamalipour A. Wireless body area networks: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014,16(3):1658–1686. [doi: 10.1109/SURV.2013.121313.00064]
- [135] Majeed MF, Ahmed SH, Dailey MN. Enabling push-based critical data forwarding in vehicular named data networks. IEEE Communications Letters, 2017,21(4):873–876. [doi: 10.1109/LCOMM.2016.2642194]
- [136] Zhang Z, Ma H, Liu L. Cache-Aware named-data forwarding in Internet of Things. In: Proc. of the 2015 IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM). 2015. 1–6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2015.7417355]
- [137] Sun X, Ansari N. EdgeIoT: Mobile edge computing for the Internet of Things. IEEE Communications Magazine, 2016,54(12): 22–29. [doi: 10.1109/MCOM.2016.1600492CM]

#### 附中文参考文献:

- [3] 李英龙,陈红,莫尚丰.实时响应物联网中基于查询的数据转发方案.计算机学报,2012,35(3):464–476. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2012.00464]
- [7] 朱洪波,杨龙祥,朱琦.物联网技术进展与应用.南京邮电大学学报(自然科学版),2011,31(1):1–9.
- [21] 马华东,袁培燕,赵东.移动机会网络路由问题研究进展.软件学报,2015,26(3):600–616. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4741.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004741]

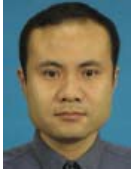
- [26] 尤肖虎,潘志文,高西奇,曹淑敏,邬贺铨.5G 移动通信发展趋势与若干关键技术.中国科学:信息科学,2014,5(16):551-563. [doi: 10.1360/N112014-00032]
- [126] 李小勇,桂小林.大规模分布式环境下动态信任模型研究.软件学报,2007,18(6):1510-1521. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/20070622.htm> [doi: 10.1360/jos181510]



李继蕊(1979—),女,河南新乡人,副教授, CCF 学生会员,主要研究领域为移动云计算,分布式计算与可信服务,物联网.



高云全(1981—),男,讲师,CCF 学生会员, 主要研究领域为可信服务,物联网.



李小勇(1975—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为分布式计算与可信服务,网络安全,物联网.



方滨兴(1960—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会士,主要研究领域为计算机网络,信息安全,物联网.



高雅丽(1991—),女,学士,CCF 学生会员, 主要研究领域为群智感知,社交网络,信任管理.